

INSTYTUT
ELEKTROTECHNIKI

Samodzielna
Pracownia
Technologii
Nadprzewodnikowych
w Lublinie



621.377

624.048

538.945

Sławomir KOZAK

***MODELOWANIE
ELEKTRYCZNYCH
URZĄDZEŃ
NADPRZEWODNIKOWYCH***



**Prace Instytutu
Elektrotechniki**

zeszyt 221, 2005



Spis treści

1. Wprowadzenie	10
1.1. Podstawowe pojęcia nadprzewodnictwa	10
1.2. Materiały nadprzewodnikowe	13
1.3. Zastosowania nadprzewodników	14
1.4. Specyfika modelowania urządzeń nadprzewodnikowych	17
1.5. Cel i teza	21
2. Elektryczne urządzenia nadprzewodnikowe	23
2.1. Przewody nawojowe oraz kształtki	25
2.1.1. Przewody LTS – Nb-Ti, Nb ₃ Sn	30
2.1.2. Kształtki HTS – Bi-2212, Bi-2223, Y-123	35
2.1.3. Przewody HTS – Bi-2212, Bi-2223, Y-123	39
2.2. Chłodzenie urządzeń nadprzewodnikowych	45
2.3. Krioprzepusty prądowe	52
2.4. Wybrane urządzenia nadprzewodnikowe	57
2.4.1. Elektromagnesy nadprzewodnikowe	58
a) Uzwojenia nadprzewodnikowe	58
b) Elektromagnesy LTS dla separatorów magnetycznych	59
c) Uzwojenie indukcyjnego SFCL	61
d) Elektromagnes HTS dla SMES-a o energii 7,36 KJ	62
2.4.2. Separatory magnetyczne	63
2.4.3. SMES-y	68
2.4.4. Ograniczniki prądu	70
3. Modelowanie numeryczne zjawisk elektrotermicznych	77
3.1. Elektrotermiczny model numeryczny krioprzepustu prądowego	79
3.2. Model numeryczny chłodzenia kontaktowego elektromagnesu LTS	86
3.3. Elektrotermiczny model numeryczny rezystancyjnego ogranicznika prądu	90
3.4. Podsumowanie modelowania numerycznego zjawisk elektrotermicznych	96
4. Modelowanie numeryczne zjawisk magnetostatycznych sprzężonych z hydrodynamicznymi	98
4.1. Matematyczno-numeryczny model trajektorii cząstki w separatorze OGMS	103
4.1.1. Analiza ruchu cząstki i model matematyczny	103
4.1.2. Model numeryczny - SEP_MAG	106
4.1.3. Analiza kosztów separatora OGMS dla kotła OP-215	110
4.2. Matematyczno-numeryczne modele hybrydowe krawędzi wychwytu cząstek w separatorze OGMS	113
4.2.1. Analiza sił wychwytyjących cząstki i model matematyczny	114
4.2.2. Hybrydowy model numeryczny wychwytu cząstek (FLUX2D)	117
4.2.3. Hybrydowy model numeryczny wychwytu cząstek (PC-OPERA)	123
4.3. Podsumowanie modelowania numerycznego zjawisk magnetostatyczno-hydrodynamicznych	130
5. Modelowanie numeryczne zjawisk magnetostatycznych	131
5.1. Model numeryczny elektromagnesu HTS dla SMES-a	131
5.2. Wybór konfiguracji uzwojeń elektromagnesu HTS dla SMES-a	133
5.3. Podsumowanie modelowania numerycznego zjawisk magnetostatycznych	138
6. Modelowanie numeryczne zjawisk magnetodynamicznych	139
6.1. Polowo-obwodowy model numeryczny SFCL	140
6.2. Podsumowanie modelowania numerycznego zjawisk magnetodynamicznych	147
7. Wnioski końcowe	148
Literatura	152

Contents

1.	Introduction	10
1.1.	Main notions of superconductivity	10
1.2.	Superconducting materials	13
1.3.	Applications of superconductors	14
1.4.	Specialty of modelling of superconducting devices	17
1.5.	Aim and thesis	21
2.	Electric superconducting devices	23
2.1.	Wires and bulks	25
2.1.1.	LTS wires – Nb-Ti, Nb ₃ Sn	30
2.1.2.	HTS bulks – Bi-2212, Bi-2223, Y-123	35
2.1.3.	HTS wires – Bi-2212, Bi-2223, Y-123	39
2.2.	Cooling of superconducting devices	45
2.3.	Current leads	52
2.4.	Selected superconducting devices	57
2.4.1.	Superconducting magnets	58
a)	<i>Superconducting windings</i>	58
b)	<i>LTS magnets for magnetic separators</i>	59
c)	<i>Winding of inductive SFCL</i>	61
d)	<i>HTS magnet for 7,36 kJ SMES</i>	62
2.4.2.	Magnetic separators	63
2.4.3.	SMES	68
2.4.4.	Fault current limiters	70
3.	Numerical modelling of electrothermal phenomena	77
3.1.	Electrothermal numerical model of current lead	79
3.2.	Numerical model of conduction cooling of LTS magnet	86
3.3.	Electrothermal numerical model of resistive fault current limiter	90
3.4.	Summary of numerical modelling of electrothermal phenomena	96
4.	Numerical modelling of magnetostatic phenomena coupled with hydrodynamic phenomena	98
4.1.	Mathematical-numerical model of particle trajectory in OGMS separator	103
4.1.1.	Particle movement analysis and mathematical model	103
4.1.2.	Numerical model - SEP_MAG	106
4.1.3.	Cost analysis of OGMS separator for OP-215 power boiler	110
4.2.	Mathematical-numerical hybrid models of capture edge of particles in OGMS separator	113
4.2.1.	Capturing forces analysis and mathematical model	114
4.2.2.	Hybrid numerical model of particles capturing (FLUX2D)	117
4.2.3.	Hybrid numerical model of particles capturing (PC-OPERA)	123
4.3.	Summary of numerical modelling of magnetostatic-hydrodynamic phenomena	130
5.	Numerical modelling of magnetostatic phenomena	131
5.1.	Numerical model of HTS magnet for SMES	131
5.2.	Selection of winding of HTS magnet for SMES	133
5.3.	Summary of numerical modelling of magnetostatic phenomena	138
6.	Numerical modelling of magnetodynamic phenomena	139
6.1.	FEM-circuit numerical model of superconducting fault current limiter	140
6.2.	Summary of numerical modelling of magnetodynamic phenomena	147
7.	Conclusions	148
	References	152

Streszczenie

Szczególne właściwości nadprzewodników umożliwiają budowę urządzeń elektrycznych o parametrach nieosiągalnych przy stosowaniu materiałów konwencjonalnych. Urządzenie elektryczne nazywamy nadprzewodnikowym, jeżeli w swej budowie zawiera elementy wykonane z nadprzewodnika i pracujące w stanie nadprzewodzącym. Badania eksperymentalne urządzeń nadprzewodnikowych są kosztowne i czasochłonne. Modele numeryczne zweryfikowane wynikami badań eksperymentalnych pozwalają na badanie kompleksowe oraz analizę zjawisk zachodzących w urządzeniach nadprzewodnikowych. Badać i analizować można wzajemne wpływy parametrów i wielkości fizycznych, których pomiar byłby trudny czy wręcz niemożliwy. Zmiana geometrii urządzeń w modelach numerycznych nie pociąga za sobą wysokich kosztów związanych z budową modeli fizycznych urządzeń nadprzewodnikowych.

Elektryczne urządzenia nadprzewodnikowe buduje się jako stałoprądowe oraz przemiennoprądowe, z ruchomymi częściami i bez ruchomych części. Zjawiska w nich zachodzące są różnej natury: termicznej, elektrycznej, magnetycznej w środowiskach liniowych i nieliniowych. Ponadto praca urządzeń nadprzewodnikowych jest związana ze zjawiskami ruchu i zderzeniami cząstek, z hydrodynamiką roztworów i zawieszin, z naprężeniami mechanicznymi i z innymi zjawiskami. Każdy rodzaj urządzeń wymaga więc innego podejścia przy tworzeniu modeli numerycznych uwzględniającego specyfikę pracy, budowę i zjawiska decydujące o działaniu.

W pracy omówione zostały główne zagadnienia dotyczące budowy urządzeń nadprzewodnikowych i ich chłodzenia mające związek z modelowaniem numerycznym urządzeń nadprzewodnikowych.

Zaprezentowano 3 sposoby tworzenia modeli numerycznych urządzeń nadprzewodnikowych: modele numeryczne utworzone w narzędziowym programie polowo-obwodowym FLUX2D, numeryczne modele hybrydowe wykorzystujące własne programy obliczeniowe autora, sterujące współpracą z narzędziowymi programami polowymi FLUX2D i PC-OPERA oraz model numeryczny wykorzystujący własny program obliczeniowy.

Wykazano, że poprzez zaawansowane programowanie oraz odpowiednie wykorzystanie polowo-obwodowych programów narzędziowych można tworzyć modele numeryczne urządzeń nadprzewodnikowych.

W pracy przedstawiono 10 szczegółowych modeli numerycznych i matematycznych uwzględniających specyfikę zjawisk w krioprzepustach prądowych, nadprzewodnikowych elektromagnesach SMES-ów i separatorów magnetycznych, nadprzewodnikowych separatorach magnetycznych oraz nadprzewodnikowych ogranicznikach prądu. Modele numeryczne zweryfikowane zostały badaniami eksperymentalnymi.

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

A	potencjał wektorowy,
$a_1, a_2,$	promień wewnętrzny i zewnętrzny cewki,
B	indukcja magnetyczna,
B_r, B_z	radialna i osiowa składowa indukcji magnetycznej,
b	połowa długości cewki,
C_{sc}	stosunek objętości matrycy do nadprzewodnika (współczynnik stabilizacji),
c_v	ciepło właściwe,
F_d	siła lepkości,
$F_{d r}, F_{d z}$	radialna i osiowa składowa siły lepkości,
F_g	siła grawitacji,
F_m	siła magnetyczna,
$F_{m r}, F_{m z}$	radialna i osiowa składowa siły magnetycznej,
f	współczynnik upakowania cząstek w strumieniu,
$f_{b d}$	część równania brzegu zależna od przepływu,
$f_{b m}$	część równania brzegu zależna od siły magnetycznej,
g	przyspieszenie grawitacyjne,
H_c	natężenie krytycznego pola magnetycznego,
H_{c1}	natężenie dolnego krytycznego pola magnetycznego
H_{c2}	natężenie górnego krytycznego pola magnetycznego
H_{ko}	natężenie pola koercji magnesu trwałego
h	współczynnik konwekcji cieplnej,
I	prądu,
I_c	prąd krytyczny,
J	gęstość prądu,
J_c	gęstość prądu krytycznego,
k	przewodność cieplna,
K	jakość separacji,
m	masa cząstki,
p	średnia droga swobodna cząstki,
Q_H	gęstość objętościowa źródła ciepła,
R_1, R_2	promień wewnętrzny i zewnętrzny przestrzeni roboczej separatora,
R_c	promień cząstki,
R_p	promień przegrody separacyjnej,
$r(0)$	początkowa współrzędna radialna cząstki,
$r(j)$	współrzędna radialna j -tego punktu trajektorii,
r, z, θ	współrzędne walcowe,
r_m	maksymalny promień krawędzi wychwytu,
r_x, z_x	zmiennne całkowania,
S	pole powierzchni,
S_1, S_2	pola przekroju przestrzeni roboczej separatora,
S_p	pole całkowitego przekroju przewodu,
S_{sc}	pole przekroju nadprzewodnika w przewodzie,
s	całkowite odchylenie cząstki w separatorze,
T	temperatura,

T_a	temperatura otoczenia,
T_c	temperatura krytyczna,
t_p	czas pomiędzy zderzeniami cząstek,
U	napięcie elektryczne,
U_0	napięcie na ograniczniku z rdzeniem 2 cm x 2 cm,
V_r	składowa radialna średniej prędkości cząstki,
V_z	składowa osiowa średniej prędkości cząstki,
v_1, v_2	prędkości zawiesiny,
v_r	składowa radialna chwilowej prędkości cząstki,
v_t	prędkość transportu ośrodka,
v_z	składowa osiowa chwilowej prędkości cząstki,
W	wydajność separacji,
Z_s	osiową współrzędną środka uzwojenia,
$z(0)$	początkowa współrzędna osiowa cząstki,
$z(j)$	współrzędna osiowa j -tego punktu trajektorii,
α	kąt pomiędzy styczną do krawędzi wychwyty w punkcie (r, z) a osią Z ,
δ	gęstość cząstki,
ε	współczynnik promieniowania cieplnego,
η	współczynnik lepkości ośrodka,
λ_{sc}	współczynnik zapelnienia uzwojenia,
$\lambda_{sc} j_{sc}$	średnia gęstość prądu w przekroju uzwojenia,
μ	przenikalność magnetyczna,
μ_0	$= 4\pi 10^{-7}$ H/m,
ρ	rezystywność,
σ	przewodność elektryczna,
τ	współczynnik tarcia,
Φ_H	strumień ciepła dopływający z zewnątrz,
χ	podatność magnetyczna cząstki,
ψ_B	współczynnik blokowania przepływy.

WYKAZ SKRÓTÓW ANGIELSKICH

BCS	Bardeen, Cooper, Schrieffer
CVD	chemical vapor deposition
FEM	finite element method
HGMS	high gradient magnetic separation
HTS	high temperature superconductor
LTS	low temperature superconductor
MOD	metalorganic deposition
MRI	magnetic resonance imaging
NMR	nuclear magnetic resonance
OGMS	open gradient magnetic separation
PVD	physical vapor deposition
SFCL	superconducting fault current limiter
SFQ	single flux quantum
SIS	superconductor-insulator-superconductor
SMES	superconducting magnet energy storage
SQUID	superconducting quantum interference device
TFA	trifluoroacetate

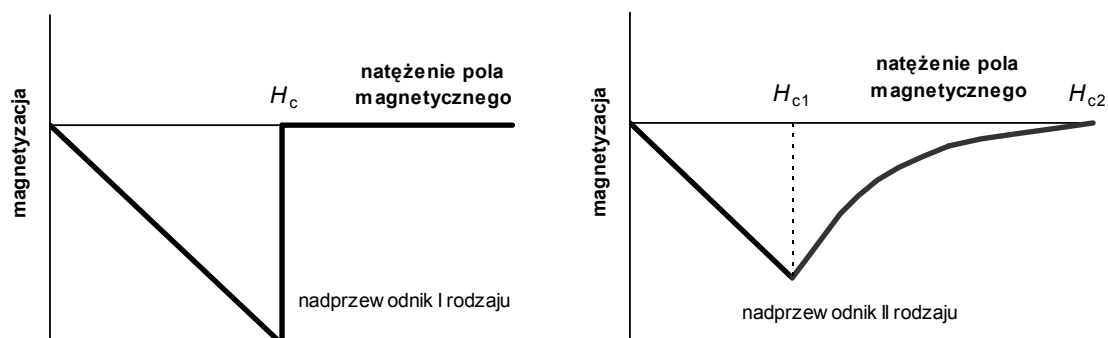
1. WPROWADZENIE

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][3][4]. 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. 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 zachowania w polu magnetycznym wprowadzony został podział na nadprzewodniki I i II rodzaju.

¹ przejście nadprzewodzące [5]



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

Tab. 1. Parametry krytyczne nadprzewodników według PN-IEC 60050-815:2002 – Międzynarodowy Słownik Terminologiczny Elektryki – Część 815: Nadprzewodnictwo [5]

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 krytycznego pola (magnetycznego) ² H_c	natężenie krytyczne pola magnetycznego odpowiadające nadprzewodnikowej energii kondensacji ³ przy zerowym natężeniu pola magnetycznego
natężenie dolnego krytycznego pola (magnetycznego) ² 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) ² H_{c2}	maksymalne natężenie pola magnetycznego, poniżej którego nadprzewodnik II rodzaju jest w stanie mieszanym
prąd krytyczny ⁴ I_c	maksymalny prąd stały, który może być rozpatrywany jako płynący bez rezystancji
gęstość prądu krytycznego ⁴ J_c	gęstość prądu elektrycznego przy prądzie krytycznym określona albo dla całego przekroju przewodu (całkowita), albo gdy występuje stabilizator, niestabilizowanej części przewodu

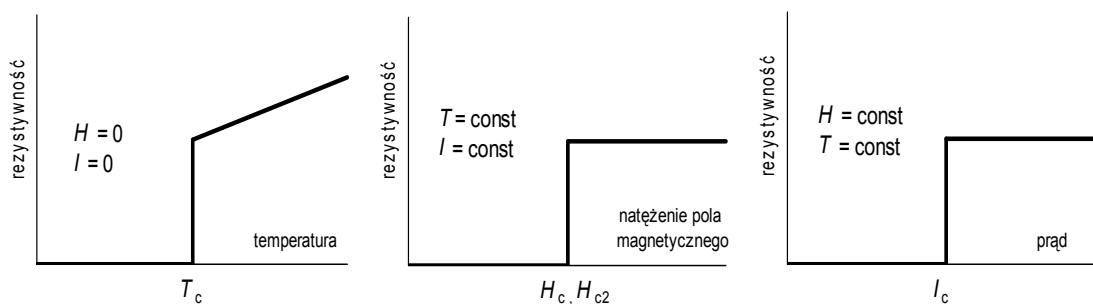
² jest funkcją temperatury [5]

³ różnica gęstości energii swobodnej między stanem rezystywnym a stanem nadprzewodzącym [5]

⁴ jest funkcją natężenia pola magnetycznego i temperatury [5]

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 [5], w którym strumień magnetyczny w postaci fluksonów [5] 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.

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.



Rys. 1.2. Przybliżona interpretacja parametrów krytycznych nadprzewodnika

Interpretację graficzną parametrów krytycznych nadprzewodnika, gdzie zmiana rezystywności odbywa się skokowo, przedstawia rys. 1.2. 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} Ωm i 10^{-13} Ωm lub kryteria polowe 10 $\mu\text{V/m}$ i 100 $\mu\text{V/m}$ [6][7]. Dla nadprzewodników wysokotemperaturowych stosowane są kryteria rezystancyjne $2 \cdot 10^{-13}$ Ωm i 10^{-12} Ωm lub kryteria polowe 100 $\mu\text{V/m}$ i 500 $\mu\text{V/m}$ [8].

1.2. Materiały nadprzewodnikowe

Tab. 2. Temperatury krytyczne wybranych nadprzewodników

nazwa	rodzaj nadprzewodnika			T_c , K
gal	I	pierwiastek	LTS	1,1
aluminium	I	pierwiastek	LTS	1,2
tal	I	pierwiastek	LTS	2,4
ind	I	pierwiastek	LTS	3,4
rtęć	I	pierwiastek	LTS	4,2
tantal	I	pierwiastek	LTS	4,5
lantan	I	pierwiastek	LTS	4,9
wanad	II	pierwiastek	LTS	5,4
ołów	I	pierwiastek	LTS	7,2
technet	I	pierwiastek	LTS	8,2
niob	II	pierwiastek	LTS	9,3
Nb-Ti	II	stop	LTS	10,6
Nb-Zr	II	stop	LTS	10,8
V_3Ga	II	A15	LTS	14,5
Nb_3Sn	II	A15	LTS	18,2
Nb_3Al	II	A15	LTS	18,9
Nb_3Ga	II	A15	LTS	20,7
$Nb_3(Al, Ge)$	II	A15	LTS	21,0
Nb_3Ge	II	A15	LTS	23,2
MgB_2	II	dwuborek	HTS	39-40
Y-123	II	ceramika	HTS	87
Bi-2212	II	ceramika	HTS	90-92
Bi-2223	II	ceramika	HTS	108

Większość metali wykazujących nadprzewodnictwo to nadprzewodniki I rodzaju [1] [2]. Wyjątki to niob i wanad. Nadprzewodniki I rodzaju nie znajdują zastosowania w urządzeniach elektrycznych z powodu małych gęstości prądu krytycznego. Nadprzewodnikami II rodzaju są metale niob i wanad, niektóre stopy np. Nb-Ti, Nb-Zr, pewne związki międzymetaliczne grupy A15 [9] takie jak np. V_3Ga , Nb_3Sn , Nb_3Al , Nb_3Ga , $Nb_3(Al,Ge)$, Nb_3Ge , materiały ceramiczne takie jak np. Bi-2223, Bi-2212, Y-123 i inne [2][3], wśród których należy wymienić odkryty ostatnio tani nadprzewodnik MgB_2 [10][11]. Gęstość prądu krytycznego MgB_2 jest kilkakrotnie

większa od ceramiki Bi-2212. W temperaturze 4,2 K i w polu 4 T, $J_{c(\text{Bi-2212})} = 4 \cdot 10^7 \text{ A/m}^2$, a w tych samych warunkach $J_{c(\text{MgB}_2)} = 1,6 \cdot 10^8 \text{ A/m}^2$ [12]. Największe wartości gęstości prądu krytycznego osiągane są w związkach międzymetalicznych A15. Największe wartości indukcji krytycznej rzędu 60 T osiągane są w ceramicznych nadprzewodnikach wysokotemperaturowych schłodzonych do temperatury kilku kelwinów.

1.3. Zastosowania nadprzewodników

Badania w dziedzinie nadprzewodnictwa koncentrują się obecnie na trzech głównych kierunkach [13][14]. Pierwszym z nich jest poszukiwanie nowych, tanich materiałów nadprzewodnikowych o wysokich temperaturach, gęstościach prądu i polach krytycznych oraz technologii wytwarzania przewodów i kształtek z takich materiałów. Drugim kierunkiem są słabo-prądowe zastosowania nadprzewodników w elektronice i metrologii – głównie wykorzystujące zjawiska Josephsona [2] [3] [13] [15]. Trzecim kierunkiem badań są zastosowania nadprzewodników w urządzeniach elektrycznych.

Urządzenia elektryczne z nadprzewodników niskotemperaturowych to w większości urządzenia stałoprądowe, głównie uzwojenia do wytwarzania silnych pól magnetycznych [16] [17][18]. W zastosowaniach przemienoprądowych związanych z systemami elektroenergetycznymi nadprzewodniki niskotemperaturowe pomimo dużo większych gęstości prądu krytycznego wypierane są przez nadprzewodniki wysokotemperaturowe w postaci przewodów oraz w postaci kształtek [19] [20] [21] [22] [23].

W tab. 3 przedstawiono wybrane przykłady zastosowań nadprzewodników w 4 grupach. Pierwsza grupa zastosowań to urządzenia zwarte wykorzystujące przewody nadprzewodnikowe w postaci uzwojeń. Są tu zarówno urządzenia stałoprądowe jak i przemiennoprądowe. W urządzeniach tej grupy wykorzystywane są podstawowe właściwości nadprzewodników: zerowa rezystywność i doskonały diamagnetyzm.

Druga grupa zastosowań to kable, gdzie wykorzystywane są nadprzewodniki w postaci przewodów oraz podstawowa ich właściwość: zerowa rezystywność. Stosuje się kable stałoprądowe jak i przemiennoprądowe [24] [25] [26].

Trzecia grupa zastosowań dotyczy kształtek z nadprzewodników wysokotemperaturowych i wykorzystywane są podstawowe właściwości nadprzewodników: zerowa rezystywność, doskonały diamagnetyzm i przejście nadprzewodzące. Są tu zarówno urządzenia stałoprądowe jak i przemiennoprądowe.

Tab. 3. Wybrane zastosowania nadprzewodników

grupa zastosowań	przykłady
uzwojenia nadprzewodnikowe	elektromagnesy laboratoryjne akceleratory cząstek elementarnych lewitacja magnetyczna separatory magnetyczne generatory silniki elektryczne transformatory magazynowanie energii – SMES-y synteza termojądrowa – stabilizowanie plazmy aparatura NMR aparatura MRI
kable	energetyczne komunikacyjne
kształtki nadprzewodnikowe	nadprzewodnikowe ograniczniki prądu przepusty prądowe łożyska magnetyczne magnesy stałe [27][28] ekranowanie magnetyczne
Elektronika i metrologia	metrologia (SQUID) mikrofalowe filtry pasmowe kriotrony układy SFQ miksery SIS pamięci nadprzewodnikowe

Czwarta grupa dotyczy zastosowań nadprzewodników w elektronice i metrologii. Nadprzewodniki mogą występować tutaj w postaci kształtek oraz przewodów. W tej grupie zastosowań wykorzystywane są stałprądowe i przemiennoprądowe zjawiska Josephaona oraz podstawowe właści-

wości nadprzewodników: zerowa rezystywność, doskonały diamagnetyzm, przejście nadprzewodzące. W tej grupie są zarówno urządzenia stałoprądowe jak i przemiennoprądowe o częstotliwościach rzędu gigaherców.

Urządzenia nadprzewodnikowe są wykorzystywane pojedynczo jak to ma miejsce w przypadku aparatury NMR (nuclear magnetic resonance) i aparatury MRI (magnetic resonance imaging) [29][30][9] oraz separatorów magnetycznych z elektromagnesami nadprzewodnikowymi. Zarówno aparatura NMR i MRI jak i separatory magnetyczne są jednymi z pierwszych komercyjnych zastosowań nadprzewodnictwa w dużych urządzeniach.

Urządzenia nadprzewodnikowe są wykorzystywane również w całych systemach współpracujących z sobą urządzeń nadprzewodnikowych różnych typów czy tego samego typu oraz w systemach, w których urządzenia nadprzewodnikowe współpracują z urządzeniami konwencjonalnymi. Jednym z systemowych zastosowań nadprzewodników jest elektroenergetyka [31] [32] [33] [34] gdzie urządzeniami nadprzewodnikowymi mogą być: generatory, kable, transformatory [35] [36] [37] [38] [39] [40], SMES-y (Superconducting Magnetic Energy Storage) [41] [42] [43] [44] [45] [46] [47], koła zamachowe na nadprzewodnikowych łożyskach magnetycznych [48], ograniczniki prądów zwarciovych. Zastosowanie urządzeń nadprzewodnikowych w energetyce pozwala na: lepsze wykorzystanie energii przez ograniczenie strat, zmniejszenie rozmiarów i masy urządzeń dzięki większej roboczej gęstości prądu, ograniczenie prądów zwarciovych w systemie, zwiększenie możliwości przesyłowych, zmniejszenie zagrożeń dla środowiska naturalnego przez mniejsze straty energii oraz wyeliminowanie oleju w kablach i transformatorkach.

Innym systemowym zastosowaniem urządzeń nadprzewodnikowych jest transport lotniczy i morski, gdzie znajdują zastosowanie generatory i silniki nadprzewodnikowe [49] [34] [50]. W marynarce wojennej i powietrznych siłach zbrojnych oprócz silników i generatorów znalazły zastosowanie również SMES-y [51]. Innym systemowym zastosowaniem urządzeń nadprzewodnikowych są laboratoria badawcze fizyki cząstek elementarnych. Całe zespoły elektromagnesów nadprzewodnikowych różnej konfiguracji pracują w systemach akceleratorów cząstek i systemach syntezy termojądrowej [52] [53][54][55][26]. W laboratoriach badawczych wykorzystywane są również systemy SMES-ów do zasilania impulsowego synchrotronów [56].

Wśród urządzeń nadprzewodnikowych są urządzenia stałoprądowe oraz przemiennoprądowe, z ruchomymi częściami i statyczne. Zjawiska w nich zachodzące są różnej natury: termiczne, elektryczne, magnetyczne

(w środowiskach liniowych i nieliniowych). Praca urządzeń nadprzewodnikowych może być związana również z dynamiką i zderzeniami cząstek naładowanych i nienaładowanych, z hydrodynamiką roztworów i zawiesin, z naprężeniami mechanicznymi i z innymi zjawiskami. Każde urządzenie wymaga indywidualnego podejścia przy tworzeniu jego modelu numerycznego uwzględniającego jego specyfikę pracy, budowę i zjawiska decydujące o jego działaniu.

1.4. Specyfika modelowania urządzeń nadprzewodnikowych

Modele numeryczne urządzeń nadprzewodnikowych tworzone są w celu:

- ograniczenia bardzo kosztownych badań eksperymentalnych,
- stworzenia tanich i prostych narzędzi wspomagających projektowanie urządzeń nadprzewodnikowych,
- badania numerycznego urządzeń nadprzewodnikowych – analizy wpływu różnych parametrów na pracę urządzenia.

Badania urządzeń nadprzewodnikowych są kosztowne. Wpływają na to wysokie koszty materiałów nadprzewodnikowych i koszty związane z zapewnieniem odpowiednio niskiej temperatury badanych urządzeń. Są to koszty związane z izolacją termiczną czyli koszt kriosztatu oraz koszty związane z chłodzeniem kriogenicznym. Jeżeli stosuje się najtańszą i najprostszą technikę chłodzenia – chłodzenie w kąpeli, oprócz wysokich kosztów dochodzi jeszcze długi czas na przygotowanie eksperymentu związany ze złożoną budową kriosztatów badawczych, z wielodniowym odpompowywaniem izolacji próżniowej kriosztatów, transportem zbiorników (dewarów) do skraplarni i cieczy kriogenicznych do użytkownika. Z wieloletniego doświadczenia autora w badaniach urządzeń LTS wynika że czas od przygotowania urządzenia do wykonania eksperymentów waha się od 2 tygodni do miesiąca. Po rozpoczęciu schładzania przy użyciu ciekłego helu, jeżeli stosowane są niskotemperaturowe połączenia próżniowe, często mogą wystąpić problemy z próżnią w izolacji termicznej kriosztatów i konieczność przerwania badań. Czas na ponowne ogrzanie urządzenia, rozebranie kriosztatu, naprawę niskotemperaturowych połączeń próżniowych, ponowne odpompowanie izolacji próżniowej jest na tyle długi, że nawet jeżeli w dewarach helowych po przerwaniu eksperymentu pozostała jeszcze wystarczająca ilość ciekłego helu na powtórzenie badań, to zdąży on odparować z dewara podczas wielodniowych prac montażowych w kriosztacie. Tak więc do następnego eksperymentu należy zamówić nową porcję cieczy kriogenicznych mając świadomość, że pie-

niądze wydane na poprzednią porcję w pełnym tego słowa znaczeniu „wyparowały”. Te problemy dotyczą tylko nowych urządzeń i kriostatów badawczych z rozbieralnymi połączeniami niskotemperaturowymi. W przebadanych gotowych urządzeniach nadprzewodnikowych stosuje się specjalizowane kriostaty nierozbieralne, dużo tańsze i niezawodne w porównaniu z kriostatami badawczymi, a pracujące urządzenia nadprzewodnikowe można długotrwale utrzymywać w temperaturach kriogenicznych uzupełniając czynniki chłodzące.

Zarówno wysokie koszty badań eksperymentalnych jak i czasochłonność przygotowań do badań urządzeń nadprzewodnikowych zachęcają do poszukiwania innych metod badawczych tych urządzeń. Modele numeryczne i matematyczne zweryfikowane wynikami badań eksperymentalnych pozwalają na kompleksowe badanie urządzeń nadprzewodnikowych oraz analizę jakościową i ilościową zjawisk zachodzących w urządzeniach nadprzewodnikowych. Analizować i badać można wzajemne wpływy parametrów i wielkości fizycznych, których pomiar byłby trudny czy wręcz niemożliwy. Zmiana geometrii urządzeń w modelach numerycznych nie pociąga za sobą wysokich kosztów związanych z budową modeli fizycznych urządzeń nadprzewodnikowych i kriostatów badawczych dla tych urządzeń.

Materiały nadprzewodnikowe w urządzeniach elektrycznych mogą znajdować się w stanie nadprzewodzącym albo w stanie rezystywnym. Podczas przechodzenia z jednego stanu do drugiego materiały te zmieniają swoje właściwości elektryczne i magnetyczne niemal skokowo. Wartości podstawowych parametrów charakteryzujących materiały nadprzewodnikowe, czyli rezystywności i przenikalności magnetycznej są funkcjami trzech parametrów: temperatury, gęstości prądu i natężenia pola magnetycznego. Uwzględnienie zależności rezystywności i przenikalności magnetycznej nadprzewodnika od temperatury w narzędziowych programach polowo-obwodowych nie stanowi problemu, natomiast uzależnienie tych parametrów od gęstości prądu, natężenia pola i temperatury łącznie jest bezpośrednio niemożliwe. W programach polowych rozwiązywane są zjawiska jednej natury z jedną zmienną podstawową. Dwie zmienne: podstawowa i pomocnicza występują w zagadnieniach sprzężonych. Zazwyczaj są to zjawiska elektromagnetyczne sprzężone ze zjawiskami cieplnymi. Zarówno gęstość prądu jak i natężenia pola magnetycznego nie występują jednak jako zmienne podstawowe czy pomocnicze w programach polowo-obwodowych. Należy więc poszukiwać pośrednich sposobów uzależnienia rezystywności i przenikalności magnetycznej od temperatury, gęstości prądu oraz natężenia pola magnetycznego. Ten fakt jak i niemal skokowa

zmiana wartości niektórych parametrów są podstawowymi przyczynami trudności w modelowaniu urządzeń nadprzewodnikowych. Poza tym kształty standardowych charakterystyk temperaturowych podstawowych parametrów urządzeń w programach polowych dostosowane są do typowych zmian w zakresie temperatur pokojowych i wyższych, i zwykle odbiegają znacznie od kształtów charakterystyk parametrów w temperaturach kriogenicznych. Takie skomplikowane przebiegi wymagają stosowania rozbudowanych procedur definiowania charakterystyk materiałów. Bardzo często przy modelowaniu urządzeń nadprzewodnikowych należy poszukiwać sposobów wykorzystania programu komercyjnego, które nie są opisane w dokumentacji i szukać możliwości ominięcia ograniczeń obliczeniowych programów. Dla przykładu, w programach tych zazwyczaj nie można zdefiniować, charakterystycznej dla nadprzewodników, zerowej rezystywności. Zerową rezystywność należy zastępować rezystywnością bardzo małą testując w obliczeniach kolejne coraz mniejsze wartości aż do wygenerowania błędu „dzielenia przez zero”.

Tworząc modele numeryczne urządzeń nadprzewodnikowych można zastosować metodę rozdzielenia zjawisk decydujących o pracy urządzenia albo stanów pracy urządzenia. Dla przykładu pracę urządzenia nadprzewodnikowego wykorzystującego stałoprądowy elektromagnes nadprzewodnikowy można podzielić na trzy niezależne etapy i utworzyć trzy niezależne modele numeryczne. W pierwszym etapie pracy elektromagnes nadprzewodnikowy jest schładzany od temperatury pokojowej do kriogenicznej temperatury roboczej 4,2 K (ciekły hel) albo 77 K (ciekły azot) albo dowolnie innej w przypadku chłodzenia kriochłodziarką. W drugim etapie pracy w elektromagnesie jest zwiększany prąd od zera do prądu roboczego. W trzecim etapie prąd w elektromagnesie jest już ustalony oraz ustalona jest temperatura elementów nadprzewodnikowych. W drugim i trzecim etapie pracy urządzenia elementy nadprzewodnikowe znajdują się w stanie nadprzewodzącym. W pierwszym etapie pracy urządzenia decydują zjawiska cieplne – model termiczny. W drugim etapie pracy urządzenia decydują zjawiska cieplne i elektryczne – model sprzężony elektrotermiczny. W trzecim etapie pracy urządzenia decydują stałoprądowe zjawiska magnetyczne – model magnetostatyczny i zjawiska zachodzące w przestrzeni roboczej urządzenia nadprzewodnikowego (bardzo często innej natury niż magnetostatyczne).

W większości urządzeń wszystkie ich elementy nadprzewodnikowe pracują w stanie nadprzewodzącym. Punkt pracy urządzenia ustalany jest dla warunków panujących w „najślabszym” elemencie urządzenia, w którym punkt pracy wyznaczony przez temperaturę, indukcję magnetyczną

oraz gęstość prądu jest najbardziej zbliżony do powierzchni krytycznej nadprzewodnika. W większości urządzeń nadprzewodnikowych, po schłodzeniu ich do temperatury roboczej, punkt pracy jest ustalony, a cała nadprzewodnikowa część urządzenia ma taką samą lub zbliżoną temperaturę. Wyjątkiem są nadprzewodnikowe krioprzepusty prądowe. W przypadku krioprzepustów wysokotemperaturowych cała nadprzewodnikowa część krioprzepustu znajduje się w stanie nadprzewodzącym, pomimo, że końce krioprzepustu przy chłodzeniu np. kontaktowym przy wykorzystaniu kriochłodziarki mogą mieć różne temperatury. W przypadku krioprzepustów miedziano-nadprzewodnikowych, temperatura zmienia się w zakresie kilkuset kelwinów wzdłuż przepustu. Część nadprzewodnika w krioprzepuscie znajduje się w stanie nadprzewodzącym, a pozostała część w stanie rezystywnym.

Nadprzewodnikowe ograniczniki prądu mają dwa punkty pracy, jeden znajduje się w stanie nadprzewodzącym, drugi w stanie rezystywnym. Istotą ich działania jest przechodzenie ze stany nadprzewodzącego do stanu rezystywnego i z powrotem. Podczas przejść, skokowo zmieniają się rezystywność oraz przenikalność magnetyczna elementów nadprzewodnikowych, co wykorzystywane jest do ograniczania prądu.

W komercyjnych programach polowych wykorzystujących metodę elementów skończonych (FEM) nie ma dostępu do kodu źródłowego. Użytkownik przygotowuje warunki do obliczeń definiując geometrię, właściwości obszarów i źródeł, warunki brzegowe i może po zakończeniu obliczeń przeanalizować wyniki obliczeń. Co się dzieje pomiędzy tymi fazami jest niewiadomą – moduł obliczeniowy można (należy) traktować jako tzw. „czarną skrzynkę”. Poszukując nietypowych, niekonwencjonalnych możliwości obliczeniowych programów, nie opisanych w dokumentacji, dużo czasu i uwagi trzeba poświęcić na sprawdzanie i testowanie działania programu oceniając jak program odpowiada na zmiany parametrów obliczeniowych. To pozwala na intuicyjne wykrycie błędów logicznych w opracowywanych modelach numerycznych. Jeżeli według wiedzy i doświadczenia twórcy, model numeryczny zaczyna działać poprawnie a zmiany parametrów obliczeniowych wywołują przewidziane zmiany jakościowe w wynikach obliczeń, można przystąpić do najważniejszego i najbardziej czasochłonnego etapu tworzenia modelu numerycznego – weryfikacji eksperymentalnej. Dokonać tego można, jeżeli jeszcze przed przystąpieniem do tworzenia modelu numerycznego określonego urządzenia nadprzewodnikowego zebrano wystarczającą liczbę wyników eksperymentalnych z pracy modelowanego urządzenia.

1.5. Cel i teza

W pracy zaprezentowane zostaną 3 typy modeli numerycznych urządzeń nadprzewodnikowych:

1. modele numeryczne utworzone w narzędziowym programie polowo-obwodowym FLUX2D,
2. hybrydowe modele numeryczne wykorzystujące autorskie programy do prowadzenia obliczeń i sterujące obliczeniami w narzędziowych programach polowymi FLUX2D i PC-OPERA,
3. jednolity autorski program obliczeniowy będący modelem numerycznym.

Warunkiem koniecznym możliwości korzystania z programów takich jak PC-OPERA i FLUX2D jest odpowiednia geometria modelowanego urządzenia. Urządzenie musi albo posiadać symetrię obrotową i wtedy geometrię trójwymiarową można zamodelować dwuwymiarowym przekrojem osiowym tego urządzenia albo urządzenie jest (lub można założyć, że jest) nieskończenie długie o stałym przekroju poprzecznym i wtedy jego trójwymiarową geometrię można zamodelować dwuwymiarowym przekrojem poprzecznym. Przedstawione w pracy modele numeryczne dotyczą urządzeń nadprzewodnikowych o symetrii obrotowej.

Najprostszym i najmniej czasochłonnym sposobem tworzenia modeli numerycznych urządzeń nadprzewodnikowych jest zaadaptowanie narzędziowych programów polowych przeznaczonych do modelowania podobnych urządzeń i zjawisk. Rzadko jednak udaje się opracować model numeryczny urządzenia nadprzewodnikowego wykorzystując tylko narzędziowy program polowy. Wtedy część obliczeń dokonywana jest w tym programie, a pozostałe w zewnętrznych programach autorskich. Istnieje również możliwość opracowania modelu numerycznego przy wykorzystaniu tylko programów autorskich. Ten ostatni sposób podejścia jest najbardziej czasochłonny, ale ma wiele zalet, przede wszystkim dostęp do kodu źródłowego całego modelu numerycznego. Kierując się względami czasochłonności należy tworzyć modele numeryczne w narzędziowych programach polowych. Jeżeli to nie jest możliwe – w maksymalnym stopniu korzystać z obliczeń w programach narzędziowych, tworząc modele hybrydowe, a dopiero po wyczerpaniu tych sposobów decydować się na opracowanie programów autorskich.

Tezę pracy można sformułować następująco:

Podstawowe właściwości nadprzewodników określone parametrami krytycznymi, gęstością prądu, indukcją magnetyczną i temperaturą, istotne w projektowaniu urządzeń nadprzewodnikowych i tworzeniu modeli numerycznych mogą być uwzględnione przez zaawansowane programowanie w PASCAL-u i C++ w połączeniu z FLUX2D i PC-OPERA oraz przez definiowanie właściwości fizycznych obszarów obliczeniowych i źródeł ciepła z wykorzystaniem programowanych w FORTRAN-ie tzw. procedur użytkownika programu FLUX2D.

Cel pracy:

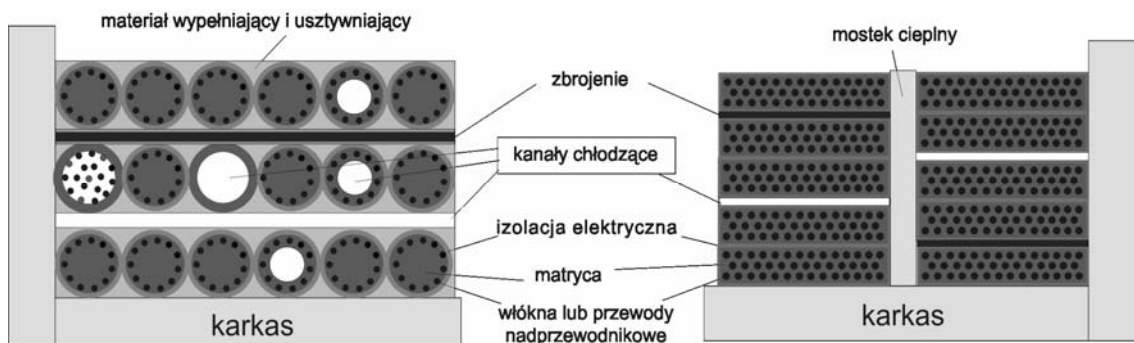
- Opracowanie podstaw modelowania numerycznego prostych i sprzężonych zjawisk cieplnych, elektrycznych, magnetostatycznych, magnetodynamicznych i hydrodynamicznych w urządzeniach nadprzewodnikowych.
- Przedstawienie numerycznych i matematycznych modeli polowych i polowo-obwodowych zjawisk zachodzących w krioprzepustach prądowych, nadprzewodnikowych separatorach magnetycznych, elektromagnesach nadprzewodnikowych separatorów i SMES-ów oraz nadprzewodnikowych ogranicznikach prądów zwarciovych.

2. ELEKTRYCZNE URZĄDZENIA NADPRZEWODNIKOWE

Przed zaprezentowaniem szczegółowych modeli numerycznych urządzeń nadprzewodnikowych omówione zostaną najistotniejsze zagadnienia związane z budową przewodów nadprzewodnikowych, chłodzeniem urządzeń [16][57][58] oraz konstrukcją uzwojeń nadprzewodnikowych w takim zakresie, w jakim są istotne z punktu widzenia modelowania numerycznego.

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 w nadprzewodnikach niskotemperaturowych i rzędu 60 T w nadprzewodnikach 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 ciepłą elementów nadprzewodnikowych.



Rys. 2.1. Fragmenty 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. 2.1. 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 zapętnienia uzwojenia λ_{sc} . Współczynnik λ_{sc} charakteryzujący, jaką część przekroju uzwojenia stanowi nadprzewodnik (jaką częścią uzwojenia płynie prąd w stanie nadprzewodzącym), jest stosunkiem sumarycznego pola powierzchni nadprzewodnika w przekroju uzwojenia do pola przekroju tego uzwojenia.

$$(2-1) \quad \lambda_{sc} = \frac{\sum S_{sc}}{S}$$

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

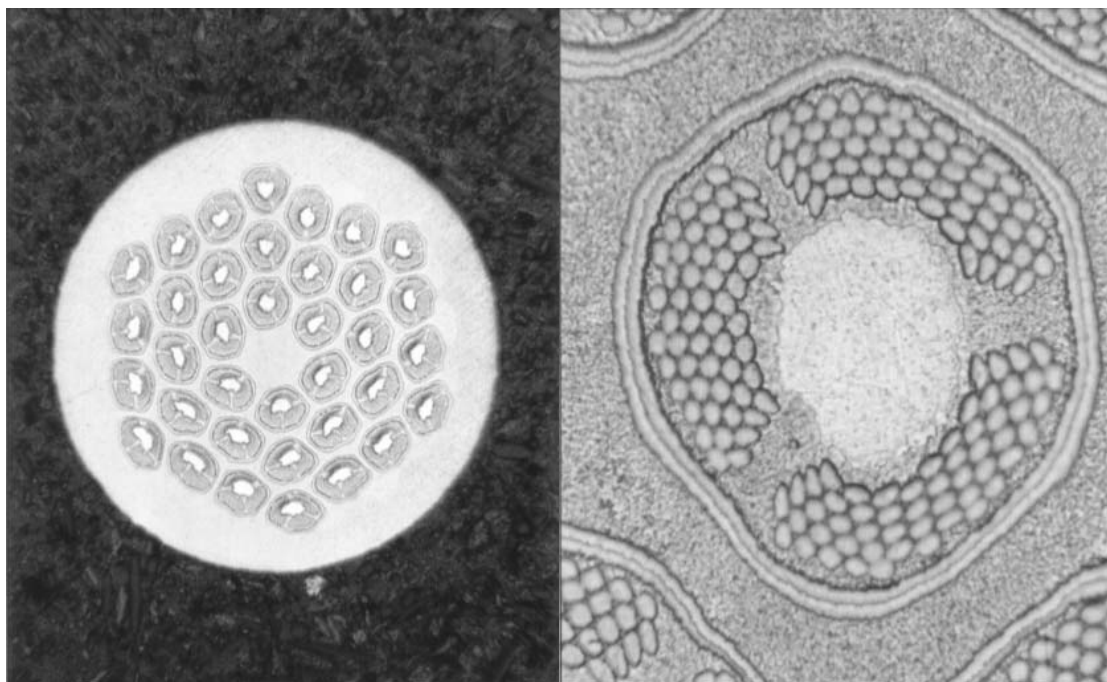
Na współczynnik zapętnienia uzwojenia λ_{sc} decydujący wpływ mają:

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

Współczynnik λ_{sc} pozwala uwzględnić w obliczeniach numerycznych wpływ budowy uzwojenia i przewodu nadprzewodnikowego na właściwości elektromagnetyczne i cieplne obszarów, w których występuje materiał nadprzewodnikowy. W obliczeniach magnetostatycznych i magneto-dynamicznych współczynnik λ_{sc} pozwala określić średnią gęstość prądu w obszarze obliczeniowym. W obliczeniach cieplnych i elektrotermicznych można, wykorzystując współczynnik λ_{sc} , zdefiniować rezystywność oraz przewodność cieplną i ciepło właściwe obszarów. Wartość współczynnika λ_{sc} zawiera się w przedziale od 0_+ do 1.

2.1. Przewody nawojowe oraz kształtki

Do budowy przewodów nadprzewodnikowych znalazły zastosowanie nadprzewodniki II rodzaju. Ze względu na konieczność zapewnienia stabilnej pracy i zminimalizowania strat ciepłych przewody nadprzewodnikowe mają złożoną budowę (rys. 2.2). 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. 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 wiązkach w celu zmniejszenia strat ciepłych 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.



a) b)
Rys. 2.2. a) Przewód o średnicy 0,78 mm z 6048 włóknami Nb_3Sn w 36 wiązkach
b) Powiększenie jednej wiązki [59]

Przewód nadprzewodnikowy charakteryzują następujące parametry:
– charakterystyka krytyczna przewodu,

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

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

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:

$$(2-3) \quad \lambda_{sc \max} = \frac{1}{1 + C_{sc}}$$

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

$$(2-4) \quad \lambda_{sc \max} = \frac{\pi}{4(1 + C_{sc})}$$

Zależności (2-3) i (2-4) 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 krytycznie przewodów w postaci tabeli 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 krytycznie 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).

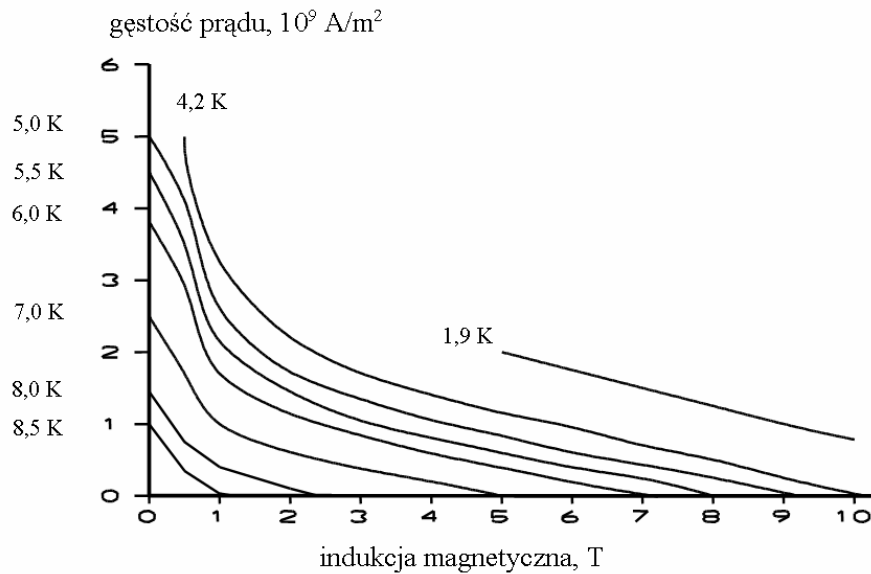
W przewodach nadprzewodnikowych stosowana może być stabilizacja od przeskoków strumienia lub stabilizacja kriogeniczna [60] [61]. Przewody stabilizowane tylko od przeskoków strumienia stosowane są w mniejszych urządzeniach, gdzie uzwojenie zajmuje duży procent objętości systemu, więc pożądana jest wysoka 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. Należy więc zabezpieczyć uzwojenie przed dużymi zakłóceniami mechanicznymi np. przez usztywnienie żywicą epoksydową. W dużych elektromagnesach przeznaczonych do wytwarzania stałych pól magnetycznych w dużych przestrzeniach roboczych nie jest wymagana duża gęstość prądu i celowe jest stosowanie w nich przewodów ze stabilizacją kriogeniczną. W takich elektromagnesach grubości uzwojeń nawet nawiniętych przewodem stabilizowanym kriogenicznie są małe w porównaniu z innymi wymiarami i w nieznacznym tylko stopniu wpływają na gabaryty urządzenia.

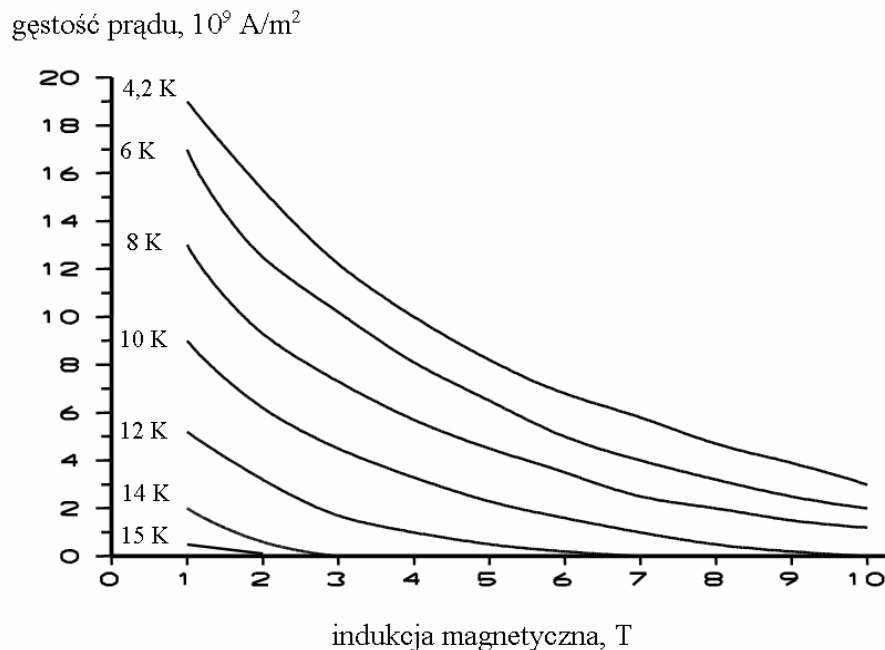
Najbardziej rozpowszechnionymi materiałami nadprzewodnikowymi wykorzystywanymi do produkcji przewodów są: stop Nb-Ti, związki międzymetaliczne Nb_3Sn , Nb_3Al i V_3Ga oraz ceramiki Bi-2212, Bi-2223 i Y-123. Ostatnio (2004) pojawiły się na rynku również przewody z MgB_2 . Przewody z Nb-Ti stosowane są 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 $Nb_3(Al,Ge)$ [9]. Przewody z Bi-2212, Bi-2223 i Y-123 stosowane są do budowy uzwojeń nadprzewodnikowych pracujących w temperaturze 77 K i mniejszej. Charakterystyki krytyczne $J_c=f(B)_T$ nadprzewodników Nb-Ti, Nb_3Sn , Bi-2212 i Bi-2223 przedstawiają rysunki 2.3-2.6. 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 $J_c=f(B)_T$.

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 $7,5 \cdot 10^6$ A/m² 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/m². Obniżenie temperatury do 4,2 K podwyższa gęstość prądu krytycznego tego nad-

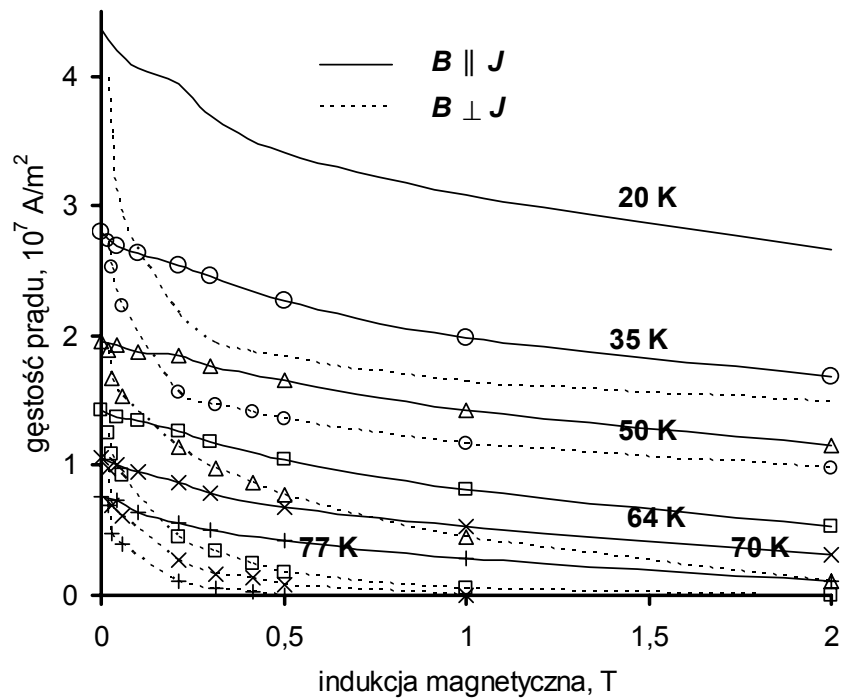
przewodnika ponad 7,5-krotnie. Tak więc parametry krytyczne nadprzewodników wysokotemperaturowych poprawiają się znacznie wraz z obniżeniem temperatury ich pracy. Z tego powodu temperatura pracy urządzeń HTS obniżana jest często z 77 K do poziomu 30-40 K a nawet niższej. Uzwojenia z przewodów HTS stosowane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



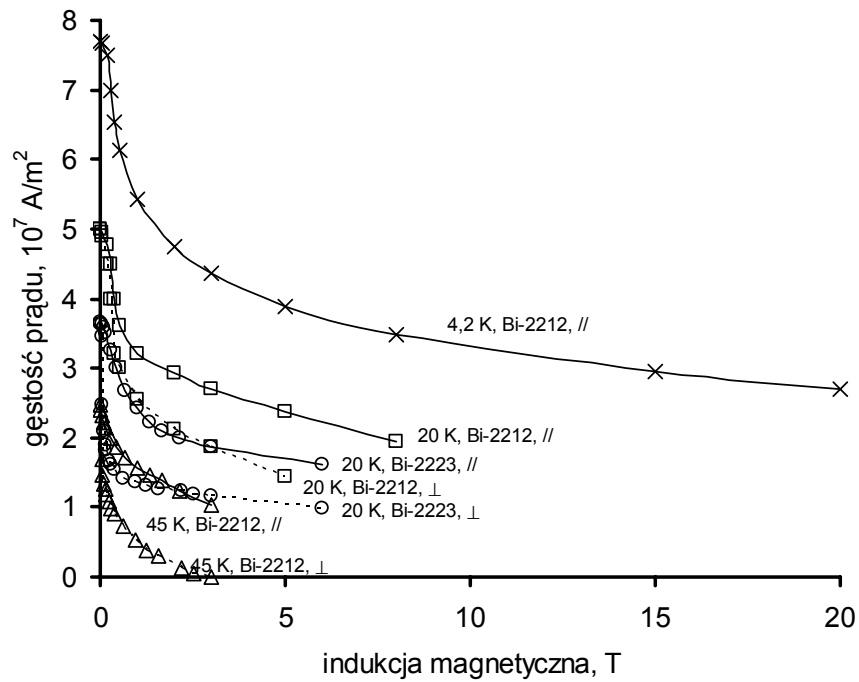
Rys. 2.3. Charakterystyki krytyczne Nb-Ti [17][61]



Rys. 2.4. Charakterystyki krytyczne Nb₃Sn [17][61]



Rys. 2.5. Charakterystyki krytyczne Bi-2223 w różnych temperaturach i dla różnych kierunków indukcji magnetycznej [21]

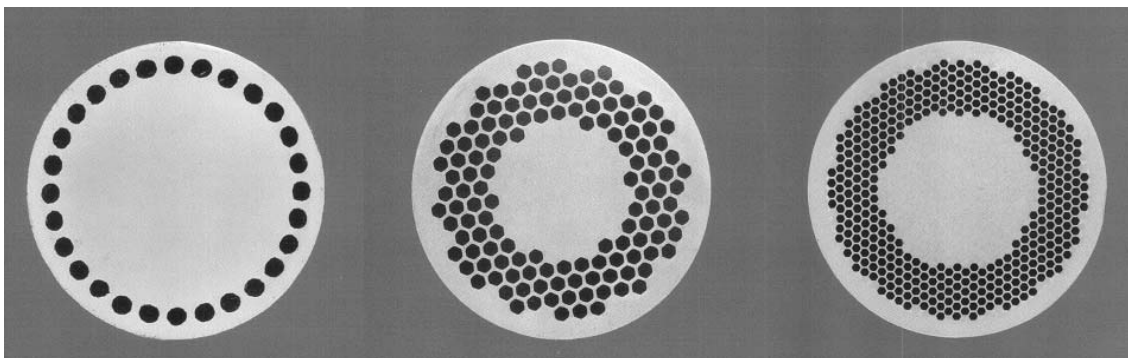


Rys. 2.6. Charakterystyki krytyczne Bi-2212 i Bi-2223 w różnych temperaturach i dla różnych kierunków indukcji magnetycznej [62][63]

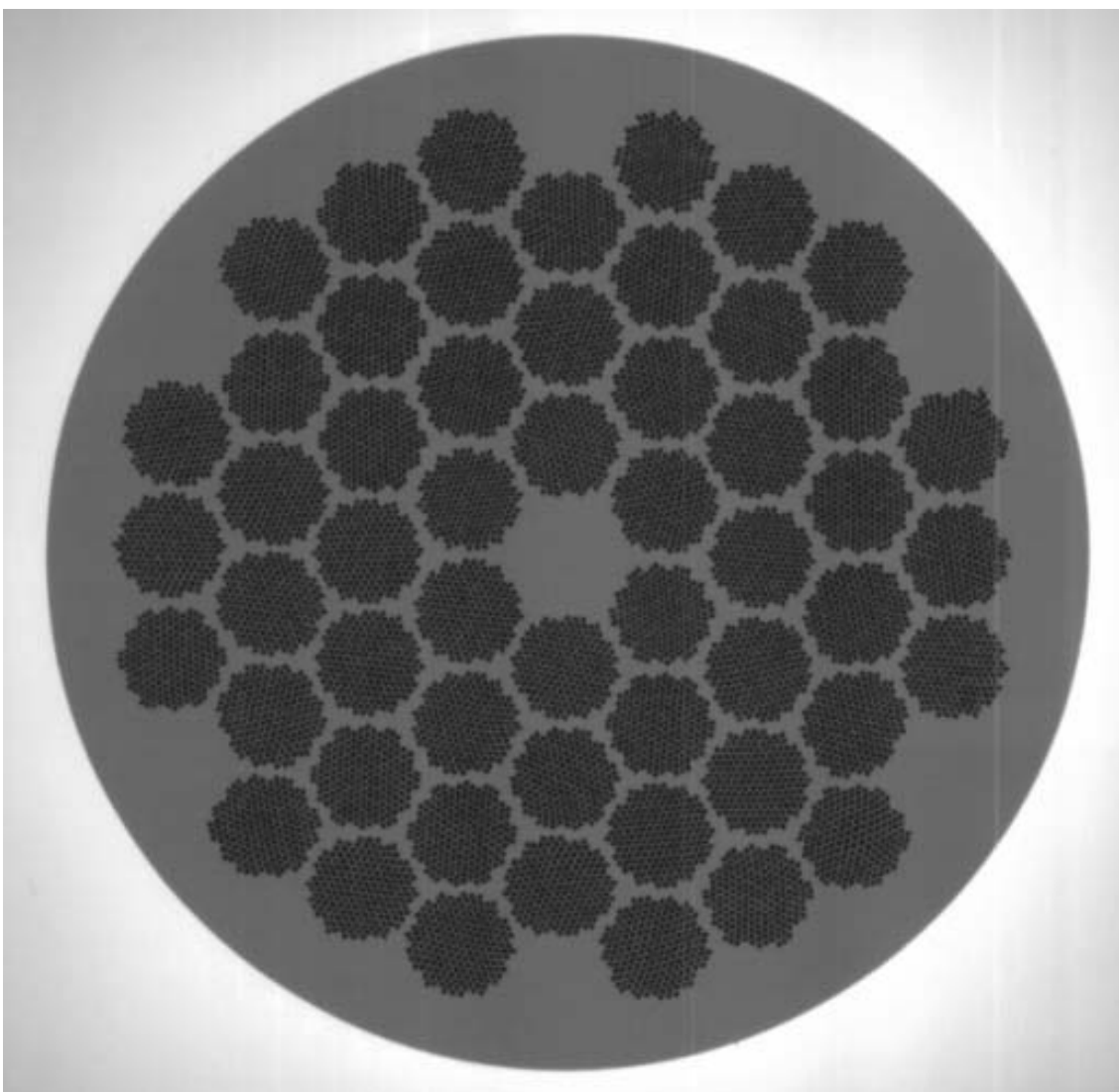
W uzwojeniach małych urządzeń LTS o energii mniejszej od 100 kJ stosowane są przewody o przekroju kołowym o współczynniku C_{sc} od 1 do 2 [16] [61]. W urządzeniach LTS o energii od 100 kJ do 1 MJ stosowane są zarówno przewody o przekroju kołowym jak i prostokątnym o współczynniku C_{sc} powyżej 2. W 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} .

2.1.1. 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. 2.7 pokazuje przekroje prostych przewodów wielowłóknowych z Nb-Ti z różnie rozmieszczonymi włóknami nadprzewodnikowymi. Widać, że już na poziomie prostego przewodu wielowłókowego rozkład nadprzewodnika i w konsekwencji prądu w przekroju przewodu nie jest równomierny. Proste przewody wielowłókowe mogą być wykorzystywane samodzielnie albo być elementami wiązek przewodów złożonych. Rys. 2.8 pokazuje przekrój złożonego przewodu nadprzewodnikowego z Nb-Ti, który ma 54 grupy wiązek po 187 prostych przewodów wielowłókowych, takich jak np. na rys. 2.7. Metrykę przewodu LTS z którego został nawinięty elektromagnes II (tab. 16) przedstawia rys. 2.9. Metryka zawiera takie dane jak: średnica przewodu, producent, 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. 2.7. Przekroje prostych przewodów wielowłóknowych z Nb-Ti z różnie rozmieszczonymi włóknami nadprzewodnikowymi [59]



Rys. 2.8. Przekrój złożonego przewodu nadprzewodnikowego z Nb-Ti, który ma 54 grupy wiązek po 187 prostych przewodów wielowłóknowych [59]

W tab. 4 przedstawione są parametry wybranych przewodów Nb-Ti produkowanych przez Vacuumschmelze. Wartości współczynników C_{sc} tych przewodów zawarte są w przedziale od 1,4 do 15. Charakterystyki krytyczne przewodów z tab. 4 zamieszczone są w tab. 5.

DA 0,444 mm ϕ - 0,452 mm ϕ

8572.11

VAC
VACUUMSCHMELZE GMBH
645 HANAU

Spule *14443*

Typ *T54-1,35/0,4 TV*

Isolation *Typ W DIN*

Länge *10.000 m*

SPR */*

Unterschrift *Reppel*

μ H (T)	H (kOe)	I_c (A)	
		innen	außen
8	80	50	50
7	70	78	77
6	60	105	103
5	50	128	127
4	40	152	149
3	30	176	173
			<i>1 μV/cm</i>

Rys. 2.9. Metryka przewodu T54-1,35/0,4 TV⁵ z nadprzewodnika Nb-Ti

⁵ Pracownia Technologii Nadprzewodnikowych w Lublinie (IEI)

Tab. 4. Wybrane przewody kołowe i prostokątne z Nb-Ti (Vacuumschmelz)

typ	C_{sc}	$\Phi_{przew.}$	liczba włókien	Φ_{wl}	masa
		lub (szer. x grub.)			(1 km)
		mm, lub (mm x mm)			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) ⁵	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. 5. Charakterystyki krytyczne przewodów z tab. 4 w temperaturze 4,2 K

typ	3 T	4 T	5 T	6 T	7 T	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 Nb₃Sn wytwarzane są podobnie jak przewody Nb-Ti w procesie rurowym. W przeciwieństwie do przewodów Nb-Ti podczas produkcji przewodów Nb₃Sn nie poddaje się obróbce mechanicznej gotowego nadprzewodnika, który jest kruchy, lecz jego składniki. Może być stosowana tutaj metoda „brązu”, w której pręty z Nb

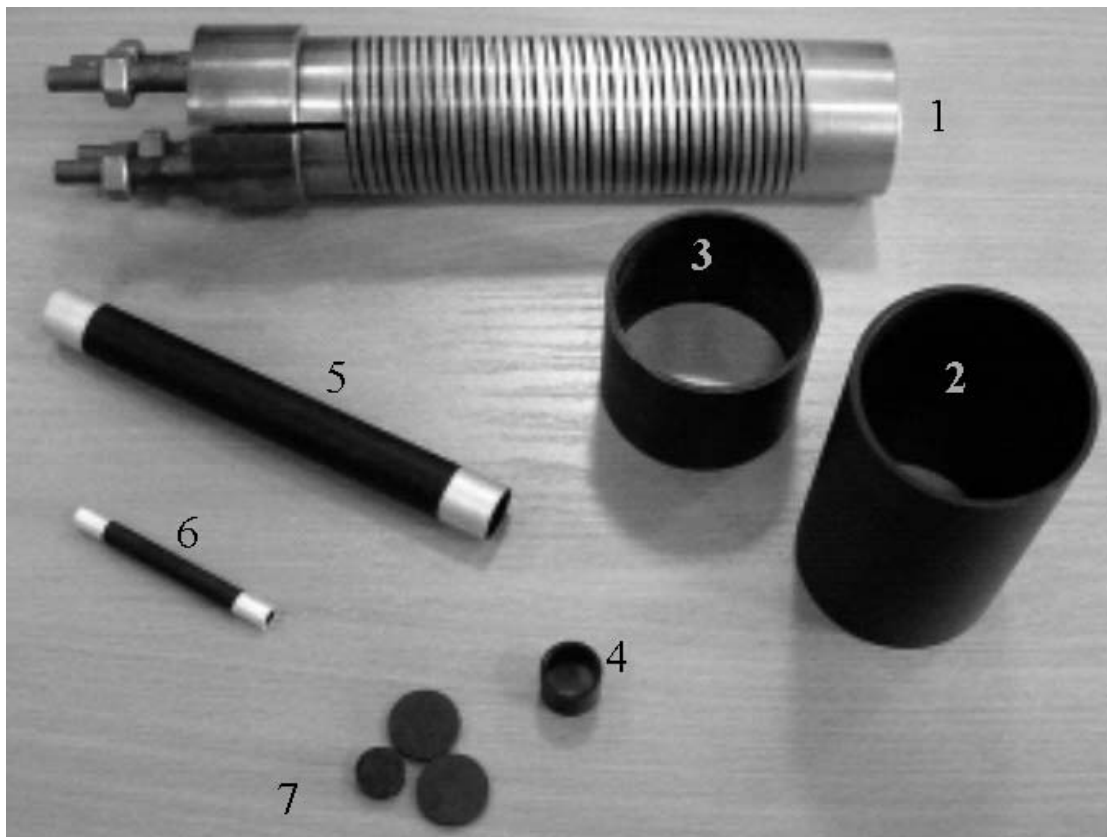
Tab. 6. Charakterystyki krytyczne przewodów kołowych Nb₃Sn VACRYFLUX⁶ w temperaturze 4,2 K

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

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 Nb₃Sn. Zamiast prętów Nb stosowane mogą być pręty Nb-Ta. Podczas wykonywania urządzeń z nadprzewodników Nb₃Sn można stosować technikę nawinięcia-przereagowania lub przereagowania-nawinięcia. W pierwszej technice, urządzenie nawijane jest półproduktem przewodu Nb₃Sn, 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

⁶ materiał wyjściowy – włókna Nb lub Nb-Ta w matrycy Cu-Sn

(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 $700\text{ }^\circ\text{C}$ przez 40-140 godzin. Podczas obróbki termicznej cyna z brązu dyfunduje do włókien z niobu i tworzy związek międzymetaliczny Nb_3Sn . W tab. 6 zamieszczone są wybrane parametry i charakterystyki krytyczne przewodów Nb_3Sn VACRYFLUX.



Rys. 2.10. Wybrane kształtki HTS Pracowni Technologii Nadprzewodnikowych w Lublinie: 1 – stos Bi-2212 (rys. 2.11), 2 – cylinder CST-60/100.2 z Bi-2223 (tab. 8), 3 – cylinder CST-60/50.2 z Bi-2223 (tab. 8), 4 – cylinder CST-15/15.2 z Bi-2223 (tab.8), 5 – przepust prądowy CSL-18/160.2 z Bi-2223 (tab. 7), 6 – przepust prądowy CSL-7/70.1 z Bi-2223 (tab. 7), 7 – lewitatory z Y-123 (tab. 9)

2.1.2. Kształtki HTS – Bi-2212, Bi-2223, Y-123

Wykonanie przewodów nadprzewodnikowych z ceramiek HTS stwarzało pewne problemy, więc początkowo poszukiwano takich zastosowań tych nadprzewodników, gdzie element nadprzewodnikowy występuje

w zwartym, sztywnym kawałku. Nadprzewodniki w postaci cylindrów wykorzystywane są w nadprzewodnikowych ogranicznikach prądu typu indukcyjnego. Nadprzewodniki w postaci rur stosowane są w wysokotemperaturowych krioprzepustach prądowych oraz nadprzewodnikowych ogranicznikach prądu typu rezystancyjnego. Nadprzewodniki o bardziej skomplikowanych kształtach stosowane są w silnikach elektrycznych [64] i w lewitacji magnetycznej. W ogranicznikach [65], krioprzepustach, silnikach i lewitatorach wykorzystywane są nadprzewodniki Bi-2223, Bi-2212 oraz Y-123.

Tab. 7. Parametry wybranych rur Bi-2223 ze stykami Ag (CAN Superconductors) [66]

typ	ϕ_{zew}	długość /styk Ag	przekrój	I_c (77 K, pole własne)	dopływ ciepła ⁷ 77 K – 4 K	dopływ ciepła ⁷ 64 K – 4 K
	mm	mm	mm ²	A	W	W
CSL-7/70.1 ⁸	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-10/80.2	9,6	80/10	22	170	0,1	0,07
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 ⁸	18	160/15	78	450	0,15	0,11
CSL-26/120.3	26	120/20	180	1500	0,6	0,4

W tab. 7 przedstawione są parametry rur z Bi-2223 ze stykami Ag, które wykorzystywane są w nadprzewodnikowych przepustach prądowych. Rura CSL-18/160.2 wykorzystywana była również jako uzwojenie wtórne nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu indukcyjnego z otwartym rdzeniem magnetycznym [65]. W tab. 8 przedstawiono parametry wybranych cylindrów z Bi-2223, które mogą być wykorzystane w nadprzewodnikowych ogranicznikach prądu [65].

CAN Superconductors [66] specjalizuje się w kształtkach z Bi-2223, oferuje również małe elementy z Y-123 (tab. 9). Nexans [62] specjalizuje się w kształtkach z Bi-2212. W tab. 10 i tab. 11 przedstawione są para-

⁷ dopływ ciepła na drodze przewodnictwa przez parę przepustów

⁸ rys. 2.10

metry wybranych prętów i cylindrów z Bi-2212 oferowanych przez Nexans. 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 dotyczyć pojedynczej kształtki lub pary elementów HTS.

Tab. 8. Parametry wybranych cylindrów z Bi-2223 (CAN Superconductors) [66]

typ	$\phi_{\text{wew.}}$	długość	grubość ścianki	J_c (77 K, pole własne)
	mm	mm	mm	A/cm ²
CST-10/10.2	10	10	1	>500
CST-15/15.2	15	15	1,5	>500
CST-21/120.3	21	120	2,5	>800
CST-33/48.3	33	48	2,5	>800
CST-34/70.3	34	70	2	>800
⁹ CST-60/50.2 ¹¹	60	50	2,5	>500
CST-60/100.1	60	100	2,5	>300
CST-60/100.2 ¹¹	60	100	2,5	>500
CST-60/100.3	60	100	2,5	>800

Tab. 9. Elementy lewitatorów magnetycznych z Y-123 (CAN Superconductors) [66]

typ	ϕ	wysokość	siła unoszenia ¹⁰
	mm	mm	N
CSYL-14	14	6	20
CSYL-21	21	8	40
CSYL-25	28	9	60
CSYL-28 ¹¹	28	10	70
CSYL-35 ¹¹	35	12	100
CSYL-44 ¹¹	44	14	150
CSYL-50	50	16	200

⁹ powstał na zamówienie przez rozcięcie CST-60/100.2 (u producenta)

¹⁰ siła mierzona nad stałym magnezem NdFeB o średnicy 15 mm, wysokości 15 - 30 mm i indukcji na powierzchni 0,5 T, ekstrapolowana do zerowej odległości

¹¹ Pracownia Technologii Nadprzewodnikowych w Lublinie (IEI), rys. 2.10

Tab. 10. Parametry prętów z Bi-2212 (Nexans) [62]

ϕ	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

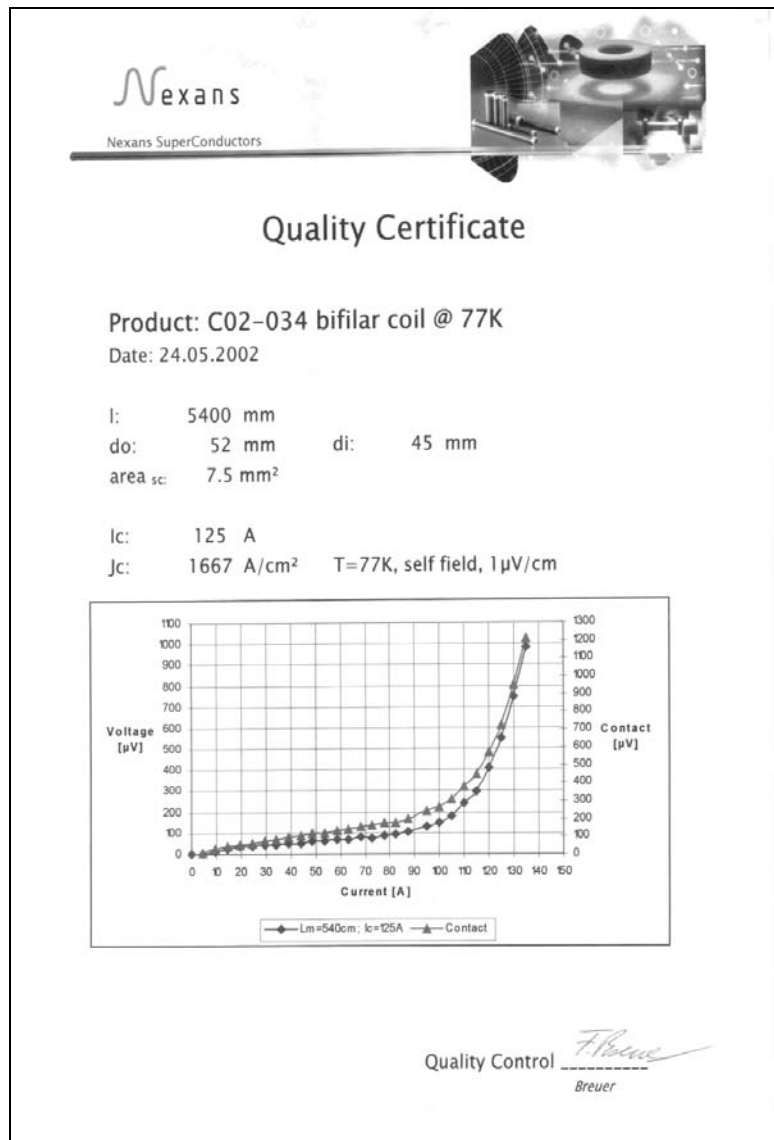
Tab. 11. Parametry cylindrów z Bi-2212 ze stykami Ag lub bez styków (Nexans) [62]

ϕ	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

Certyfikat dołączony do stosu z Bi-2212, o symbolu – C02-34-bifilar coil, będącego elementem nadprzewodnikowym rezystancyjnego ogranicznika prądu przedstawia rys. 2.11. Stos Bi-2212 wykonany jest w postaci uzwojenia bifilarnego przez odpowiednie mechaniczne nacięcie rury z Bi-2212. W zależności od szerokości nacięcia można zmieniać prąd krytyczny ogranicznika i rezystancję stosu w stanie rezystywnym. Prąd znamionowy stosu C02-34 wynosi 50 A, $I_c = 125$ A, rezystancja w stanie rezystywnym w temperaturze 77 K wynosi 0,875 Ω .

¹² dopływ ciepła na drodze przewodnictwa dla pręta o dł. 120 mm

¹³ dla najdłuższej rury



Rys. 2.11. Certyfikat dostarczony przez producenta ze stosem C02-034 bifilar coil ¹⁴

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

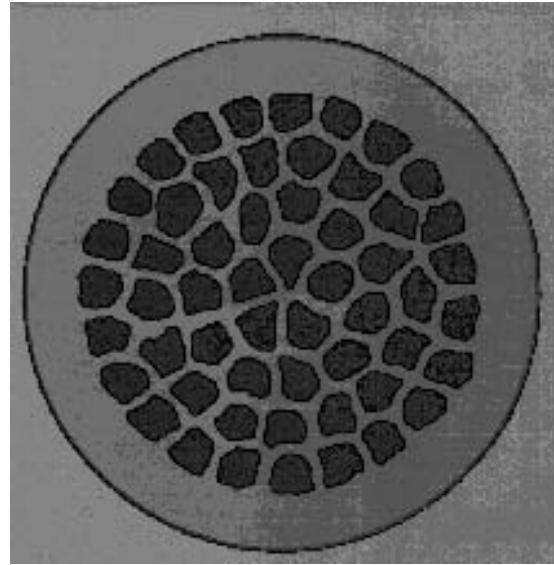
Opracowanie technologii produkcji przewodów ze stopów LTS zajęło, od odkrycia zjawiska nadprzewodnictwa, kilkadziesiąt lat. Opracowanie technologii produkcji przewodów z ceramik HTS zajęło tylko kilka lat od odkrycia materiałów HTS. Przewody z nadprzewodników HTS produkowane są głównie dwoma metodami [65].

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

¹⁴ Pracownia Technologii Nadprzewodnikowych w Lublinie (IEI)

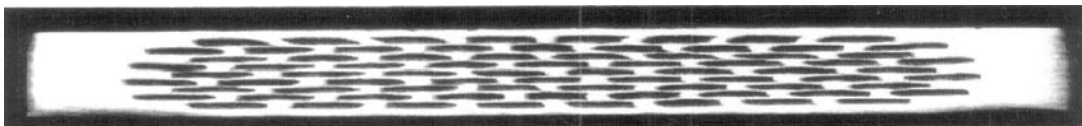


Rys. 2.12. Przekrój wiązki rur Ag ze sproszkowanym prekursorem materiału HTS umieszczonych w większej rurze Ag po wstępnym przeciągnięciu



Rys. 2.13. Przekrój 57-włóknowego przewodu (proces rurowo-proszkowy) z nadprzewodnika Bi-2223 w matrycy Ag-Au [59]

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 obrobionych rur z proszkiem umieszczane są w rurze ze srebra i poddawane dalszemu przeciągnięciu (rys. 2.12) 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 bez-tlenowej, 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. 2.13. Przewód przeznaczony jest do zastosowania w krioprzepustach prądowych.



Rys. 2.14. Przekrój 76-włóknowej taśmy z nadprzewodnika Bi-2212/Ag [62]

Przekrój 76-włóknowej taśmy z nadprzewodnika Bi-2212 w matrycy ze srebra wykonanej w procesie rurowo-proszkowym i po spłaszczeniu poddanej obróbce termicznej przedstawia rys. 2.14. W tab. 12, tab. 13 oraz tab.

14 przedstawione są parametry taśm HTS które mają budowę zbliżoną do przedstawionej na rys. 2.14.

Tab. 12. Parametry przewodów z Bi-2223/Ag (American Superconductor) [21]

typ	grub.	szer.	napręż. maks. ¹⁵	odksz. maks. ¹⁵	średnica gięcia min. ¹⁵	I_c (77 K, pole własne) (kryterium 1 $\mu\text{V}/\text{cm}$)
	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	¹⁶ 115
						125
						135
hermetyczne (30 atm. $\text{IH}_2/16$ h) 100, 200, 300 m	0,32	4,8	265	0,4	70	115
						125
						135

Tab. 13. Parametry przewodów z Bi-2212 w matrycy Ag (NEXANS) [62]

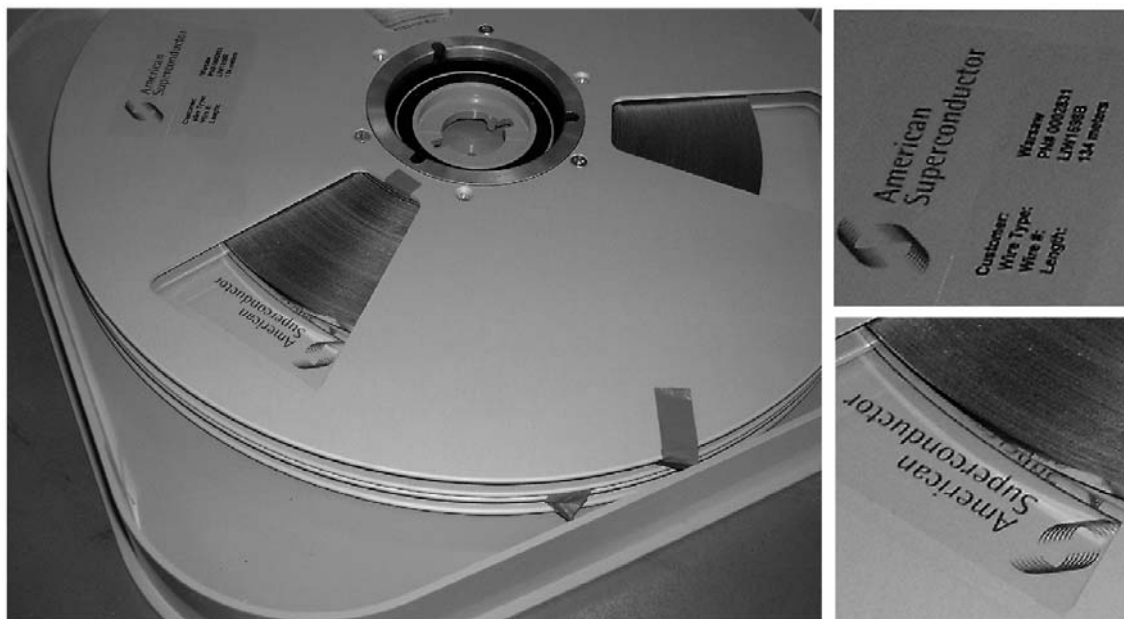
grub.	szer.	I_c (4,2 K, pole własne) (kryterium 1 $\mu\text{V}/\text{cm}$)	naprężenie maks. (300 K) ¹⁵	odkształcenie maks. ¹⁵	naprężenie maks. (77 K) ¹⁵
mm	mm	A	N	%	N
0,25	3,1	300	30	0,06	47
0,35	2,6	320	36	0,06	55
0,35	4,4	530	60	0,06	94

W tab. 12 zamieszczone są parametry przewodów oferowanych przez American Superconductor [21]. Przewody mogą być dostarczane na szpulach pokazanych na rys. 2.15, 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. 12 zamieszczone są wymiary, prądy krytyczne, maksymalne wartości naprężeń i odkształceń

¹⁵ 95 % I_c

¹⁶ rys. 2.15, Pracownia Technologii Nadprzewodnikowych w Lublinie (IEI)

mechanicznych oraz wynikająca z nich minimalna średnica gięcia. Prąd krytyczny i parametry mechaniczne podawane są tutaj dla temperatury 77 K. W tab. 13 zamieszczone są parametry przewodów z Bi-2212 w matrycy srebrnej gdzie producenta (Nexans) podaje I_c w temperaturze 4,2 K a naprężenia maksymalne w temperaturach 300 K i 77 K.



Rys. 2.15. Szpula z taśmą z nadprzewodnika Bi-2223 w matrycy ze srebra ¹⁷
(American Superconductors, tab. 12)

Firma TRITHOR [63] 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. 14 przedstawione są parametry tych przewodów.

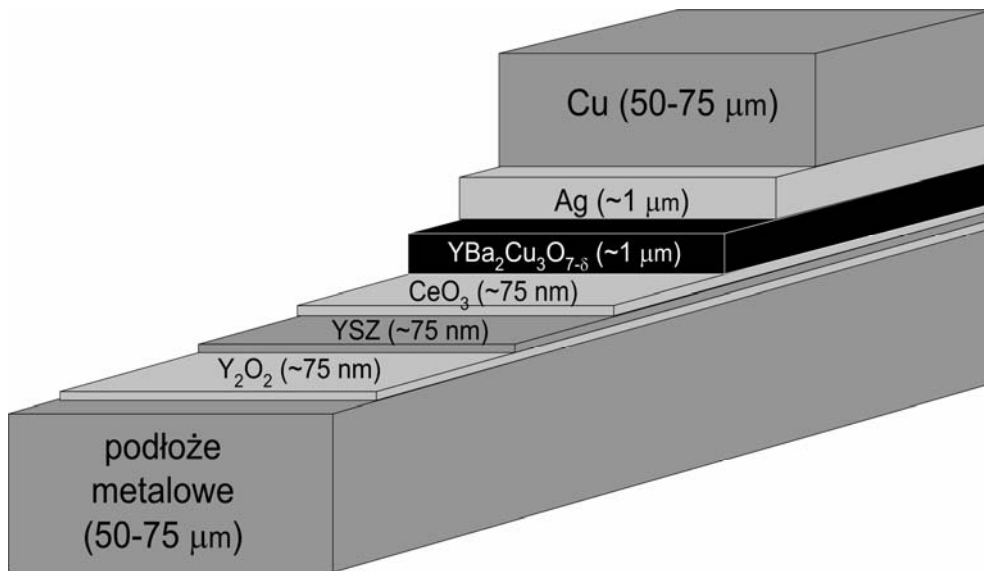
¹⁷ Pracownia Technologii Nadprzewodnikowych w Lublinie (IEI)

Tab. 14. Parametry przewodów 85-włóknowych z Bi-2223, TRITHOR [63]

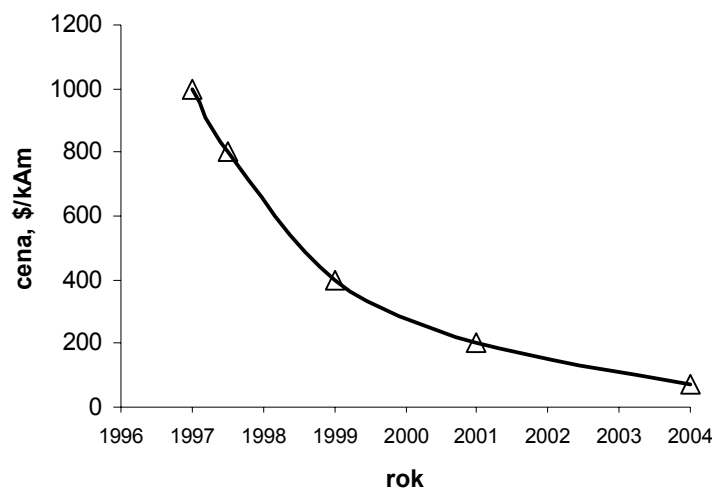
przewody TT i TT-ac	materiał matrycy wewnętrznej	Ag
	materiał pokrycia zewnętrznego	AgMg lub AgMgNi
przewody TT-gold	materiał matrycy wewnętrznej	AgAu
	materiał pokrycia zewnętrznego	AgAuMg lub AgAuMgNi
właściwości nadprzewodnikowe	gęstość prądu krytycznego	70 A/mm ² (1 μV/cm, 4 pomiaru w temp. 77 K 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. 40 μm folia: ok. 15 μm
	poziom izolacji	> 600 V

W drugiej metodzie, za pomocą której otrzymuje się nadprzewodnikowe przewody powlekane drugiej generacji (2G), na podłoże metalowe posiadające odpowiednie właściwości mechaniczne, cieplne 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. Rys. 2.16 pokazuje warstwy nadprzewodnikowego (Y-123) przewodu powlekanego 2G utworzonego w procesie TFA-MOD [67], 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 metalowego a warstwą stabilizatora miedzanego poprawia mechaniczne właściwości przewodu.



Rys. 2.16. Warstwy przewodu Y-123 drugiej generacji [67]



Rys. 2.17. Cena przewodów z nadprzewodnika Bi-2223 [20]

Zmianę cen przewodów 1G z nadprzewodnika Bi-2223 w ciągu kilku lat przedstawia rys. 2.17 [20]. Przyjmuje się, że przy cenie poniżej 50 \$/kAm pewne klasy silników, generatorów i kabli będą tańsze od rozwiązań konwencjonalnych [20].

2.2. Chłodzenie urządzeń nadprzewodnikowych

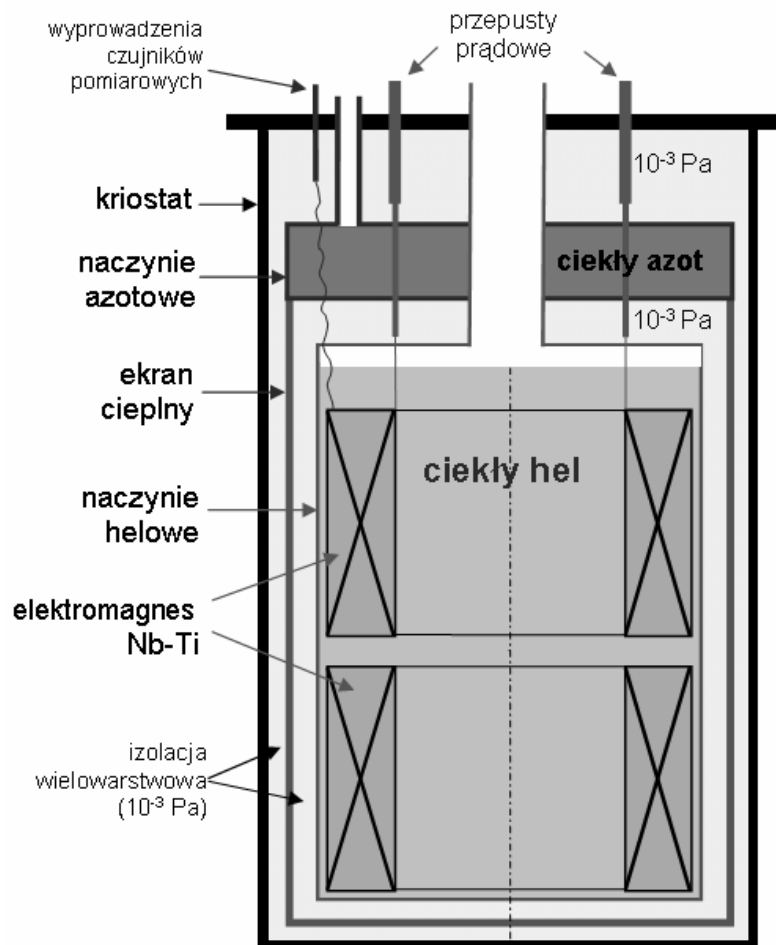
Podstawowym i najtrudniejszym do utrzymania parametrem, który decyduje o nadprzewodnictwie, jest temperatura. Maksymalna temperatura krytyczna nadprzewodników niskotemperaturowych nie przekracza 25 K. W praktyce urządzenia z takich nadprzewodników pracują w temperaturze 4,2 K i niższych przy technikach chłodzenia z użyciem ciekłego helu. Temperatura ta może być wyższa (np. 10 K) przy chłodzeniu krio-chłodziarką. 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. 2.18). Jest to zazwyczaj wysokopróżniowa izolacja termiczna z wielowarstwowymi ekranami z folii aluminiowej minimalizującymi dopływ ciepła przez promieniowanie (izolacja wielowarstwowa [5]) i miedzianymi ekranami cieplnymi schładzanymi parami helu lub ciekłym azotem, czy połączonymi z I stopniem krio-chłodziarki. 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 na skutek zakłóceń oraz ciepło wynikające ze strat przemiennoprądowych w nadprzewodnikach. Do chłodzenia urządzeń nadprzewodnikowych wykorzystywane mogą być krio-chłodziarki oraz ciecze kriogeniczne: ciekły hel (temperatura wrzenia 4,2 K), ciekły wodór (temperatura wrzenia 20,4 K) oraz ciekły azot (temperatura wrzenia 77 K). Można wyróżnić cztery podstawowe techniki chłodzenia urządzeń nadprzewodnikowych: chłodzenie w kąpeli, chłodzenie wymuszone, chłodzenie kontaktowe (przy wykorzystaniu krio-chłodziarki) oraz chłodzenie w kąpeli ze wspomaganiami.

Tworząc modele numeryczne zjawisk cieplnych w urządzeniu nadprzewodnikowym można rozdzielić przepływ ciepła na dwa niezależne etapy: przepływ ciepła z urządzenia nadprzewodnikowego do czynnika

chłodzącego oraz przepływ ciepła z otoczenia przez izolację kriostatu. Prezentowane w pracy ciepłe modele numeryczne dotyczą przepływu ciepła pomiędzy urządzeniem nadprzewodnikowym a czynnikiem chłodzącym.

Zarówno współczynnik wypełnienia uzwojenia λ_{sc} , który wpływa na transfer ciepła wewnątrz urządzenia jak i warunki brzegowe na granicy urządzenie-czynnik chłodzący zależą w dużym stopniu od zastosowanej techniki chłodzenia.



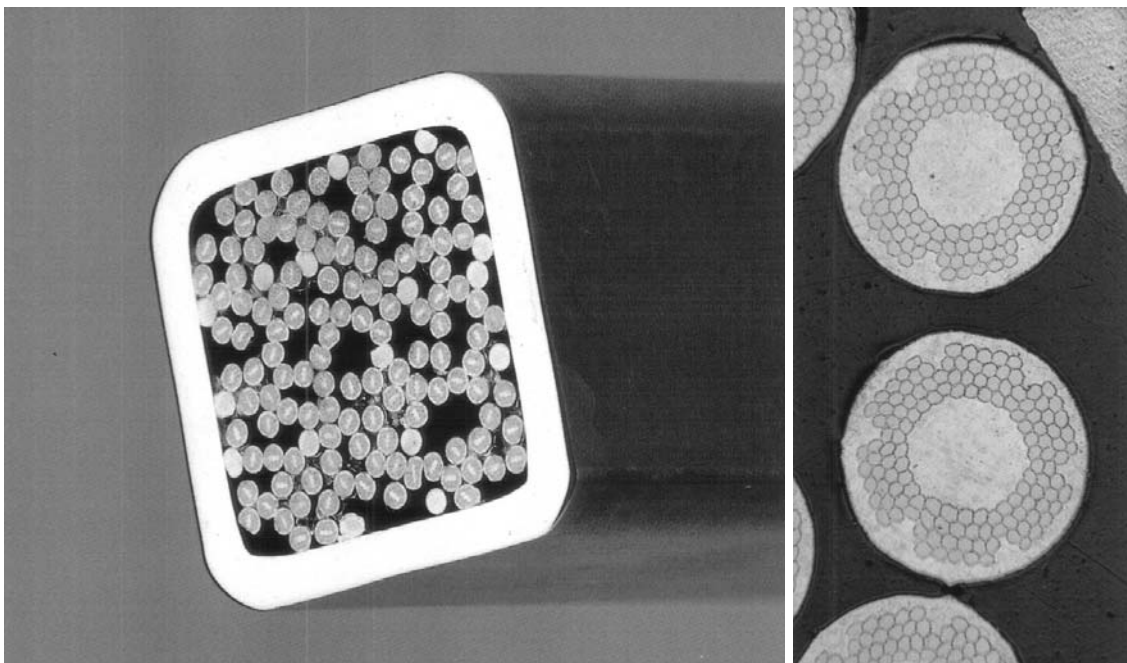
Rys. 2.18. Elektromagnes Nb-Ti chłodzony techniką w kąpeli ciekłego helu

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 [68] [61], wprowadzone zostało określenie: hel I ($T > 2,18$ K) oraz hel II ($T < 2,18$ K). Hel II nazywany jest helem nadpłynnym lub nadciekłym [5]. Optymalną temperaturą pracy urządzeń nadprzewodnikowych chłodzonych w kąpeli helu II

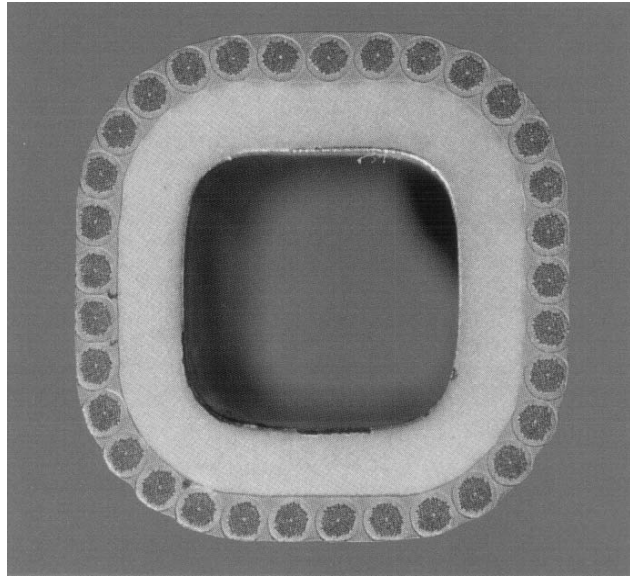
jest $T = 1,8 \text{ K}$ [68]. Urządzenia nadprzewodnikowe mogą być chłodzone również w kąpeli ciekłego helu I ($T = 4,2 \text{ K}$), w kąpeli ciekłego wodoru ($T = 20,4 \text{ K}$), w kąpeli ciekłego azotu ($T = 77 \text{ K}$). Do głównych zalet tej techniki chłodzenia należą dobre zdolności chłodzenia, 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. Rys. 2.18 przedstawia elektromagnes nadprzewodnikowy chłodzony techniką w kąpeli ciekłego helu. Elektromagnes umieszczony jest w naczyniu helowym i zanurzony w ciekłym helu pod ciśnieniem atmosferycznym. Pomiędzy 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 zapelnienia 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.

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 [68][61][17]. 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 ciepłych 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 wewnątrz uzwojenia, czy wewnątrz przewodów, to wartość współczynnika wypełnienia 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 wypełnienia uzwojenia λ_{sc} jest minimalny. Chłodzenie wymuszone wymaga specjalnej konstrukcji przewodów nadprzewodnikowych i specjalnej konstrukcji uzwojeń. Rys. 2.19 przedstawia przewód typu kabel w kanale chłodzącym (CIC) [5] o $I_{c(4,5\text{ K}, 12\text{ T})}=6\text{ kA}$. Przewód składa się z 128 prostych przewodów wielowłóknowych z Nb_3Sn w matrycy Cu i 16 przewodów miedzianych. W kablu jest 40 % wolnego przekroju dla przepływu helu. Rys. 2.20 przedstawia przewód wydrążony [5] w postaci kształtki miedzianej



Rys. 2.19. Przewód typu kabel w kanale chłodzącym [5] (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 [59]



Rys. 2.20. Przewód wydrążony [5] w postaci kształtki miedzianej z przylutowanymi prostymi przewodami wielowłokowymi z Nb-Ti [59]

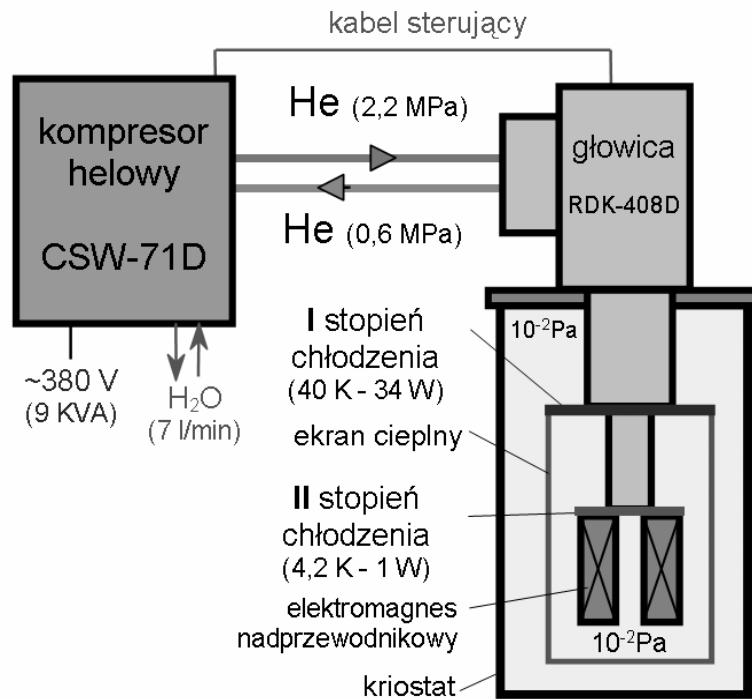
z przylutowanymi prostymi przewodami wielowłokowymi z Nb-Ti. Wymuszony przepływ czynnika chłodzącego odbywa się wewnątrz kształtki miedzianej.

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.

Chłodzenie kontaktowe. Schemat układu chłodzenia elektromagnesu nadprzewodnikowego techniką kontaktową przedstawia rys. 2.21. Elektromagnes nadprzewodnikowy połączony z II stopniem głowicy krio-chłodziarki umieszczony jest w prostym kriostacie próżniowym. Do I stopnia krio-chłodziarki 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 [5]). Krio-chłodziarki [69] pozwalają na całkowite wyeliminowanie cieczy kriogenicznych z układu chłodzenia urządzeń nadprzewodnikowych. Umożliwia to tworzenie autonomicznych systemów nadprzewodnikowych [70], w których wyeliminowana została konieczność okresowego uzupełniania kriogenicznych czynników chłodzących. Istnieje kilka różnych konstrukcji krio-chłodziarek, wśród których należy wyróżnić krio-chłodziarki mechaniczne i tzw. „puls-tuby” (pulse tube) [71]. 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 watów w temperaturze 4,2 K oraz kilkadziesiąt watów 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.

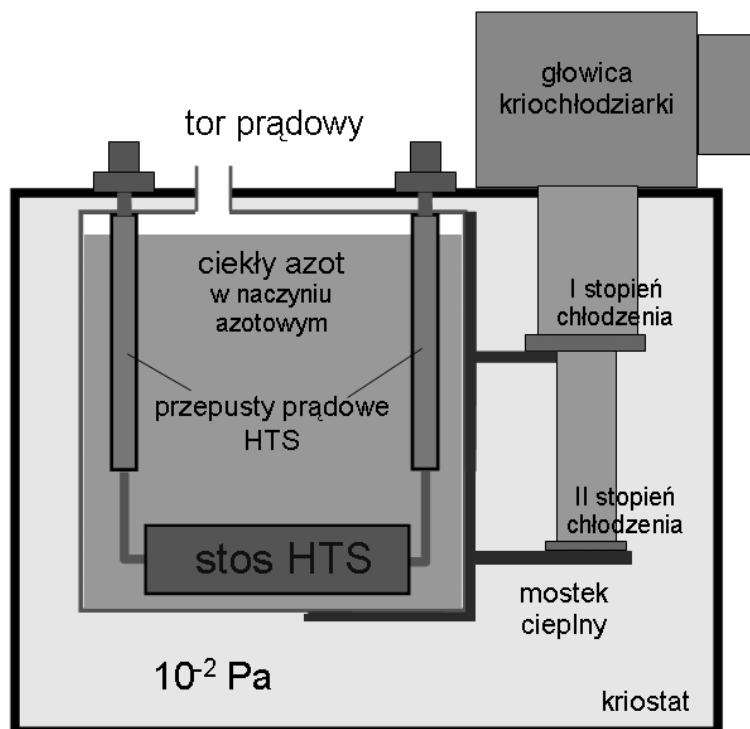


Rys. 2.21. Elektromagnes nadprzewodnikowy chłodzony techniką kontaktową

Chłodzenie w kąpeli ze wspomaganie. Wadą chłodzenia kontaktowego jest ograniczona efektywność chłodzenia i mała bezwładność cieplna. Wadą chłodzenia w kąpeli jest konieczność częstego uzupełniania cieczy kriogenicznych, co wymaga stałej obsługi urządzeń. Zastosowanie techniki w kąpeli ze wspomaganie, gdzie uzwojenie zanurzone jest w cieczy kriogenicznej a kriołodziarka odbiera ciepło od tej cieczy łączy podstawowe zalety techniki chłodzenia w kąpeli 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 krio-chłodziarki. Kąpiel ciecży kriogenicznej stanowi tutaj swojego rodzaju akumulator „zimna” doładowywany przez krio-chłodziarkę. Urządzeniami, które pracują z ustabilizowanymi stratami ciepła i w których może pojawić się gwałtowne (nie awaryjne) chwilowe zapotrzebowanie na moc chłodniczą są nadprzewodnikowe ograniczniki prądu. Nadprzewodnikowy ogranicznik prądu typu rezystancyjnego chłodzony techniką w kąpieli ciekłego azotu ze wspomaganiami krio-chłodziarką przedstawia rys. 2.22. I i II stopień krio-chłodziarki połączony jest mostkami cieplnymi z naczyniem azotowym, w którym umieszczony jest stos HTS – będący zasadniczym elementem ogranicznika. 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 [5])

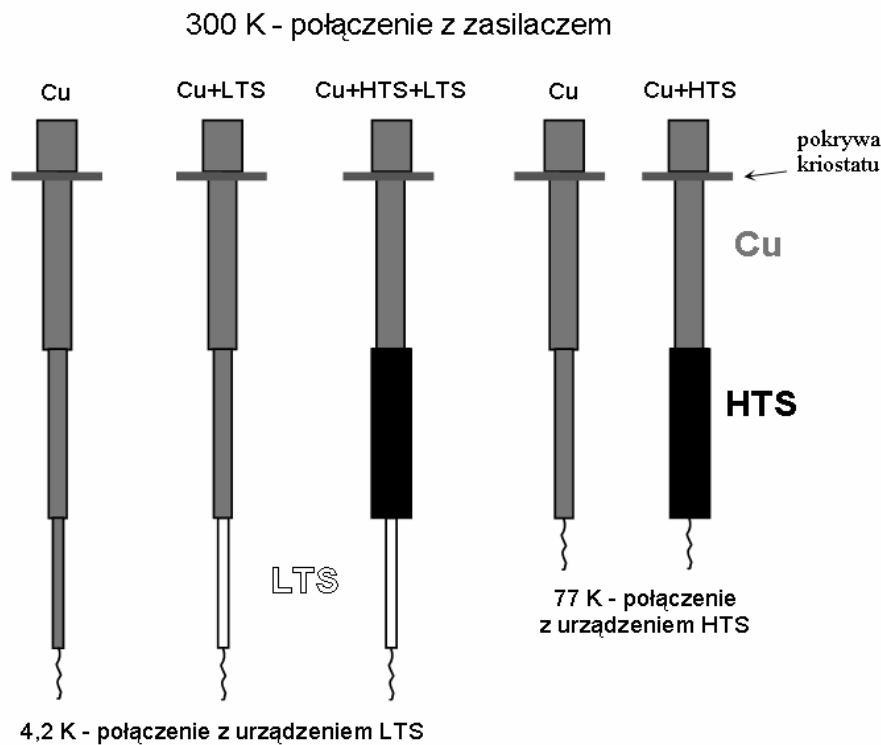
Na etapie przepływu ciepła z urządzenia nadprzewodnikowego do czynnika chłodzącego, chłodzenie techniką w kąpieli ze wspomaganiami modelowane jest tak jak chłodzenie techniką w kąpieli.



Rys. 2.22. Nadprzewodnikowy ogranicznik prądu typu rezystancyjnego [31] chłodzony techniką w kąpieli ze wspomaganiami krio-chłodziarką

2.3. Krioprzepusty prądowe

Zgodnie z przyjętą na początku pracy definicją urządzenia nadprzewodnikowego krioprzepusty prądowe traktowane będą w modelowaniu numerycznym jako urządzenia nadprzewodnikowe pomimo, że funkcjonalnie są częścią kriostatów i łączą urządzenia zewnętrzne pracujące w temperaturze pokojowej z urządzeniami pracującymi w temperaturach kriogenicznych. Krioprzepusty prądowe są powszechnie stosowane jako integralne części elektrycznych urządzeń nadprzewodnikowych.



Rys. 2.23. Schematyczna budowa krioprzepustów prądowych z różnych materiałów

Schematyczną budowę krioprzepustów prądowych zbudowanych z miedzi, materiałów LTS i HTS przedstawia rys. 2.23. 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) [72][73]. Krioprzepusty prądowe mogą być wykonane z materiałów nie-nadprzewodnikowych jak i z nadprzewodnikowych zarówno HTS i LTS. Strumień ciepła dopływający przez krioprzepust prądowy do wnętrza kriostatu oraz ciepło Joule'a generowane w nie-

nadprzewodnikowych lub nie-nadprzewodzących 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 krioprzepuscie, przez który płynie duży prąd. Krioprzepusty miedziane na rys. 2.23 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.

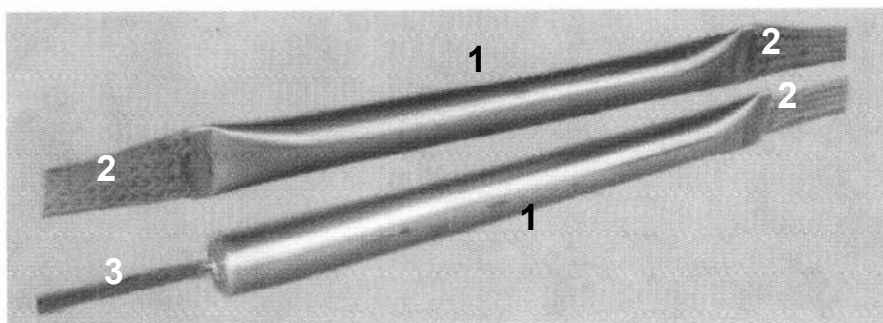
Krioprzepusty przystosowane do chłodzenia wymuszonego pracują przy ciśnieniu zbliżonym do atmosferycznego. Ciepło odbierane jest z przepustu głównie na drodze konwekcji wymuszonej na całej długości krioprzepustu. Krioprzepusty prądowe przystosowane do chłodzenia kontaktowego pracują w próżni, a ciepło 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 zanikającym¹⁸, można zmniejszyć dopływ ciepła do kriostatu przez mechaniczne odłączenie krioprzepustów o specjalnie do tego celu przystosowanej konstrukcji (np. Cryomagnetics [74]).

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 [74] 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 urządzenia 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. 7, tab. 10, tab. 11, tab. 15).

Krioprzepusty prądowe połączone ze stosem Bi-2212 przedstawia rys. 2.33. Są to krioprzepusty prądowe CSL-120-L (rys. 2.24), których



Rys. 2.24. Krioprzepusty prądowe (Cu+HTS i Cu+HTS+LTS) CSL-120-L¹⁹
(CAN Superconductors): 1 – obudowa Cu-Ni z rurą Bi-2223,
2 – płaska splotka Cu, 3 – wiązka Cu/Nb-Ti

¹⁸ Międzynarodowy Słownik Terminologiczny Elektryki –Nadprzewodnictwo [5]

¹⁹ Pracownia Technologii Nadprzewodnikowych w Lublinie (IEI)

parametry zamieszczono w tab. 15. 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).

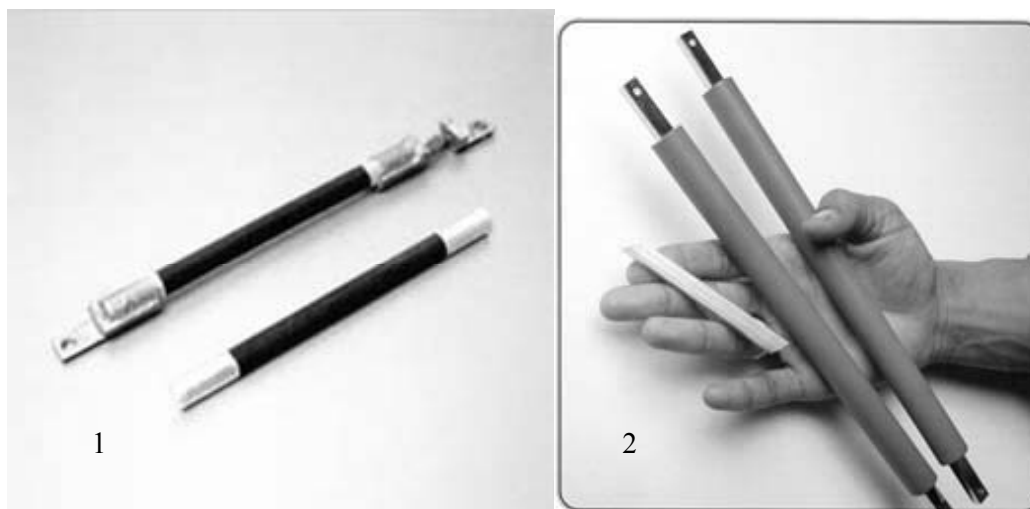
Tab. 15. Parametry przepustów prądowych z Bi-2223 w obudowie Cu-Ni (CAN Superconductors) [66]

typ	Φ_{zew}	dł. rury Cu-Ni	dł. splotki Cu lub wiązki Nb-Ti/Cu	I_{zn} (77 K)	I_c (77K)	dopływ ciepła ²⁰ 77 K–4 K	dopływ ciepła ²⁰ 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 ²¹	15	300	250	120	250	0,15	0,1

W krioprzepustach prądowych HTS wykorzystywane też mogą być rury i pręty z Bi-2223 czy Bi-2212, których parametry zamieszczone są w tab. 7, tab. 10 i tab.11. Kształtki te mają napyłoną warstwę srebra na końcach w celu ułatwienia połączenia z innymi częściami krioprzepustu. Kształtki takie w przeciwieństwie do tych prezentowanych na rys. 2.24 wymagają konstrukcyjnych elementów mocujących i połączeniowych. Producenci stosują różne rozwiązania połączeń z ceramicznymi elementami krioprzepustów HTS. Krioprzepusty wykonane z pręta HTS z przylutowanymi zaciskami do przykręcenia mechanicznego przedstawia rys. 2.25-1. Z jednej strony zacisk przylutowany jest na sztywno, z drugiej strony przez elastyczną splotkę miedzianą. Ma to zapobiec mechanicznemu uszkodzeniu ceramicznego krioprzepustu podczas schładzania i zmiany odległości pomiędzy elementami kriostatu. Rys. 2.25-2 przedstawia inne niż na rys. 2.24 rozwiązanie krioprzepustu HTS w obudowie z wyprowadzeniami prądowymi do przykręcenia.

²⁰ przez parę krioprzepustów

²¹ Pracownia Technologii Nadprzewodnikowych w Lublinie (IEL)



Rys. 2.25. Wysokotemperaturowe krioprzepusty prądowe:
1 – Furukawa Electric [75], 2 – American Superconductors [34]



Rys. 2.26. Rozłączalny krioprzepust prądowy HTS ACCEL-Instruments [76]
o prądzie znamionowym do 400 A

Krioprzepust HTS firmy ACCEL-Instruments [76] przedstawia rys. 2.26. 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 helem 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 [76].

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 [76] przedstawia rys. 2.27. 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. 2.26, doprowadza do kriostatu tylko 1/10 ciepła w porównaniu z optymalnie zaprojektowanym krioprzepustem konwencjonalnym [76].



materiał HTS	Bi-2212
prąd znamionowy	13 000 A
dopływ ciepła do lHe	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. 2.27. Krioprzepust prądowy HTS dla LHC, CERN (ACCEL-Instruments) [76]

2.4. Wybrane urządzenia nadprzewodnikowe

Jako obiekty modelowania numerycznego urządzeń nadprzewodnikowych wybrane zostały, elektromagnes LTS separatora magnetycznego, elektromagnes HTS dla SMES-a, separatory magnetyczne, ograniczniki prądu oraz zaprezentowane w poprzednim rozdziale krioprzepusty prądowe. O wyborze zdecydowały długoletnie doświadczenia autora w pracy

z tymi urządzeniami, dostęp do wyników badań potrzebnych do weryfikacji eksperymentalnej modeli numerycznych i możliwość wykonania nowych badań eksperymentalnych, gdyby takie były konieczne do weryfikacji modeli numerycznych.

2.4.1. 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 odchyłania 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.

a) Uzwojenia nadprzewodnikowe

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" uzwojenia taśmą usztywniającą, albo 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 wypełnienia uzwojenia λ_{sc} ulega zmniejszeniu. Jeżeli 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 grubość. Karkasy są zazwyczaj wykonywane z materiałów o bardzo dobrej przewodności cieplnej i elektrycznej.

Karkas nie wpływa na współczynnik wypełnienia uzwojenia λ_{sc} jednak jego wpływ nie może zostać pominięty w obliczeniach elektromagnetycznych i cieplnych uzwojenia nadprzewodnikowego. Grubość ścianek karkasu może być znaczna i porównywalna z grubością uzwojenia (rys 2.28, rys. 2.29). Gruby karkas z materiału o dobrej przewodności elektrycznej stanowi zwarty zwój o małej rezystancji i musi być uwzględniany w numerycznych modelach magnetodynamicznych. 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 cieplne 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 przewodu nadprzewodnikowego.

W numerycznych modelach cieplnych uwzględnia się fakt, że karkas o dobrej przewodności cieplnej pośredniczy w przekazywaniu ciepła z uzwojenia do czynnika chłodzącego w przypadku chłodzenia techniką w kąpieli. W chłodzeniu kontaktowym ścianki karkasu są podstawową drogą transportu ciepła z uzwojenia do głowic kriochłodziarki.

b) Elektromagnesy LTS dla separatorów magnetycznych

W tab. 16 przedstawione zostały podstawowe parametry konstrukcyjne i elektromagnetyczne dwóch elektromagnesów nadprzewodnikowych [61] zbudowanych przy udziale autora. Karkasy dwucewkowych elektromagnesów nadprzewodnikowych [61] przedstawia rys. 2.28. Karkas jednego z elektromagnesów wykonany jest ze stopu aluminium, karkas drugiego wykonany jest z brązu. Uzwojenie elektromagnesu I wykonane zostało bez kanałów chłodzących. Konstrukcja uzwojenia i karkasu umożliwia chłodzenie tego elektromagnesu zarówno techniką w kąpieli ciekłego helu jak również przy użyciu kriochłodziarki.

Tab. 16. Parametry dwucewkowych elektromagnesów LTS dla separatorów magnetycznych Pracowni Technologii Nadprzewodnikowych w Lublinie (IEI)

parametr	jedn.	I	II
Odległość pomiędzy cewkami	m	0,01	0,046 albo 0,117
Promień wewnętrzny cewki a_1	m	0,0314	0,104
Promień zewnętrzny cewki a_2	m	0,0389	0,126
Długość cewki $2b$	m	0,04	0,1112
Prąd roboczy cewki I_r	A	± 250	± 110
Średnia gęstość prądu w cewce $\lambda_{sc} J_{sc}$	A/m ²	$\pm 4,17 \cdot 10^8$	$\pm 3,11 \cdot 10^8$
Współczynnik zapełnienia uzwojenia λ_{sc}	-	0,32	0,153
Maksymalna indukcja magnetyczna B_{max}	T	2,26	5,69
Energia magnetyczna w cewce	kJ	0,75	110,7
Długość przewodu jednej cewki	m	110	4995
Masa elektromagnesu (masa 1 cewki)	kg	1,46	34,2 (13,6)
Rezystancja uzwojenia (293 K)	Ω	19,8	1065 +1100
Średnica zewnętrzna kriostatu	m	0,1	0,3
Średnica „ciepłego otworu” kriostatu	m	brak	0,1

Parametry przewodów nadprzewodnikowy Nb-Ti/Cu

Średnica przewodu	m	$0,7 \cdot 10^{-3}$	²² $0,4 \cdot 10^{-3}$
Średnica włókna	m	$50 \cdot 10^{-6}$	$36 \cdot 10^{-6}$
Liczba włókien nadprzewodnikowych	-	98	54
Współczynnik stabilizacji C_{sc}	-	1	1,35
Skok skrętu	m	(bd)	0,02
Średnica przewodu w izolacji	m	(bd)	$0,444 \div 0,452 \cdot 10^{-3}$

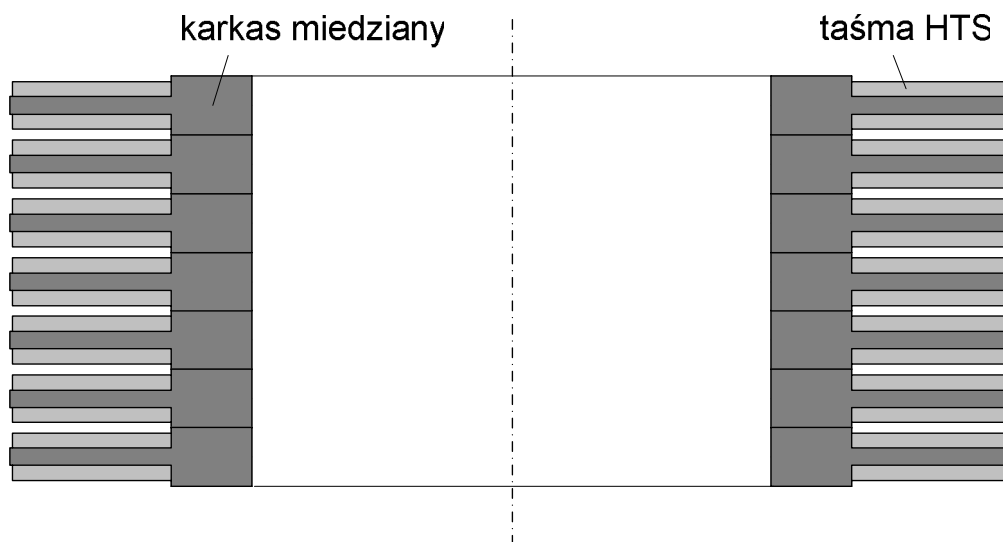
Współczynnik λ_{sc} jest równy 0,32 (tab. 16). Zgodnie z (2-4) i danymi z tab. 16, $\lambda_{sc \max} = 0,3925$, więc λ_{sc} stanowi 81,5% $\lambda_{sc \max}$. Elektromagnes **II** przystosowany jest tylko do chłodzenia techniką w kąpieli ciekłego helu. Warstwy przewodu nadprzewodnikowego nawinięte zostały na przekładkach izolacyjnych o grubości 0,5 mm co utworzyło podłużne kanały

²² Przewód T54-1,35/0,4 – rys. 2.9, tab. 4, tab. 5

d) Elektromagnes HTS dla SMES-a o energii 7,36 KJ

Tab. 17. Parametry elektromagnesu HTS dla SMES-a Pracowni Technologii Nadprzewodnikowych w Lublinie (IEI)

parametr	jednostka	wartość
temperatura pracy	K	35
prąd krytyczny elektromagnesu	A	139
maksymalna energia zgromadzona w elektromagnesie	kJ	7,36
liczba krążków	-	14
liczba zwojów w krążku	-	104
liczba zwojów elektromagnesu	-	1456
promień wewnętrzny krążka	m	0,148
promień zewnętrzny krążka	m	0,18
wysokość elektromagnesu	m	0,094
indukcyjność elektromagnesu	H	0,76
długość taśmy HTS	m	1500



Rys. 2.29. Elektromagnes HTS dla SMES-a (tab. 17)

W tab. 17 przedstawione zostały podstawowe parametry konstrukcyjne i elektromagnetyczne elektromagnesu nadprzewodnikowego dla SMES-a projektowanego i budowanego przy udziale autora²³. Elektro-

²³ Projekt Badawczy KBN 4 T10A 00425 "Nadprzewodnikowy zasobnik energii z elektromagnesem wysokotemperaturowym i autonomicznym układem chłodzenia", 2003-2006

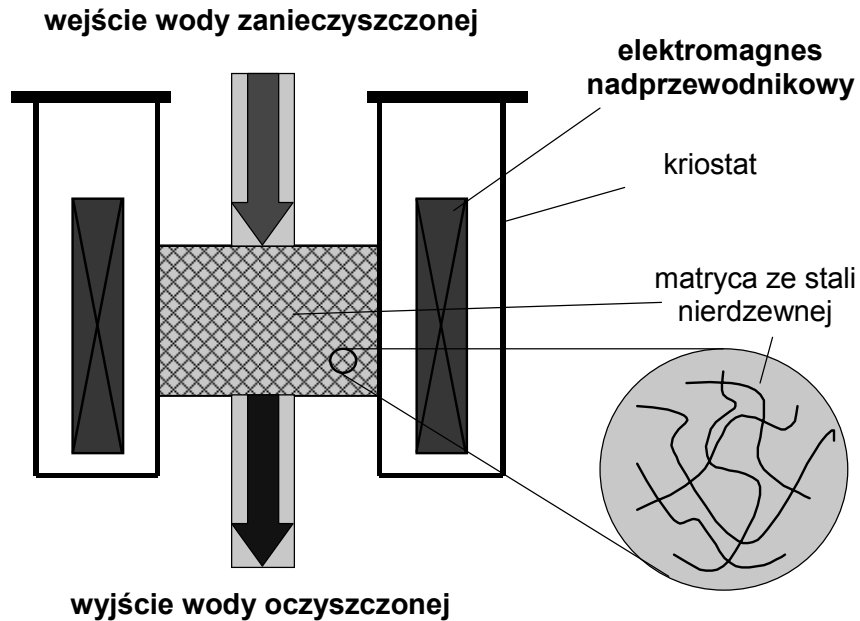
magnes składa się z 7 dwucewkowych uzwojeń krążkowych wykonanych z taśmy Bi-2223/Ag (rys. 2.29), której parametry zamieszczone są w tab. 12. Karkas każdego dwucewkowego uzwojenia krążkowego wykonany jest z miedzi. Elektromagnes może być chłodzony techniką w kąpeli ciekłego azotu ale docelową temperaturę jego pracy, w przedziale 30-40 K, można osiągnąć techniką chłodzenia kontaktowego z wykorzystaniem kriochłodziarki SRDK-408. Karkas elektromagnesu dla SMES-a ma zapewnić, oprócz wytrzymałości mechanicznej uzwojenia, odpowiednie warunki przepływu ciepła pomiędzy elektromagnesem a głowicą kriochłodziarki. Jeżeli w modelowaniu numerycznym elektromagnes HTS potraktuje się jako zbiór 14 niezależnych uzwojeń krążkowych, to wtedy konstrukcja elektromagnesu nie wpływa na współczynnik zapełnienia uzwojenia λ_{sc} .

2.4.2. Separatory magnetyczne

Przewody nadprzewodnikowe umożliwiają budowę elektromagnesów wytwarzających pola magnetyczne w znacznych przestrzeniach o indukcji przekraczającej 10 T. Elektromagnesy nadprzewodnikowe separatorów magnetycznych są jednym z pierwszych zastosowań dużych urządzeń nadprzewodnikowych na skalę przemysłową. Separatory magnetyczne małych cząstek ferromagnetycznych i paramagnetycznych są stosowane w procesach produkcyjnych do: oczyszczania kaolinu ze związków tytanu i żelaza (TiO_2 , Fe_2O_3) [79], odsiarczania węgla (FeS_2), wzbogacania rud żelaza i molibdenu, oczyszczania wody w procesach przemysłowych, szczególnie w hutnictwie.

Ze względu na sposób działania separatory dzielą się na wychwytyjące i odchylające.

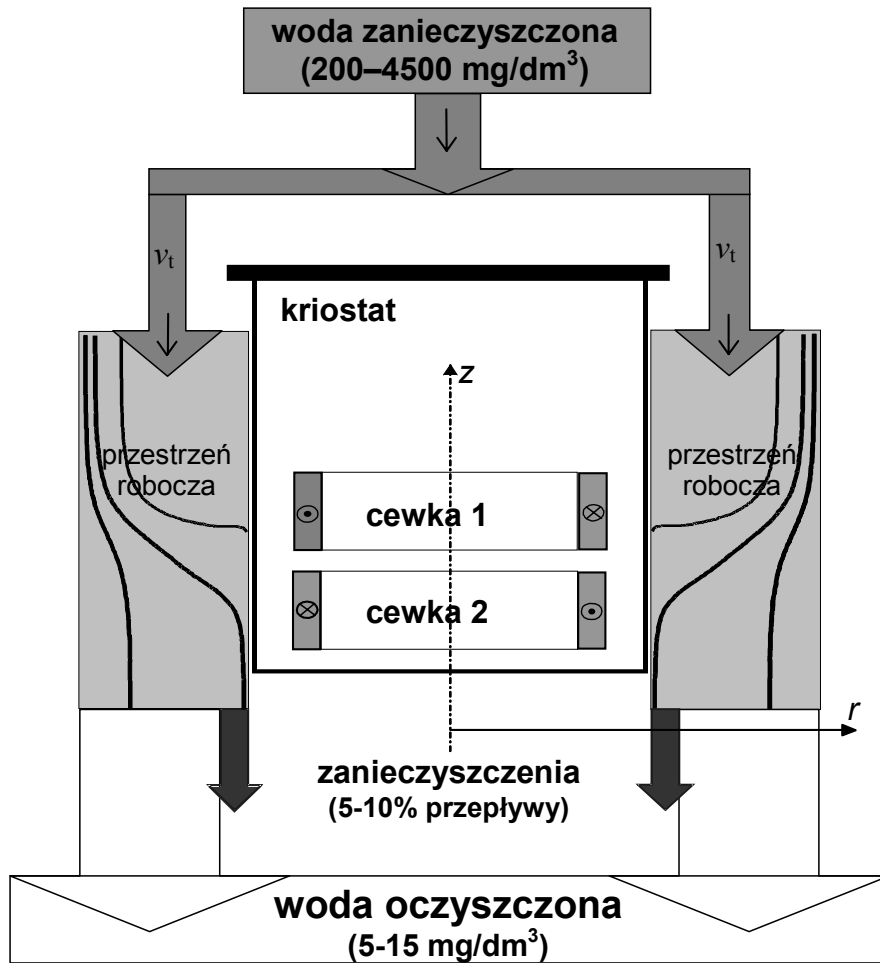
Podstawą pracy separatorów magnetycznych jest istnienie w przestrzeni roboczej silnego i silnie niejednorodnego pola magnetycznego [61] [80][79][18]. W separatorach HGMS (High Gradient Magnetic Separation) uzyskiwane jest to przez umieszczenie w silnym jednorodnym polu magnetycznym tzw. matrycy z waty stalowej, która zniekształca pole magnetyczne i w sąsiedztwie włókien matrycy powstają silne niejednorodności pola magnetycznego o gradiencie indukcji rzędu 10^5 T/m. Zasada działania separatora HGMS do oczyszczania wody przedstawiona jest na rys. 2.30. Praca takiego separatora polega na wychwytywaniu zanieczyszczeń magnetycznych znajdujących się w wodzie przepływającej przez przestrzeń roboczą separatora na włóknach matrycy umieszczonej w separatorze. Separatory HGMS nazywane są również separatorami matrycowymi lub separatorami wysokogradientowymi.



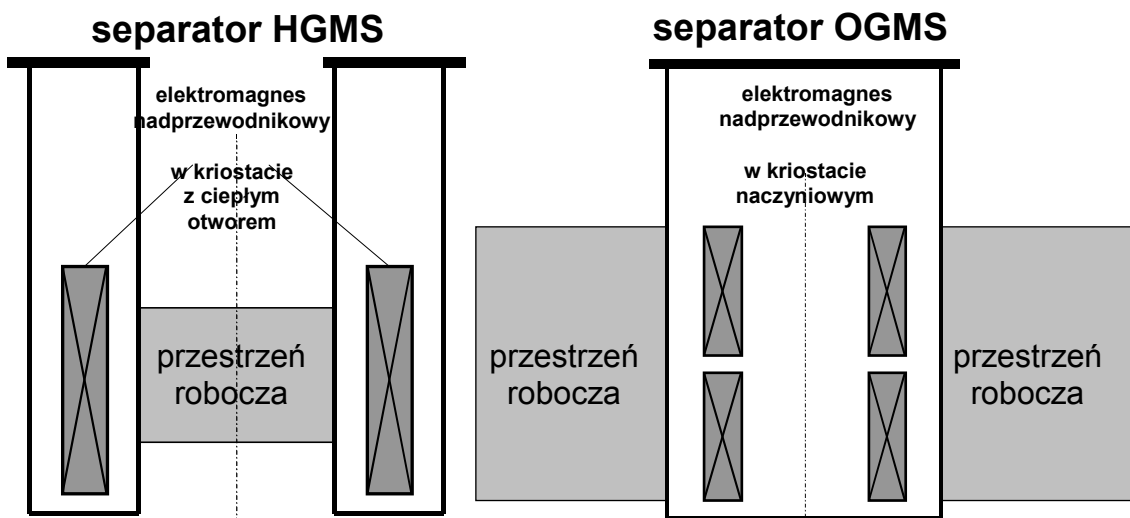
Rys. 2.30. Zasada działania nadprzewodnikowego separatora magnetycznego typu HGMS do oczyszczania wody

W separatorach odchylających, w których niejednorodne pole magnetyczne generowane jest przez odpowiednio skonfigurowany elektromagnes, indukcja magnetyczna może osiągać gradient rzędu 100 T/m. Praca tego typu separatora polega na selektywnym odchyleniu cząstek różnych materiałów w zależności od ich podatności magnetycznej i rozmiarów. Jednym z separatorów odchylających jest separator typu OGMS (Open Gradient Magnetic Separation). Budowa efektywnych separatorów OGMS stała się możliwa dopiero przy wykorzystaniu elektromagnesów nadprzewodnikowych, które pozwalają na generowanie silnych pól magnetycznych w dużych przestrzeniach roboczych. Schemat instalacji nadprzewodnikowego separatora OGMS do oczyszczania wody przedstawia rys. 2.31.

Kriostaty i usytuowanie przestrzeni roboczych w nadprzewodnikowych separatorach magnetycznych typu HGMS i OGMS przedstawia rys. 2.32. Przestrzeń robocza separatora HGMS znajduje się wewnątrz elektromagnesu nadprzewodnikowego. Aby zwiększyć przestrzeń roboczą takiego separatora oraz jego wydajność, należy zwiększyć średnicę elektromagnesu nadprzewodnikowego. Elektromagnesy separatorów HGMS umieszczane są w skomplikowanych kriostatach z ciepłym otworem. Dodatkowo w prostym separatorze HGMS nie można zapewnić ciągłości pracy, co jakiś czas matryca separatora musi zostać oczyszczona z wychwyconych na niej zanieczyszczeń. Czyszczenie matrycy odbywa się przy wyłączonym polu magnetycznym lub po wyciągnięciu matrycy z silnego pola magnetyczne-



Rys. 2.31. Zasada działania nadprzewodnikowego separatora magnetycznego typu OGMS do oczyszczania wody i trajektorie cząstek w przestrzeni roboczej



Rys. 2.32. Przestrzenie robocze i kriostaty nadprzewodnikowych separatorów magnetycznych typu HGMS i OGMS

go. Czyszczenie matrycy wymaga więc przerwy w pracy separatora. Aby zapewnić ciągłość pracy stosuje się pracę z dwoma separatorami, które pracują i są czyszczone na zmianę, albo matrycowy separator karuzelowy o bardzo skomplikowanym systemie matryc i elektromagnesie siodłowym o złożonej budowie. Przerwy w pracy można znacznie ograniczyć w systemie pracy z wymiennymi matrycami [79]. Wszystkie te wady separatora HGMS rekompensowane są przez bardzo duże gradienty indukcji magnetycznej w przestrzeni roboczej. Pozwala to na prowadzenie skutecznej separacji cząstek o bardzo słabych właściwościach magnetycznych i średnicach poniżej 1 μm .

Elektromagnesy nadprzewodnikowe separatorów OGMS mają najprostszą budowę spośród wszystkich separatorów odchylających. Umieszczone są w prostych kriosatach naczyńniowych. Separacja odbywa się w przestrzeni na zewnątrz elektromagnesów. Przestrzeń ta jest więc ograniczona tylko zasięgiem działania sił magnetycznych działających na separowane cząstki. Separacja magnetyczna OGMS odbywa się w sposób ciągły bez udziału ruchomych części i potrzeby okresowego usuwania zanieczyszczeń. Ciągłość pracy eliminuje konieczność dublowania instalacji, która przejmowałaby pracę w przerwach pierwszej. Te cechy mają bardzo istotne znaczenie, zwłaszcza w dużych instalacjach przemysłowych i mogą decydować o kosztach i opłacalności stosowania separatorów nadprzewodnikowych.

Ograniczeniem w stosowaniu separatorów odchylających OGMS są maksymalne parametry pola magnetycznego możliwe do uzyskania w przestrzeniach roboczych. Wartości tych parametrów, zwłaszcza gradientu indukcji magnetycznej, pozwalają na prowadzenie skutecznej separacji cząstek ferromagnetycznych i cząstek silnie paramagnetycznych o średnicach powyżej 10 μm . Jednym z procesów, w którym separacja magnetyczna typu odchylającego znajduje zastosowanie, jest oczyszczenie hutniczej wody przemysłowej. Wynika to z charakteru zanieczyszczeń, głównie związków żelaza czy cząstek żelaza oraz odpowiednio dużej granulacji tych cząstek. Podczas badań eksperymentalnych²⁴ oczyszczania wody z zanieczyszczeń ferromagnetycznych z wykorzystaniem elektromagnesu Nb-Ti (tab. 16, I) w separatorze OGMS o średnicy wewnętrznej 0,1 m osiągnięto wydajność ponad 12 m^3/h z jakością separacji zbliżoną do 92 % [80][61]. Wykorzystując elektromagnes II (Nb-Ti, tab. 16) można w podobnych warunkach separacji osiągnąć wydajność ok. 200 m^3/h . Średnica wewnętrzna separatora jest tutaj równa 0,3 m. W elektromagnesie II jest możliwość zmiany odległości pomiędzy cewkami przez wymianę tulei

²⁴ prowadzonych przy udziale autora

dystansowych (rys. 2.28). Duże odległości pomiędzy cewkami stosuje się w separatorach cząstek ferromagnetycznych. Małe, w separacji cząstek paramagnetycznych [81][82]. Elektromagnes II z przeciwnie połączonymi cewkami umożliwia prowadzenie separacji odchylającej OGMS zarówno na zewnątrz kriostatu o średnicy zewnętrznej 0,3 m jak również w tzw. „ciepłym otworze” o średnicy zewnętrznej 0,1 m wewnątrz elektromagnesu. Elektromagnesu II po zgodnym połączeniu cewek umożliwia prowadzenie w „ciepłym otworze” kriostatu separacji wychwytyjącej HGMS.

W USA [26][83] pierwszy elektromagnes nadprzewodnikowy LTS zainstalowano w separatorze przemysłowym w roku 1986 (J.M. Huber Company). Jest to instalacja do oczyszczania kaolinu o średnicy roboczej 2,1 m pracująca w systemie z jedną matrycą. Elektromagnes chłodzony jest ciekłym helem w obiegu zamkniętym ze skraplarką helu. Do chwili obecnej uruchomiono w USA 12 podobnych instalacji przemysłowych separatorów nadprzewodnikowych z elektromagnesami LTS, z czego w 8 instalacjach elektromagnesy nadprzewodnikowe zastąpiły elektromagnesy konwencjonalne. 5 dalszych przemysłowych separatorów z elektromagnesami LTS pracuje w Australii, Brazylii, Chinach, Anglii i w Niemczech, wszystkie do oczyszczania glinki kaolinowej. 12 instalacji z USA i 5 z innych krajów pracuje w systemie z jedną matrycą. Matryca jest czyszczona po wyłączeniu prądu w elektromagnesach.

W 1989 roku w Wielkiej Brytanii [26] uruchomiono przemysłową instalację separatora HGMS pracującą w systemie z wymiennymi matrycami, gdzie zapełniona matryca wyciągana jest z obszaru działania silnego pola magnetycznego i tam czyszczona, a w jej miejsce wprowadza się automatycznie czystą matrycę. W separatorze tym pracuje elektromagnes z Nb-Ti chłodzony techniką w kąpielii ciekłego helu. Średnica przestrzeni roboczej wynosi 0,28 m, indukcja magnetyczna w środku wynosi 4 T, a wydajność od 2 do 5 ton kaolinu na godzinę. Od 1992 roku podobnego typu separator przemysłowy do oczyszczania kaolinu działa w Niemczech. Jego parametry to: średnica przestrzeni roboczej = 0,26 m, indukcja w środku = 5 T, wydajność do 5 t/h. Do chwili obecnej działa na całym świecie 15 przemysłowych separatorów magnetycznych HGMS z elektromagnesami LTS pracujących w systemie z wymiennymi matrycami oraz 10 dalszych mniejszej skali.

Największym separatorem HGMS z wymiennymi matrycami i elektromagnesem LTS jest separator o średnicy roboczej 1 m i indukcji magnetycznej 5 T. CARPCO [84] oferuje separatory HGMS do separacji suchej i mokrej zanieczyszczeń o granulacji poniżej 75 μm w polu magnetycznym o indukcji do 5 T wytwarzanym przez elektromagnesy LTS.

Elektromagnesy z nadprzewodników HTS również znajdują miejsce w separatorach HGMS. Jednym z nich jest separator z przestrzenią roboczą 5 cm i indukcją w środku równą 2,5 T [26][85]. Inny nadprzewodnikowy separator HGMS typu AMS-400 oferowany przez firmę ACCEL [76] przeznaczony jest do separacji mokrej zanieczyszczeń o granulacji w przedziale od 1 μm do 30 μm . Przy przepływie 70 m^3/h osiąga on wydajność 25 t/h. Elektromagnes HTS w kriostacie z ciepłym otworem o średnicy = 0,43 m chłodzony jest przy wykorzystaniu kriochłodziarki. Moc zasilania jest równa 10 kW. Z uwagi na brak cieczy kriogenicznych i długi czas pomiędzy przeglądami serwisowymi wynoszący ponad 12 miesięcy ten nadprzewodnikowy separator magnetyczny nie wymaga specjalistycznej (kriogenicznej) obsługi.

2.4.3. SMES-y

Elektromagnesy nadprzewodnikowe pozwalają na magazynowanie energii elektromagnetycznej (SMES: superconducting magnetic energy storage) [19] [48] [41] [42] [43] [15]. Badania te były bardzo zaawansowane w dobie tzw. „wojen gwiazdnych”. Energia zmagazynowana w polu magnetycznym miała być wykorzystywana do impulsowego zasilania laserów przeznaczonych do niszczenia obiektów orbitalnych.

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

$$(2-5) \quad E = \frac{1}{2} \int_V \mu H^2 dV$$

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 (2-5) umożliwiają gromadzenie znacznej energii w ich polu magnetycznym. Energię zmagazynowaną w polu magnetycznym elektromagnesu można wyrazić również równaniem:

$$(2-6) \quad E = \frac{1}{2} L I^2$$

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

W elektromagnesie nadprzewodnikowym prąd płynie bez strat²⁵, więc zmagazynowana energia nie jest rozpraszana i może być przechowywana dowolnie długo, gdy elektromagnes znajduje się w reżimie pracy z prądem nie zanikającym²⁶.

Zmagazynowana energia w polu magnetycznym elektromagnesów nadprzewodnikowych może być, w zależności od żądanego czasu przekazywania, zastosowana w następujących dziedzinach:

- 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.

Tab. 18. Parametry wybranych SMES-ów [19][32][44][45][43][46][47]

kraj	organizacja	typ	specyfikacja
Finlandia	Uniwersytet w Tampere	HTS μ SMES	160 A/ 200 V, 5 kJ
Finlandia	Uniwersytet w Tampere	LTS μ SMES	275 A/ 200 V, 0,2 MJ
Niemcy	EUS GmbH	HTS μ SMES	100 A/ 200 V, 8 kJ
Niemcy	ACCEL	HTS μ SMES	80 A/ 400 V, 150 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	FZK Research Center	LTS μ SMES	300 A/ 700 V, 0,25 MJ
Niemcy	TU Munich	LTS μ SMES	1380 A/ 3 kV, 1 MJ
Włochy	CESI	LTS μ SMES	1 MVA, 4 MJ
Hiszpania	ASINEL	LTS μ SMES	1 kA/ 500 V, 1 MJ
USA	FSU – CAPS	LTS SMES	4 kA/ 24 kV, 100 MJ
Japonia	projekt rządowy	LTS SMES	10 kA, 100 MW, 2,2 GJ
Japonia	JAERI	LTS SMES	3 kA/ 32,6 kV, 71,1 MW
Japonia	KEPCo	LTS SMES	1 kA/ 500 V, 3,6 MJ
Japonia	KEPCo	HTS μ SMES	600 A, 4 kJ
Korea	KEMCo	LTS μ SMES	0,9 kA, 1 MJ
Izrael	IECo	HTS μ SMES	110 A, 0,24 kJ-1,5 kJ

²⁵ poza stratami w układzie chłodzenia wydatkowanymi na utrzymanie stanu nadprzewodzącego w elektromagnesie

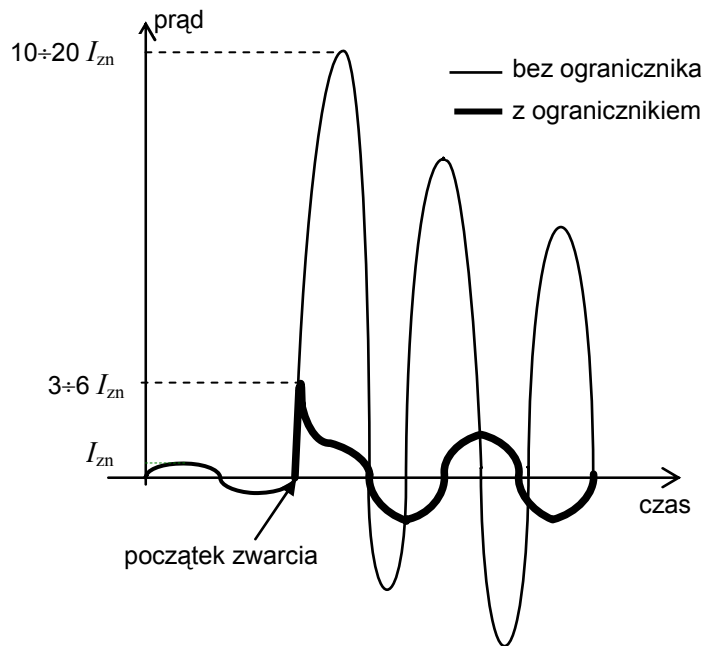
²⁶ Międzynarodowy Słownik Terminologiczny Elektryki –Nadprzewodnictwo [5]

W tab. 18 przedstawione zostały parametry wybranych SMES-ów z elektromagnesami LTS i HTS. Tab. 19 przedstawia energię SMES-ów i ich czas rozładowania w zależności od zastosowania.

Tab. 19. Energia SMES-ów w zależności od zastosowania [19]

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

2.4.4. Ograniczniki prądu



Rys. 2.33. Ograniczanie prądu zwarciovego przez nadprzewodnikowy ogranicznik prądu [65]

Przebiegi prądu w systemie z nadprzewodnikowym ogranicznikiem prądu i bez ogranicznika przedstawia rys. 2.33. Nadprzewodnikowe ograniczniki prądu (SFCL) ograniczają prąd zwarciovą przed osiągnięciem pierwszego maksimum więc zmniejszone zostają nie tylko skutki cieplne ale, co bardzo istotne, skutki dynamiczne działania prądu zwarciovego na urządzenia w sieci. Zastosowanie nadprzewodnikowych ograniczników prądowych pozwala ograniczyć prądy zwarciovą, przekraczające prądy

znamionowe 10÷20 krotnie, do wartości nie większych niż 3÷6 krotność prądu znamionowego. Pozwala to zmniejszyć moc wyłączalną współpracujących z ogranicznikami wyłączników. Ponieważ działanie nadprzewodnikowych ograniczników prądu jest niezawodne, można również rozważyć uwzględnienie tego ograniczonego poziomu prądów zwarciovych w sieci przy projektowaniu nowych transformatorów z mniejszymi napięciami zwarcia co obniży wahania napięcia w sieci powstałe wskutek zmian obciążeń.

Istnieją dwa podstawowe typy nadprzewodnikowych ograniczników prądów zwarciovych. Są to ograniczniki rezystancyjne, których praca opiera się na zmianie rezystancji elementu nadprzewodnikowego, oraz indukcyjne, działające na zasadzie ekranowania strumienia magnetycznego [65]. Nadprzewodnikowe ograniczniki typu rezystancyjnego nie generują strat energii w obwodzie podczas pracy w zakresie prądów poniżej ich prądu krytycznego²⁷, a ograniczniki typu indukcyjnego generują minimalne straty wynikające z rezystancji uzwojenia pierwotnego i zużycia energii w systemie chłodzenia.



Rys. 2.34. Rezystancyjny SFCL bez kriostatu²⁸: 1 – stos Bi-2212 - C02-034 bifilar coil, 2 – przepusty prądowe Bi-2223 – CSL-120-L.2 w obudowie

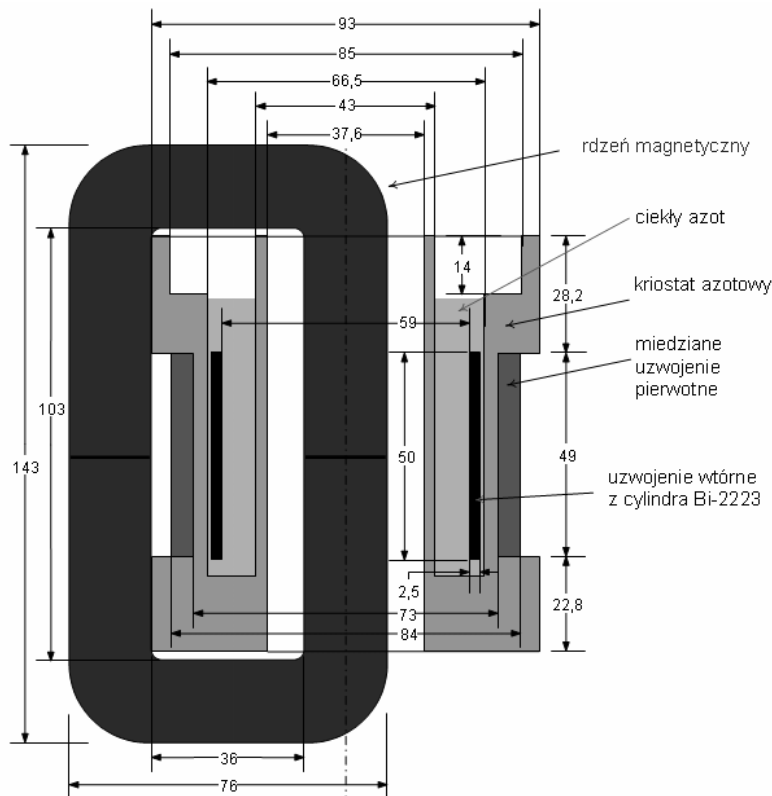
W ogranicznikach rezystancyjnych, ograniczanie prądu zwarciovego zachodzi w wyniku wzrostu rezystancji obwodu elektrycznego. Elementem ograniczającym prąd jest, włączony szeregowo do chronionego obwodu elektrycznego stos HTS, który w zakresie prądu poniżej jego prądu kry-

²⁷ poza zużyciem energii w systemie chłodzenia

²⁸ Pracownia Technologii Nadprzewodnikowych w Lublinie (IEI)

tycznego znajduje się w stanie nadprzewodzącym, a więc stanowi zerową rezystancję dla przepływu prądu. Nadprzewodnikowe podzespoły rezystancyjnego ogranicznika prądu bez kriostatu przedstawia rys. 2.34. System chłodzenia tego ogranicznika przedstawia rys. 2.22.

Indukcyjne ograniczniki nadprzewodnikowe (rys. 2.35) mają budowę zbliżoną do przekładnika prądowego z jednozwojowym uzwojeniem wtórnym w postaci cylindra z nadprzewodnika wysokotemperaturowego. W zakresie prądów dopuszczalnych w chronionym obwodzie cylinder nadprzewodnikowy znajduje się w stanie nadprzewodzącym i pełni rolę ekranu magnetycznego, uniemożliwiając strumieniowi magnetycznemu indukowanemu w cewce pierwotnej wnikanie do rdzenia magnetycznego ogranicznika. Uzwojenie pierwotne, wykonane z miedzi, włączone jest w szereg z chronionym obwodem elektrycznym. Prąd zwarciovowy w chronionym obwodzie elektrycznym indukuje w nadprzewodnikowym uzwojeniu wtórnym na tyle duży prąd, że uzwojenie to przechodzi do stanu rezystywnego i przestaje ekranować rdzeń magnetyczny.



Rys. 2.35. Przekrój SFCL typu indukcyjnego z cylindrem CST-60/50.2 (Bi-2223 o $I_{c(77\text{ K})} = 625\text{ A}$) chłodzonym techniką w kąpeli²⁹, wymiary w milimetrach

²⁹ Pracownia Technologii Nadprzewodnikowych w Lublinie (IEL)

Ograniczniki rezystancyjne i indukcyjne spełniają taką samą rolę w systemie energetycznym, a ich zasada działania oparta jest na niemal skokowej zmianie rezystancji elementów nadprzewodnikowych podczas przejścia nadprzewodzącego. Podczas zwarć warunki pracy elementów nadprzewodnikowych tych ograniczników są różne. W ograniczniku rezystancyjnym podczas ograniczania prądu cała moc ograniczająca zwarcie wydzielana jest bezpośrednio w nadprzewodniku lub w bezpośrednim jego sąsiedztwie. W ograniczniku indukcyjnym większość mocy ograniczającej zwarcie wydzielana jest w miedzianym uzwojeniu pierwotnym, więc materiał nadprzewodnikowy nagrzewa się w mniejszym stopniu. Wyższa temperatura nadprzewodnika w ograniczniku rezystancyjnym po wyłączeniu prądu zwarciovego skutkuje dłuższym czasem reaktywacji w porównaniu z czasem reaktywacji ogranicznika indukcyjnego.

Badania nad nadprzewodnikowymi ogranicznikami prądowymi prowadzone są w wielu centrach badawczych na całym świecie. Prace te doprowadziły do powstania szeregu projektów i prototypów, których wybrane parametry zostały przedstawione w tab. 20.

Tab. 20. Wybrane projekty i prototypy ograniczników prądów zwarciovych HTS [19][86][87][88]

	typ	moc
ABB	3 fazowy ind., Bi-2212,	1,2 MVA
ABB	3 fazowy rez., Bi-2212,	1,6 MVA
ABB	3 fazowy rez., Bi-2212,	6,4 MVA
Siemens	1 fazowy rez., Y-123,	1 MVA
Siemens	3 fazowy rez., Y-123,	30 MVA
ACCEL	1 fazowy rez., Bi-2212, Y-123,	10 MVA
Hiszpania	1 fazowy hybrydowy, Y-123,	17 MVA
USA	3 fazowy mostkowy, HTS,	26 MVA/ 15 kV
Japonia	1 fazowy rez., Bi-2223	66 kV/ 125 A

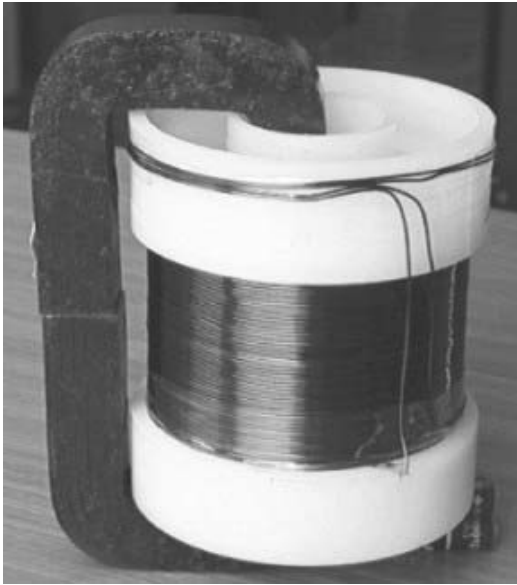
W Pracowni Technologii Nadprzewodnikowych w Lublinie (IEI) zaprojektowano, zbudowano i badano przy udziale autora kilka różnych nadprzewodnikowych ograniczników prądu typu rezystancyjnego ze stosem Bi-2212 o prądzie krytycznym $I_{c(77\text{ K})} = 125\text{ A}$ oraz typu indukcyjnego z cylindrami Bi-2223, których prądy krytyczne $I_{c(77\text{ K, pole własne})}$ są równe 625 A, 112 A, 1,21 kA, 1,25 kA i 2,5 kA [65][89] (tab. 20). Widok oraz

przekrój nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu indukcyjnego, zbudowanego w oparciu o cylinder Bi-2223 o prądzie krytycznym 625 A (77 K) przedstawiają rys. 2.36 i rys. 2.35. W ograniczniku tym cylinder nadprzewodnikowy chłodzony jest techniką w kąpieli ciekłego azotu, a rdzeń magnetyczny pracuje w temperaturze pokojowej. Inny ogranicznik z cylindrem nadprzewodnikowym o $I_{c(77\text{ K})} = 112\text{ A}$ [65] przedstawia rys. 2.37. Szerokość okna rdzenia magnetycznego o przekroju 0,01 m x 0,01 m, który mieści się w cylindrze 112 A (77 K) jest na tyle mała, że uniemożliwia zastosowanie kriostatu azotowego i niezależne chłodzenie cylindra nadprzewodnikowego. Ogranicznik ten umieszczony jest w całości (z rdzeniem magnetycznym) w kąpieli ciekłego azotu.

Tab. 21. Modele i prototypy nadprzewodnikowych ograniczników prądu Pracowni Technologii Nadprzewodnikowych w Lublinie (IEI) [65]

Typ	prąd znam.	moc w stanie rezystywnym	materiał HTS	$I_{c(77\text{ K, pole własne})}$	element HTS, producent
indukcyjny, rdzeń zamknięty rys. 2.36	0..310 A	220..400 VA	cylinder Bi-2223	625 A	CST-60/50.2, CAN Superconductor
indukcyjny, rdzeń zamknięty rys. 2.37	0..55 A	7,5 VA	cylinder Bi-2223	112 A	CST-15/15.2 CAN Superconductor
indukcyjny, rdzeń otwarty	0..600 A	200 VA	cylinder Bi-2223	1, 21 kA	CSL-120.2, CAN Superconductor
indukcyjny, rdzeń zamknięty	0..620 A	1 kVA	cylinder Bi-2223	1,25 kA	CST-60/100.2, CAN Superconductor
indukcyjny, rdzeń zamknięty lub otwarty	0..1,2 kA	2 kVA	cylinder Bi-2223	2,5 kA	2xCST-60/100.2, CAN Superconductor
rezystancyjny ³⁰	50 A	6 kVA	stos Bi-2212	125 A	C02-034 bifilar coil, Nexans,

³⁰ rys. 2.33



Rys. 2.36. Nadprzewodnikowy ogranicznik prądu typu indukcyjnego³¹ z cylindrem CST-60/50.2 chłodzony technika w kąpieli ciekłego azotu



Rys. 2.37. Nadprzewodnikowy ogranicznik prądu³¹ z cylindrem CST-15/15 chłodzony w całości technika w kąpieli ciekłego azotu

Wybrane jako obiekty modelowania krioprzepusty prądowe, elektromagnesy nadprzewodnikowe dla SMES-a i dla separatorów magnetycznych, nadprzewodnikowe separatory magnetyczne i nadprzewodnikowe ograniczniki prądu nie wyczerpują długiej listy urządzeń elektrycznych, w których wykorzystywane są nadprzewodniki, jednak modele numeryczne tych urządzeń mogą posłużyć do tworzenia modeli numerycznych innych urządzeń.

Można przyjąć, że elektrotermiczny model numeryczny dowolnego urządzenia nadprzewodnikowego jest uproszczeniem modelu numerycznego krioprzepustu prądowego. W krioprzepustach prądowych nie można przyjąć większości założeń upraszczających, które ułatwiają modelowanie pozostałych urządzeń nadprzewodnikowych. Występuje w nich największy wśród urządzeń nadprzewodnikowych przedział temperatur w urządzeniu. Z uwagi na zmieniającą się wzdłuż krioprzepustu temperaturę od pokojowej do kriogenicznej, część materiału nadprzewodnikowego w krioprzepuscie pracuje w stanie rezystywnym a pozostała w nadprzewodzącym. Granica pomiędzy stanami nie jest określona geometrycznie i zależy od bilansu ciepła pomiędzy ciepłem odbieranym przez czynnik chłodzący a ciepłem generowanym w pobliżu granicy stanów.

³¹ Pracownia Technologii Nadprzewodnikowych w Lublinie (IEI)

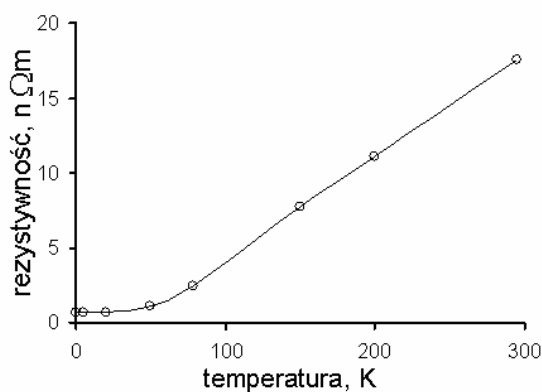
W modelach numerycznych separatorów OGMS powiązано ze sobą zjawiska magnetostacyjne w elektromagnesie ze zjawiskami hydrodynamiczno-magnetostacyjnymi w przestrzeni roboczej separatora. Wzorując się na tych modelach można tworzyć modele numeryczne urządzeń wykorzystujących elektromagnesy nadprzewodnikowe, gdzie zjawiska magnetostacyjne sprzężone są z dowolnymi innymi zjawiskami w przestrzeni roboczej urządzenia.

Model numeryczny elektromagnesu HTS dla SMES-a utworzony został w module magnetostacyjnym programu FLUX2D, podobnie jak część magnetostacyjna jednego z hybrydowych modeli krawędzi wychwyty cząstek w separatorze OGMS.

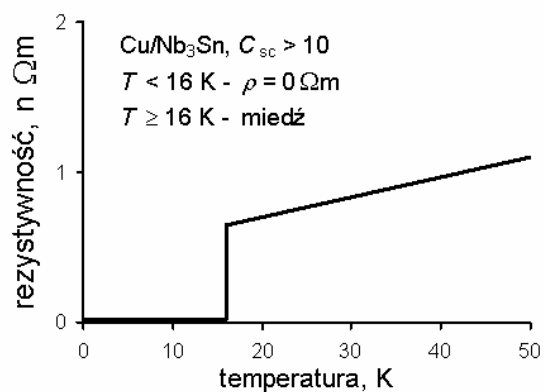
Nadprzewodnikowe ograniczniki prądu typu indukcyjnego i rezystancyjnego pracują zarówno w stanie nadprzewodzącym jak i rezystywnym. Istota ich działania polega na przechodzeniu z jednego stanu do drugiego. Można przyjąć, że definiowanie właściwości elektrycznych i magnetycznych obszarów zawierających nadprzewodniki w innych urządzeniach nadprzewodnikowych jest uproszczeniem definicji właściwości obszarów nadprzewodnikowych w ogranicznikach prądu.

3. MODELOWANIE NUMERYCZNE ZJAWISK ELEKTROTERMICZNYCH

Zagadnienia chłodzenia są kluczowe we wszystkich urządzeniach nadprzewodnikowych. Procesy schładzania do temperatury roboczej i utrzymania jej na określonym poziomie poprzez zapewnienie odpowiedniej izolacji cieplnej i warunków chłodzenia decydują o utrzymaniu urządzeń w stanie nadprzewodzącym. Modelowanie numeryczne zjawisk cieplnych zachodzących w urządzeniach nadprzewodnikowych rozpatrzone zostanie na przykładzie krioprzepustu prądowego chłodzonego parami helu techniką wymuszoną, elektromagnesu nadprzewodnikowego chłodzonego techniką kontaktową oraz nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu rezystancyjnego chłodzonego techniką w kąpieli ciekłego azotu. Opracowane modele numeryczne dotyczą więc wszystkich technik chłodzenia wykorzystywanych w urządzeniach nadprzewodnikowych. Modelowane urządzenia różnią się między sobą zarówno funkcją, geometrią jak i techniką chłodzenia, jednak istnieje wiele cech wspólnych. W środku urządzeń ciepło przepływa głównie na drodze przewodnictwa. Właściwości cieplne obszarów są funkcją temperatury. Różnice występują tylko na brzegach urządzeń będących jednocześnie brzegami obszarów obliczeniowych gdzie różnie zdefiniowany jest przepływ ciepła do czynnika lub urządzenia chłodzącego.



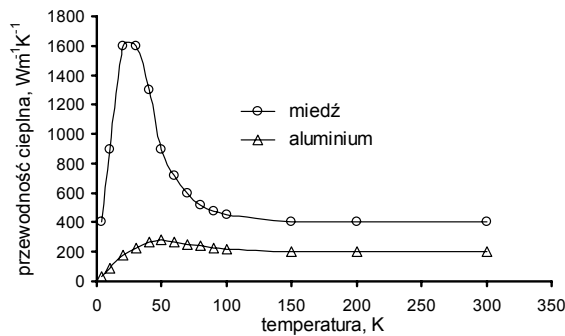
Rys. 3.1. Rezystywność miedzi w funkcji temperatury [57][90]



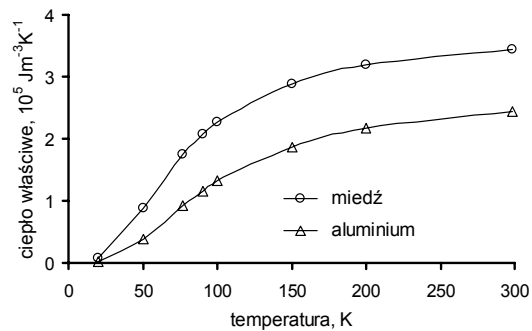
Rys. 3.2. Rezystywność przewodu Cu/Nb₃Sn w funkcji temperatury dla $J = 55 \text{ A/mm}^2$ w polu własnym

Podstawowe różnice w modelowaniu numerycznym zagadnień cieplnych w niskich temperaturach poniżej 150-200 K a modelowaniem zjawisk

cieplnych w temperaturach pokojowych i podwyższonych wynikają ze znacznych zmian wartości parametrów elektrycznych i cieplnych materiałów, z których zbudowane są urządzenia, w funkcji temperatury. Poza dużymi zmianami wartości parametrów również przebiegi tych zmian w funkcji temperatury odbiegają często znacznie od przebiegów zmian tych parametrów w wyższych temperaturach przewidzianych w komercyjnych programach polowych.



Rys. 3.3. Przewodność cieplna Cu i Al w funkcji temperatury [57][90]



Rys. 3.4. Ciepło właściwe Cu i Al w funkcji temperatury [57][90]

Przebiegi zmian rezystywności miedzi oraz przewodności cieplnej i ciepła właściwego miedzi i aluminium przedstawiają rys. 3.1, rys. 3.3 i rys. 3.4. Przedstawione przebiegi są przeciętne dla tych materiałów, ponieważ istnieje bardzo silna zależność wartości parametrów od czystości materiałów i domieszkowania. Dla przykładu maksimum przewodności cieplnej miedzi wynoszące $1600 Wm^{-1}K^{-1}$ (rys. 3.3) może zawierać się w przedziale od 800 do $15000 Wm^{-1}K^{-1}$ [90]. Pojawia się więc dodatkowy problem obliczeniowy przy tworzeniu modelu numerycznego: wybór odpowiedniej charakterystyki z całego przedziału możliwych charakterystyk. W przypadku nowych materiałów, których charakterystyki temperaturowe nie są znane, pojawia się problem zamodelowania numerycznego właściwości fizycznych obszarów z tymi materiałami. Doświadczenie nabyte podczas tworzenia podobnych modeli numerycznych pozwala na wstępne, przybliżone określenie tych właściwości, które zostaną określone dokładnie podczas weryfikacji eksperymentalnej modelu numerycznego urządzenia.

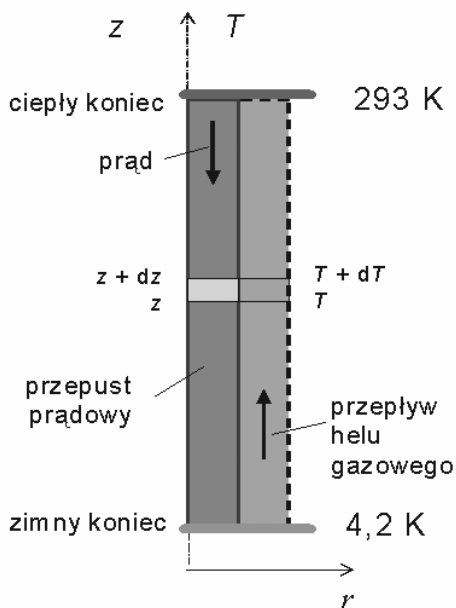
Można przyjąć, że dla temperatur powyżej 70 K rezystywność miedzi wzrasta liniowo (rys. 3.1), dla temperatur powyżej 150 K przewodność cieplna miedzi i aluminium jest stała oraz dla temperatur powyżej 200 K ciepło właściwe miedzi i aluminium wzrasta liniowo. Dla temperatur niższych odpowiednio od 70 K, 150 K czy 200 K przebiegi zmian tych trzech

parametrów odbiegają od przebiegów, jakie można zamodelować bezpośrednio w narzędziowych programach polowych takich jak PC-OPERA czy FLUX2D. Ponieważ praca urządzeń nadprzewodnikowych odbywa się zwykle w temperaturach niższych od 77 K, powstaje problem definiowania właściwości fizycznych regionów. Program FLUX2D wyposażony jest w narzędzia umożliwiające zmianę kodu modułu obliczeniowego przez wprowadzenie tzw. procedur użytkownika (USER SUBROUTINES [91]). Pozwala to na bardzo rozbudowane kształtowanie parametrów fizycznych regionów, charakterystyk źródeł ciepła czy warunków brzegowych. Procedury użytkownika napisane w języku FORTRAN [92] zgodnie z informacjami zawartymi w dokumentacji FLUX2D [91] zastępują odpowiednie procedury standardowe programu FLUX2D. Po skompilowaniu procedur użytkownika tworzony jest nowy moduł obliczeniowy RESG_3P (lub RESG_6P) zastępujący standardowy moduł obliczeniowy RESGEN oraz tworzony jest nowy postprocesor EXPG_3P (lub EXPG_6P) zastępujący standardowy postprocesor EXPGEN. Wykorzystanie w obliczeniach odpowiednich, przygotowanych wcześniej procedur użytkownika dotyczących właściwości fizycznych obiektów obliczeniowych deklarowane jest w bazie danych materiałowych CSLMAT, a innych w preprocesorze PROPHY (lub MODPRO) programu FLUX2D. Jeżeli procedury użytkownika są procedurami z parametrami to wartości tych parametrów wprowadzane są w preprocesorze PROPHY (lub MODPRO).

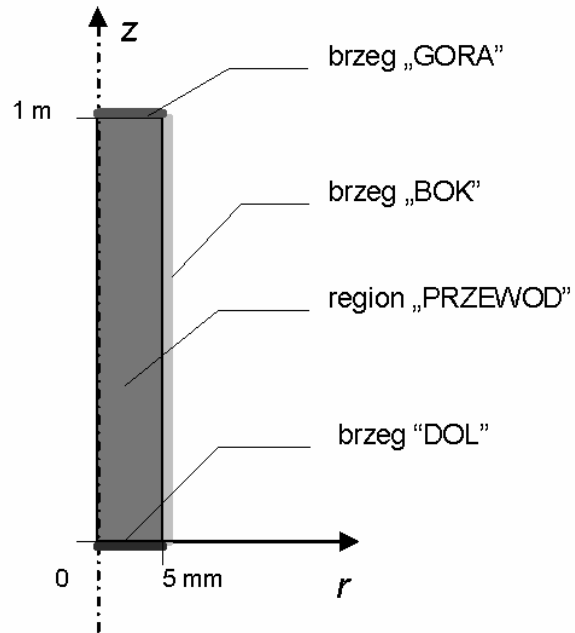
2-parametrowa procedura USRKTH napisana przez autora [93], definiuje wartości przewodności cieplnej w funkcji temperatury zgodnie z danymi z rys. 3.3. Pierwszy parametr pozwala wybrać rodzaj materiału, drugi parametr – wartość współczynnika zapelnienia uzwojenia λ_{sc} . Inne 2-parametrowe procedury takie jak USRRCP definiujące wartości ciepła właściwego czy przewodności elektrycznej USRSIG utworzone są w sposób podobny do procedury USRKTH zgodnie z danymi przedstawionymi odpowiednio na rys. 3.4, rys. 3.1 albo rys. 3.2.

3.1. Elektrotermiczny model numeryczny krioprzepustu prądowego

Model numeryczny dotyczy krioprzepustów prądowych chłodzonych helem gazowym techniką wymuszoną: konwencjonalnego (Cu – rys. 2.23) z nie stopniowanym przekrojem poprzecznym oraz nadprzewodnikowego (Cu+LTS – rys. 2.23) również z nie stopniowanym przekrojem poprzecznym. Krioprzepust wykonany z pręta Cu lub Cu/Nb₃Sn o średnicy = 0,01 m i długości = 1 m, chłodzony jest parami helu przepływającymi wzdłuż krio-



Rys. 3.5. Krioprzepust prądowy chłodzony heliem gazowym



Rys. 3.6. Obiekty obliczeniowe krioprzepustu prądowego (FLUX2D)

przepustu (rys. 3.5). Taki krioprzepust prądowy ma symetrię obrotową, więc jego model numeryczny można utworzyć w sprzężonym elektrotermicznym (electrothermal) module obliczeniowym programu FLUX2D.

Moduł ten wiążący zagadnienia przewodnictwa elektrycznego (EC: electric conduction) z zagadnieniami cieplnymi przejściowymi (TT: transient thermal) składa się z dwóch części: elektrycznej i termicznej. Obliczenia prowadzone są na zmianę w obu częściach, a zmiany parametrów z jednej części są automatycznie przekazywane do drugiej. Przestrzenna zmiana rozkładu rezystywności krioprzepustu (wynikająca ze zmiany rozkładu temperatur w krioprzepuście) wpływa na zmianę rozkładu ciepła Joule'a generowanego przez prąd płynący w krioprzepuście, a to z kolei wpływa na zmianę rozkładu temperatury i zmienia rozkład rezystywności. Ciepło Joule'a generowane w wycinku dz krioprzepustu przez przepływający prąd elektryczny jest odbierane przez hel gazowy przepływający wzdłuż krioprzepustu. Temperatura helu na drodze dz wzrasta o dT . Intensywność chłodzenia krioprzepustu może być regulowana poprzez zmianę prędkości przepływu czynnika chłodzącego. Jeżeli ciepło generowane w wycinku dz krioprzepustu jest większe niż ciepło odbierane przez wycinek dz przepływu helu, to temperatura w wycinku wzrasta. Można temu zapobiec zwiększając prędkość przepływu helu. Prędkość przepływu helu nie jest parametrem programu FLUX2D. Parametr ten jest pośrednio uwzględniany w obliczeniach przez odpo-

wiednie zdefiniowanie temperatury otoczenia w procedurze użytkownika USRAMB.

Parametry takie jak przewodność elektryczna i cieplna oraz ciepło właściwe są funkcjami temperatury. Zależności te można zdefiniować w procedurach użytkownika USRSIG, USRKTH i USRRCP.

Rys. 3.6 przedstawia geometrię krioprzepustu i rozmieszczenie obiektów przy obliczeniach w programie FLUX2D. Obiekty typu brzeg (shell) są definiowane na brzegu obszaru obliczeniowego. Brzeg jest specjalnym obiektem, który może spełniać różne funkcje w zależności od aplikacji.

W elektrycznej części obliczeniowej zmienną podstawową jest napięcie U a rozwiązywane jest równanie [91]:

$$(3-1) \quad \operatorname{div}(\sigma \cdot \operatorname{grad} U) = 0$$

gdzie σ oznacza przewodność elektryczną ($\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$), a U – napięcie (V).

W części elektrycznej brzegi „GORA” i „DOL” zostały użyte do zdefiniowania prądu elektrycznego wpływającego i wypływającego z krioprzepustu. Prąd elektryczny płynie od brzegu „GORA” do brzegu „DOL” przez „PRZEWOD” – obiekt typu region (surfacic). Ciepło generowane w regionie „PRZEWOD” przez prąd elektryczny jest przekazywane przez brzeg „BOK” do przepływającego gazu chłodzącego.

Brzegi „GORA” i „DOL”, używane w elektrycznej części obliczeniowej, są ignorowane w części termicznej. „BOK”, aktywowany w części termicznej jest ignorowany w części elektrycznej. Region „PRZEWOD” jest używany w obu częściach obliczeniowych. W regionie „PRZEWOD” zdefiniowana jest przewodność cieplna i elektryczna oraz ciepło właściwe.

W termicznej części obliczeniowej zmienną podstawową jest temperatura T a rozwiązywane jest równanie [91] [94]:

$$(3-2) \quad c_v \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + \operatorname{div}(-k \cdot \operatorname{grad} T) = Q_H$$

gdzie c_v oznacza ciepło właściwa ($\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \text{K}^{-1}$), T – temperaturę (K), t – czas (s), k – przewodność cieplną ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$), a Q_H – gęstość objętościowa źródła ciepła (W/m^3).

Współczynnik wymiany ciepła przez konwekcję i radiację oraz temperatura odniesienia są definiowane dla brzegu „BOK”. Warunki na brzegu „BOK” są opisane równaniem³² [91][94]:

$$(3-3) \quad k \cdot \frac{dT}{dn} = -\Phi_H - h \cdot (T - T_a) - \varepsilon \cdot (T^4 - T_a^4)$$

gdzie k oznacza przewodność cieplną ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$), T – temperaturę (K), d/dn – pochodną normalną, Φ_H – strumień ciepła dopływający z zewnątrz (W/m^2), h – współczynnik konwekcji cieplnej ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$), ε – współczynnik promieniowania cieplnego, a T_a – temperaturę otoczenia (K).

Procedura USRKTH definiująca przewodność cieplną materiału w funkcji temperatury jest używana w termicznej części obliczeniowej, w której temperatura jest zmienną podstawową. Wartość temperatury, w kelwinach, przechowywana jest w zmiennej VR w obszarze wspólnym INTPOL.

Procedura USRSIG definiująca przewodność elektryczną materiału w funkcji temperatury jest używana w elektrycznej części obliczeniowej, w której temperatura jest zmienną pomocniczą. Wartość temperatury, w kelwinach, przechowywana jest w zmiennej VA w obszarze wspólnym INTPOL.

Procedura USRRCP definiująca ciepło właściwe materiału w funkcji temperatury jest używana w części termicznej, w której temperatura jest zmienną podstawową. Wartość temperatury, w kelwinach, przechowywana jest w zmiennej VR w obszarze wspólnym INTPOL.

W krioprzepuscie chłodzonym parami helu ciepło odprowadzane jest z krioprzepustu przez konwekcję wymuszoną. W obliczeniach podstawowych temperatura otoczenia T_a może mieć ustaloną wartość, gdy natomiast w równaniu definiującym warunki brzegowe (3-3) w chłodzeniu wymuszonym temperatura otoczenia ma wartość nieznaną, trudną do oszacowania i zależną od prędkości gazu chłodzącego. autorska, 4-parametrowa procedura USRAMB (rys. 3.7) pozwala uzmiennić temperaturę otoczenia wprowadzając jej zależność od temperatury na brzegu „BOK” oraz od współrzędnej osiowej krioprzepustu. Procedura USRAMB jest używana do zdefiniowania temperatury otoczenia T_a w termicznej części obliczeniowej, w którym temperatura T jest zmienną podstawową. Wartość temperatury T , w kelwinach jest przechowywana w zmiennej VR w obszarze wspólnym

³² błąd jednostek w dokumentacji programu FLUX2D [91]

INTPOL. Wartość osiowej współrzędnej punktu z (w metrach), na brzegu „BOK” jest przechowywana w zmiennej $XYP(2)$ w obszarze wspólnym INTPOL.

```

SUBROUTINE USRAMB(UCOEF , AMB)
REAL  UCOEF(1), AMB
INCLUDE 'INTPOL'
REAL Tk, Tp, tt, Gk, Gp
REAL Z, T
Tp = UCOEF(2)
Tk = UCOEF(3)
Gp = UCOEF(4)
Gk = UCOEF(5)
T = SNGL(VR)
Z = SNGL(XYP(2))
tt = (Tk-Tp)*Z + Tp
AMB = (T-Gp)*(Tk-Gp)/(Gk-Gp) + Gp
if (tt .LE. AMB) then AMB = tt
AMB = AMB - 273
RETURN
END

```

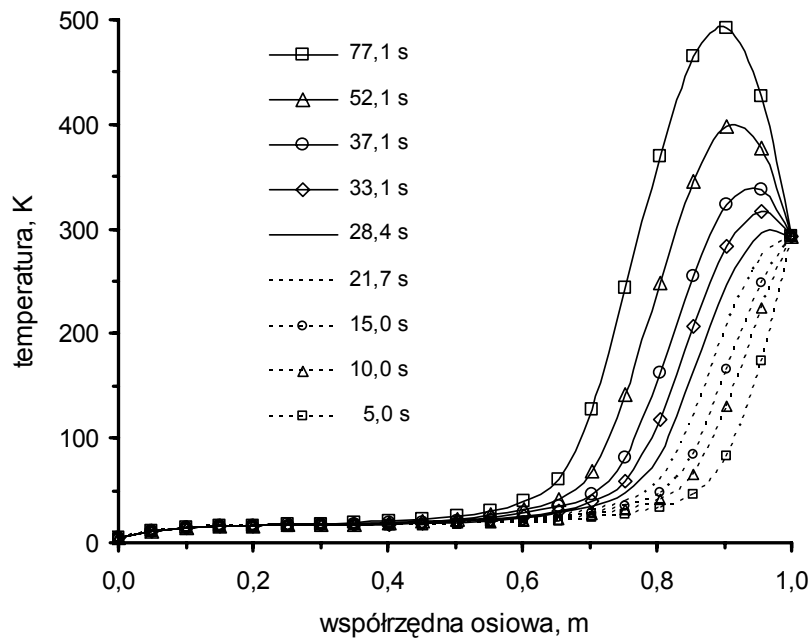
Rys. 3.7. 4-parametrowa procedura użytkownika **USRAMB** (FORTRAN) do określenia temperatury otoczenia na brzegu

Zmiany rozkładu temperatur w czasie w krioprzepuszcie miedzianym przedstawia rys. 3.8. Dla gęstości prądu = 57 A/mm^2 i przy ustalonej prędkości przepływu gazu chłodzącego = 2 m/s ilość ciepła odprowadzanego do chłodzącego gazu jest mniejsza niż ilość ciepła generowana przez przepływający prąd w krioprzepuszcie, więc temperatura krioprzepustu wzrasta.

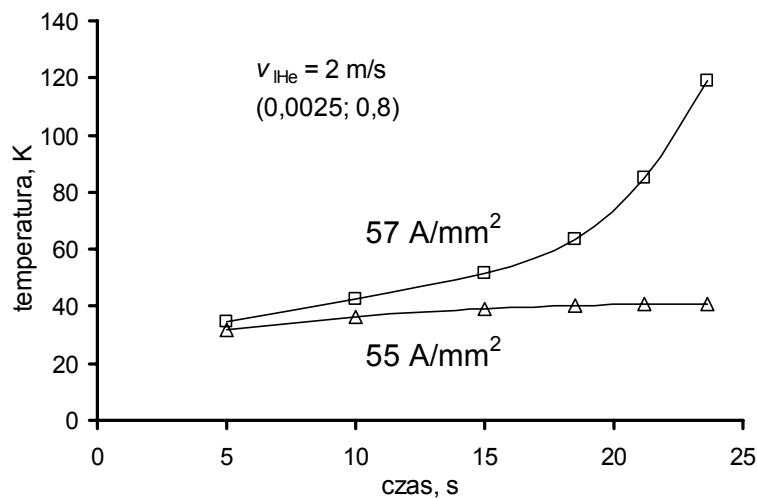
Zmianę temperatury w punkcie $(0,0025; 0,8)$ krioprzepustu dla różnych gęstości prądu i dla prędkości przepływu gazu chłodzącego = 2 m/s przedstawia rys. 3.9. Dla gęstości prądu = 57 A/mm^2 ilość ciepła generowanego w krioprzepuszcie jest większa niż ciepła odprowadzanego do gazu chłodzącego i temperatura wzrasta z upływem czasu. Dla gęstości prądu = 55 A/mm^2 temperatura w badanym punkcie krioprzepustu zmierza, po początkowym wzroście, do wartości ustalonej. Dla ustalonej intensywności chłodzenia istnieje więc graniczna gęstość prądu w krioprzepuszcie, której przekroczenie powoduje gwałtowny wzrost temperatury w krioprzepuszcie.

Obliczone rozkłady temperatury w krioprzepuszcie dla różnych prędkości przepływu helu oraz dla ustalonej gęstości prądu = 55 A/mm^2 przedstawia rys. 3.10. Dla prędkości przepływu helu = 2 m/s maksymalna

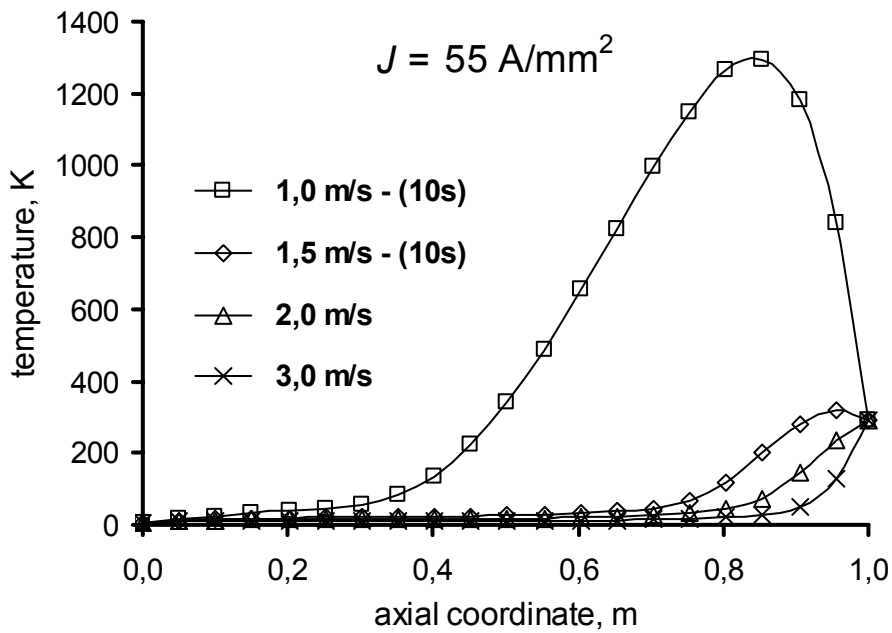
gęstość prądu, przy której krioprzepust pracuje prawidłowo jest równa 55 A/mm^2 . Jeżeli prędkość przepływu gazu zostanie zmniejszona, spowoduje to pogorszenie warunków chłodzenia i temperatura krioprzepustu wzrośnie. Zwiększenie przepływu gazu poprawia warunki chłodzenia i temperatura krioprzepustu obniża się.



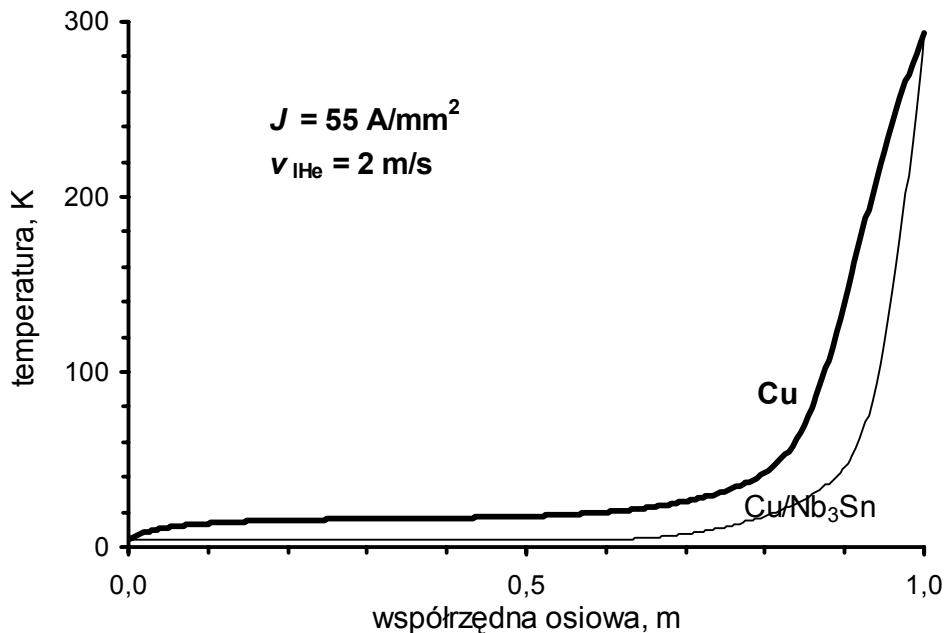
Rys. 3.8. Zmiany rozkładu temperatury, w czasie, na brzegu „BOK”, gęstość prądu w krioprzepuszcie = 57 A/mm^2 , prędkość helu = 2 m/s



Rys. 3.9. Temperatura w punkcie $(0,0025; 0,8)$ krioprzepustu w funkcji czasu dla różnych gęstość prądu, przepływ helu = 2 m/s



Rys. 3.10. Rozkłady temperatury w krioprzepływie dla różnych prędkości przepływu helu, gęstość prądu = 55 A/mm^2



Rys. 3.11. Rozkłady temperatur w krioprzepływie miedzianym (Cu) i krioprzepływie (Cu/Nb₃Sn) dla gęstości prądu = 55 A/mm^2 , prędkość helu = 2 m/s

Rezystywność krioprzepływu Cu/Nb₃Sn (miedziano-nadprzewodnikowego) zdefiniowana została w procedurze USRSIG zgodnie z danymi na

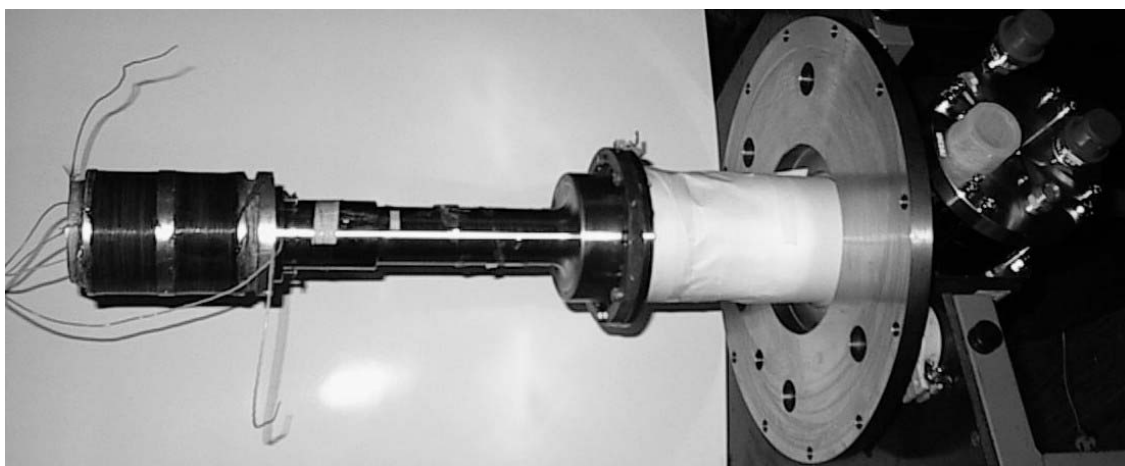
rys. 3.2 dla gęstości prądu = 55 A/mm^2 . W obliczeniach z inną gęstością prądu w procedurze USRSIG należy zmienić wartość temperatury poniżej której krioprzepust $\text{Cu/Nb}_3\text{Sn}$ wykazuje zerową rezystywność. Wartość rezystywności jako funkcja trzech zmiennych zastąpiona została tutaj funkcją jednej zmiennej (temperatury) z parametrem (gęstością prądu). Wymaga to odpowiednich warunków brzegowych w elektrycznej części modelu numerycznego. Jeżeli zostałaby ustalona warunkami brzegowymi różnica napięć na końcach krioprzepustu, to prąd zmieniałby się w trakcie obliczeń wraz ze zmianą rezystywności wywołanej zmianą temperatury. Zamiast napięciowych warunków brzegowych zdefiniowano prąd w krioprzepuście. Tak zdefiniowana procedura USRSIG i taka organizacja obliczeń pozwala uwzględnić zależność rezystywności krioprzepustu $\text{Cu/Nb}_3\text{Sn}$ od temperatury, prądu i własnego pola magnetycznego. Nadprzewodnik w krioprzepuście $\text{Cu/Nb}_3\text{Sn}$ znajduje się częściowo w stanie nadprzewodzącym a częściowo w stanie rezystywnym. Różnice w rozkładzie temperatury pomiędzy krioprzepustem z Cu i z $\text{Cu/Nb}_3\text{Sn}$ w takich samych warunkach chłodzenia przedstawia rys. 3.11. Niższa temperatura krioprzepustu $\text{Cu/Nb}_3\text{Sn}$ wynika z braku strat Joule'a w części krioprzepustu od strony zimnego końca, gdzie nadprzewodnik jest w stanie nadprzewodzącym i ma zerową rezystywność. Analizując dane na rys. 3.11 można przyjąć, że na długości od 0 do ok. 0,63 m krioprzepust prądowy $\text{Cu/Nb}_3\text{Sn}$ znajduje się w stanie nadprzewodzącym.

3.2. Model numeryczny chłodzenia kontaktowego elektromagnesu LTS

Karkas elektromagnesu nadprzewodnikowego **I**, którego parametry zamieszczone są w tab. 16, przedstawiony na rys. 2.28 jest wykonany ze stopu aluminium, a uzwojenia nadprzewodnikowe nawinięte zostało bez kanałów chłodzących. Elektromagnes ten przeznaczony pierwotnie do chłodzenia techniką w kąpeli ciekłego helu posiada cechy umożliwiające chłodzenie go techniką kontaktową.

Przeprowadzono (przy współudziale autora) badania eksperymentalne szybkości schładzania tego elektromagnesu nadprzewodnikowego metodą kontaktową [61][95][70]. Elektromagnes zamocowany do głowicy kriochłodziarki przedstawiony jest na rys. 3.12. Z uwagi na długotrwały (kilka godzin [70][95]) proces schładzania elektromagnesu do stanu nadprzewodzącego pomiar i rejestracja zmian temperatury odbywała się z wykorzystaniem 8-kanalowego przyrządu pomiarowego **218 Temperature Monitor** (LakeShore) współpracującego z komputerem [96]. Do

pomiaru temperatury wykorzystywane były kalibrowane rezystancyjne czujniki pomiarowe Cernox. Wyniki pomiarów eksperymentalnych posłużyły do weryfikacji modelu numerycznego chłodzenia elektromagnesu nadprzewodnikowego techniką kontaktową. Badany elektromagnes nadprzewodnikowy połączony z kriochłodziarką ma symetrię obrotową, więc trójwymiarowy układ rzeczywisty można było analizować w dwuwymiarowej przestrzeni jego przekroju osiowego. Do utworzenia modelu numerycznego wykorzystano moduł cieplny przejściowy TT (transient thermal) programu FLUX2D. W module tym zmienną podstawową jest temperatura T , a rozwiązywane jest równanie (3-2). Na brzegu „STRATY” rozwiązywane jest równanie brzegowe (3-3).

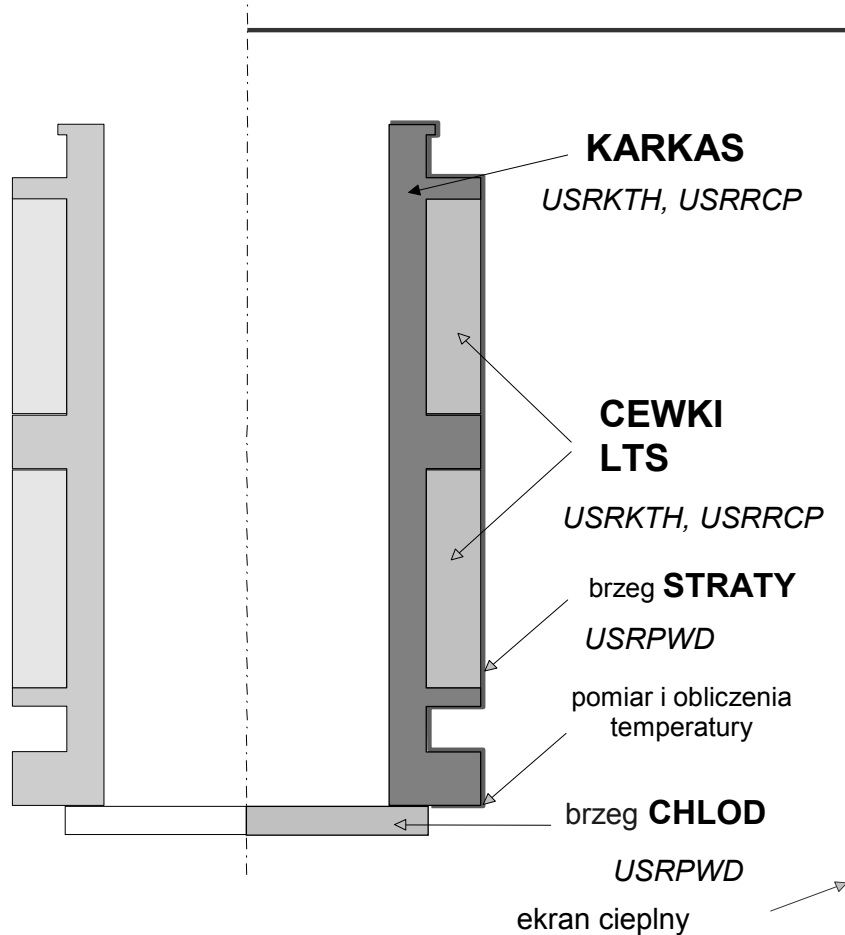


Rys. 3.12. Elektromagnes nadprzewodnikowy Nb-Ti separatora OGMS podłączony do głowicy kriochłodziarki SRDK 408³³

Geometrię modelu numerycznego przedstawia rys. 3.13. Model numeryczny składa się z czterech obiektów odwzorowujących odpowiednio: II stopień kriochłodziarki („CHLOD”), karkas elektromagnesu („KARKAS”), uzwojenie nadprzewodnikowe („CEWKI”) oraz wymianę ciepła z ekranem cieplnym („STRATY”). Ciepło odbierane jest z układu przez region „CHLOD” i częściowo przez promieniowanie przez brzeg „STRATY”. Ciepło transportowane jest do regionu „CHLOD” i brzegu „STRATY” na drodze przewodnictwa cieplnego. Region „KARKAS” wykonany jest ze stopu aluminium i przyjęto w obliczeniach, że przewodność cieplna oraz ciepło właściwe tego regionu odpowiada danym prezentowanym na rys. 3.3 i rys. 3.4 dla aluminium. Region „CEWKI” nie ma jednolitej budowy. W przekroju tego regionu występuje nadprzewodnik Nb-Ti, matryca miedziana, materiały izolacyjne oraz materiał

³³ Pracownia Technologii Nadprzewodnikowych w Lublinie (IEI)

impregnujący. Przyjęto, że właściwości cieplne przewodu Cu/Nb-Ti odpowiadają danym prezentowanym dla miedzi na rys. 3.3 i rys. 3.4.

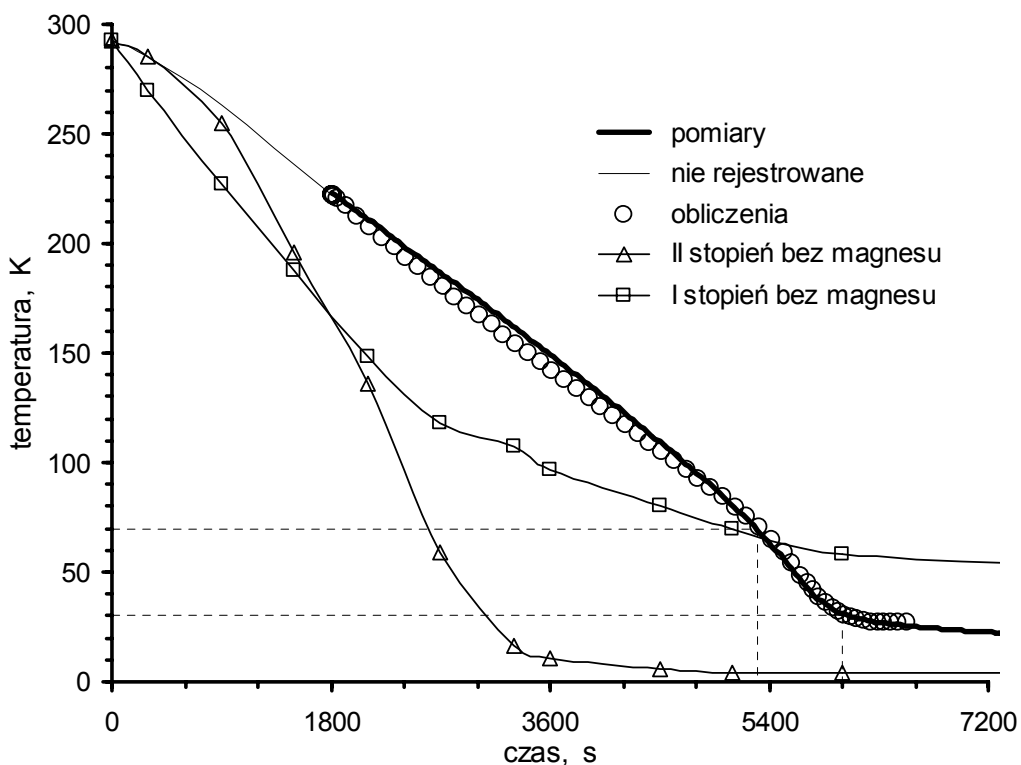


Rys. 3.13. Geometria modelu numerycznego chłodzenia kontaktowego elektromagnesu LTS

Przewodność cieplna oraz ciepło właściwe tego regionu są mniejsze niż dla jednolitego materiału – miedzi. Zastosowano tutaj współczynnik proporcjonalny do współczynnika wypełnienia uzwojenia λ_{sc} . Poprzez brzeg „STRATY” odbywa się wymiana ciepła na drodze promieniowania pomiędzy elektromagnesem nadprzewodnikowym a ekranem cieplnym połączonym z I stopniem kriochłodziarki. Kierunek przepływu ciepła zależy od różnicy temperatur ekranu cieplnego i elektromagnesu. Na początku schładzania elektromagnesu ekran cieplny wspomaga chłodzenie [70], ponieważ efektywność chłodzenia na I stopniu jest większa niż na II stopniu kriochłodziarki. Ekran cieplny uzyskuje więc szybko niższą temperaturę niż elektromagnes i ciepło przekazywane jest przez promieniowanie od

cieplejszego brzegu „STRATY” do zimniejszego ekranu cieplnego. Przyjęto, że minimalna temperatura, do jakiej zostaje schłodzony ekran cieplny to 40 K. Od momentu, gdy temperatura elektromagnesu staje się niższa od temperatury ekranu, ciepło przekazywane jest od ekranu cieplnego do zimniejszego elektromagnesu.

Przebiegi zależności od temperatury przewodności cieplnej oraz ciepła właściwego materiałów, z których wykonany jest elektromagnes odbiegają od standardowych funkcji programu FLUX2D, więc parametry regionów „KARKAS” i „CEWKI” zdefiniowane zostały przy wykorzystaniu procedur USRKTH oraz USRRCP z odpowiednimi parametrami [93]. Gęstości mocy odbieranej przez układ chłodzenia z regionu „CHŁOD” oraz brzegu „STRATY” zdefiniowane zostały w 7-parametrowej procedurze użytkownika USRPWD [93]. Dobór odpowiednich parametrów procedury USRPWD pozwolił na zamodelowanie gęstości mocy cieplnej odbieranej przez kriochłodziarkę w funkcji temperatury w przedziale od kilku do kilkuset kelwinów, dysponując tylko bardzo ograniczonymi danymi podawanymi przez producenta. Dane te to: efektywność chłodzenia II stopnia kriochłodziarki = 1 W w temperaturze 4,2 K oraz efektywność chłodzenia I stopnia = 34 W w temperaturze 40 K.



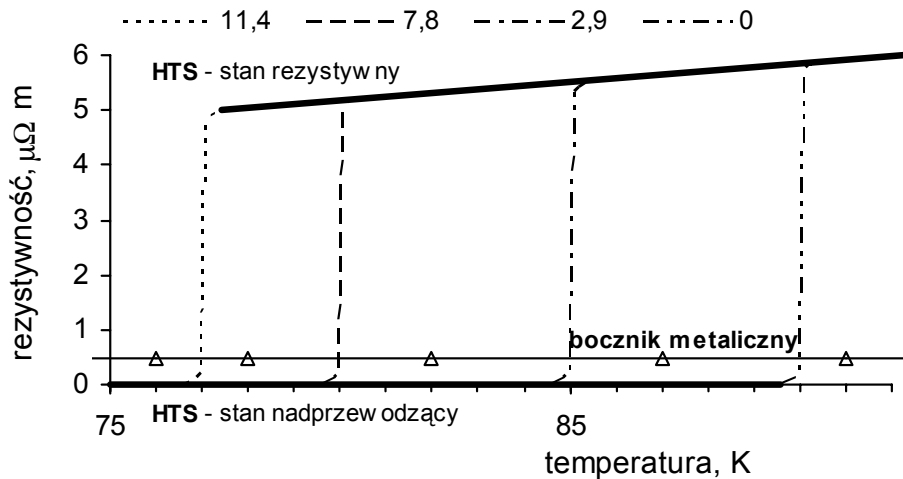
Rys. 3.14. Przebieg zmian temperatury w elektromagniesie LTS i w modelu numerycznym

Przebieg zmian temperatury w punkcie zamocowania czujnika pomiarowego, zaznaczonym na rys. 3.13, w elektromagnesie LTS i w modelu numerycznym przedstawia rys. 3.14. Można zaobserwować dużą zbieżność obliczeń numerycznych z wynikami eksperymentalnymi. Bardzo charakterystyczny jest wyraźnie zauważalny wzrost szybkości schładzania elektromagnesu w przedziale temperatur od 70 K do 30 K (czas od 5300 s do 6000 s) pomimo malejącej mocy chłodzenia krio-chłodziarki i dodatkowo, od pewnej temperatury, podgrzewania przez ekran cieplny. Taki podobny, co do charakteru wzrost szybkości schładzania obserwowany był podczas innego typu chłodzenia tego elektromagnesu – chłodzenia techniką w kąpeli ciekłego helu. Podczas nalewania (ze stałą szybkością) ciekłego helu do wstępnie schłodzonego kriostatu obniżanie temperatury jest bardzo powolne. Po schłodzeniu do pewnej temperatury następuje gwałtowny spadek temperatury układu do 4,2 K. Wzrost szybkości schładzania wynika przede wszystkim ze wzrostu przewodności cieplnej materiałów elektromagnesu przy obniżaniu temperatury - ujemnej pochodnej przewodności cieplnej względem temperatury. Ujemna pochodna przewodności cieplnej prowadzi do błędów obliczeniowych, gdy nie ma ograniczenia kroku obliczeniowego. Ograniczenie kroku czasowego wydłuża bardzo znacznie czas obliczeń. Aby tego uniknąć obliczenia rozpoczynane były bez ograniczenia kroku czasowego, a przerwane (po wystąpieniu błędu) obliczenia były wznowiane ze zmniejszonym krokiem obliczeniowym i wprowadzonym ograniczeniem na maksymalną wartość kroku obliczeniowego. W omawianym modelu numerycznym przerwane obliczenia wznowiane były z krokiem obliczeniowym = 1 s i ograniczeniem wzrostu kroku do 10 s.

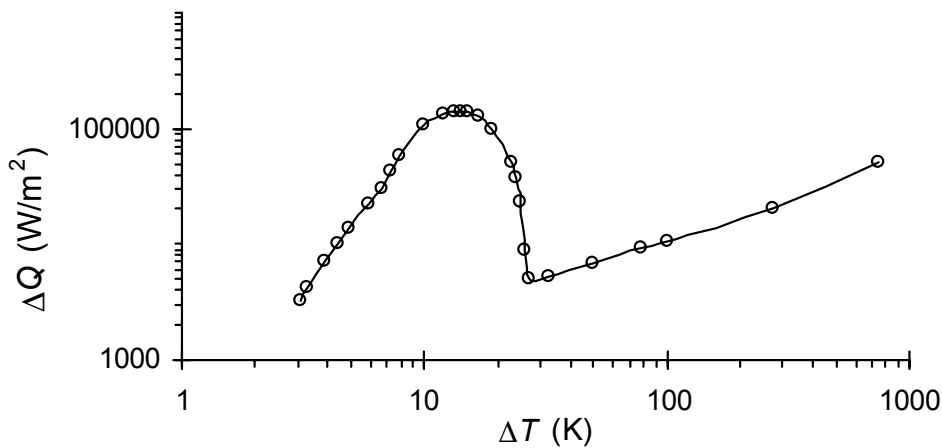
3.3. Elektrotermiczny model numeryczny rezystancyjnego ogranicznika prądu

Rezystancyjny ogranicznik prądu (SFCL) w postaci stosu wykonanego z rury Bi-2212, pokrytej bocznikiem metalicznym, odpowiednio naciętej w uzwojenie bifilarne przedstawia rys. 2.34. Stos wyprodukowany został przez Nexans i ma symbol C02-34-bifilar coil (rys. 2.11). W stanie nadprzewodzącym materiał HTS w ograniczniku ma bardzo małą rezystywność w porównaniu z bocznikiem metalicznym (rys. 3.15) i prąd płynie wtedy głównie przez materiał HTS. W stanie rezystywnym materiał HTS ma dużo większą rezystywność w porównaniu z bocznikiem metalicznym i prąd płynie wtedy głównie przez bocznik. Prąd płynący przez SFCL prawie nie generuje ciepła gdy HTS jest w stanie nadprzewodzącym. Po

przejściu nadprzewodzącym, gdy ogranicznik jest w stanie rezystywnym, płynący przez niego prąd generuje olbrzymie ilości ciepła. Podczas ograniczania prądu przez ogranicznik nie można przegrzać ogranicznika i trzeba utrzymać krótki czas reaktywacji po wyłączeniu prądu przez wyłącznik.



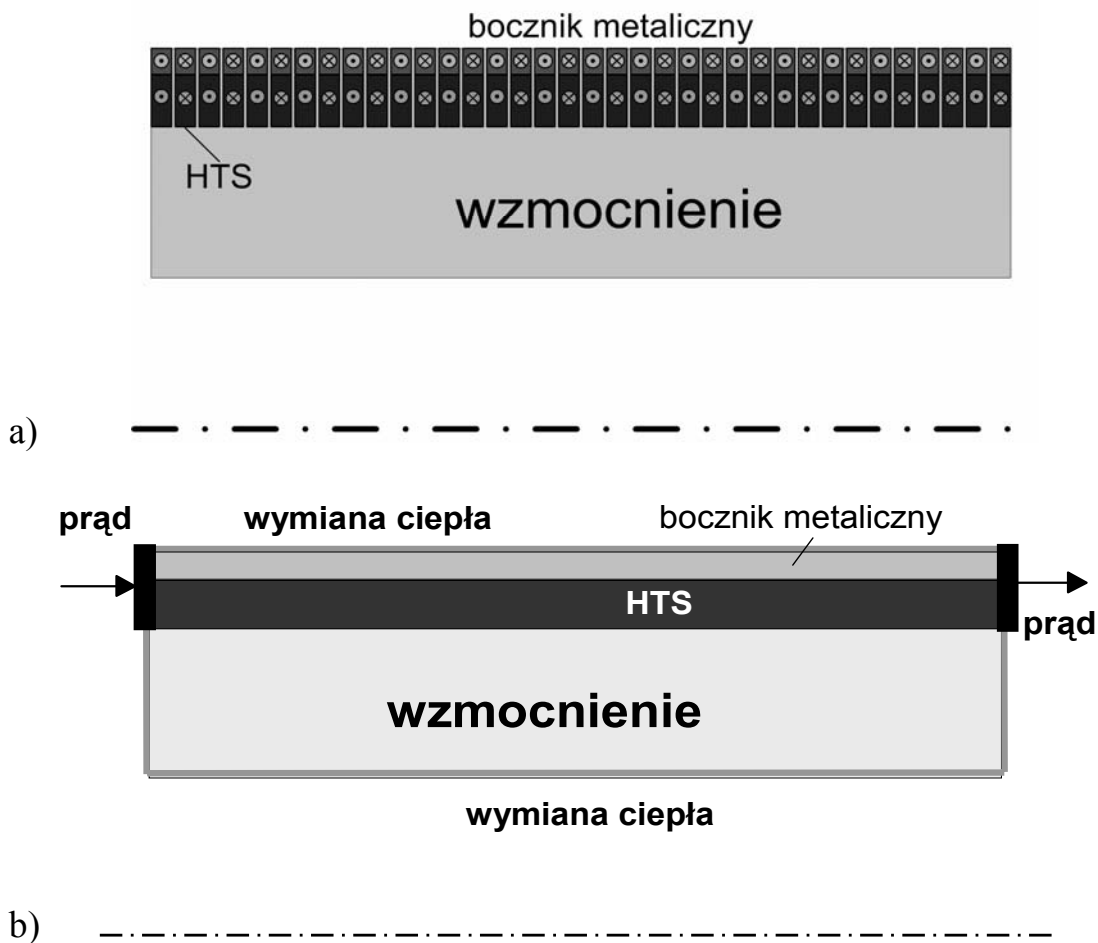
Rys. 3.15. Rezystywność bocznika metalicznego [97] i HTS [99] w funkcji temperatury dla różnych gęstości prądu (A/mm^2)



Rys. 3.16. Strumień ciepła ΔQ przepływający pomiędzy powierzchnią metalową a ciekłym azotem (LN_2) o temp. 77 K w funkcji różnicy temperatury ΔT pomiędzy powierzchnią z LN_2 [98], [99] dla chłodzenia techniką w kąpieli ciekłego azotu

Rezystywny SFCL chłodzony jest techniką w kąpieli ciekłego azotu (77 K). Strumień ciepła ΔQ przepływający pomiędzy powierzchnią metalową a ciekłym azotem (LN_2) o temperaturze 77 K w funkcji różnicy temperatury ΔT pomiędzy powierzchnią z LN_2 [99] przedstawia rys. 3.16. Pomocniczy model numeryczny w module magnetodynamicznym programu

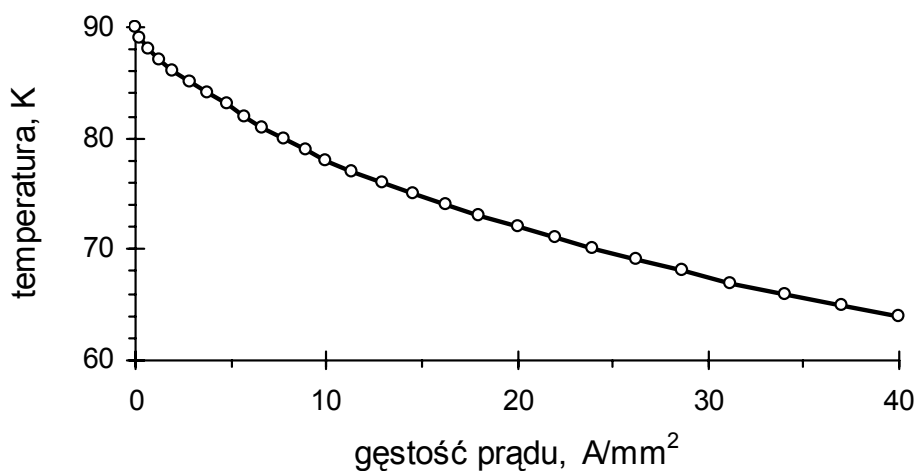
FLUX2D [94] sprzężonym z obwodem zewnętrznym został użyty do przeanalizowania rozkładu pola magnetycznego w nadprzewodnikowym uzwojeniu bifilarnym ogranicznika prądu. Analiza potwierdziła, że pole magnetyczne działające na nadprzewodnik w tym ograniczniku można uważać za pole własne. Geometria magnetodynamicznego modelu numerycznego przedstawiona została na rys. 3.17a. Obwód zewnętrzny wykorzystany został w tym modelu do wymuszenia prądu prostopadłego do powierzchni przekroju osiowego.



Rys. 3.17. Uprozczone geometrie modeli numerycznych rezystancyjnego SFCL [99] we FLUX2D : a) polowo-obwodowy model magnetodynamiczny, b) polowy, elektrotermiczny sprzężony model numeryczny

Właściwy model numeryczny rezystancyjnego SFCL powstał, podobnie jak w przypadku krioprzepustu prądowego, w sprzężonym elektrotermicznym module obliczeniowym programu FLUX2D. Moduł ten wiąże zagadnienia przewodnictwa elektrycznego z zagadnieniami cieplnymi przejściowymi [94] [91]. Rzeczywista geometria ogranicznika zbliżona do

tej prezentowanej na rys. 3.17a została zastąpiona równoważną pod względem energii i gęstości prądu uproszczoną geometrią z rys. 3.17b. Współczynniki przeliczeniowe dla prądu i napięcia są równe odpowiednio 0,0164 i 60,95 [99]. Model numeryczny składa się z 3 regionów brzegowych do wprowadzania i wyprowadzania prądu z ogranicznika i transferu ciepła do ciekłego azotu oraz 3 regionów reprezentujących boczniak metaliczny, wzmocnienie i HTS. Ciepło generowane przez prąd przepływający przez HTS i boczniak metaliczny odprowadzane jest do LN_2 przez region „wymiana ciepła”.



Rys. 3.18. Temperatura przełączania stosu bifilarnego Bi-2212 w funkcji gęstości prądu (pole magnetyczne własne) [100][101][102][103][104][99].

W regionach „boczniak metaliczny” i „HTS” zdefiniowane są takie parametry jak: rezystywność elektryczna, przewodność cieplna i ciepło właściwe. W regionie „wzmocnienie” – tylko przewodność cieplna i ciepło właściwe [99], [100]-[104]. Rezystywność regionu „HTS” i strumień ciepła przepływający przez region „wymiana ciepła” są zaawansowanymi funkcjami temperatury i nie mogą być zdefiniowane prostymi funkcjami dostępnymi w programie FLUX2D. Parametry te zostały zdefiniowane z wykorzystaniem procedur USRSIG i USRPWD [99], [94] napisanych przez autora w FORTRAN-ie.

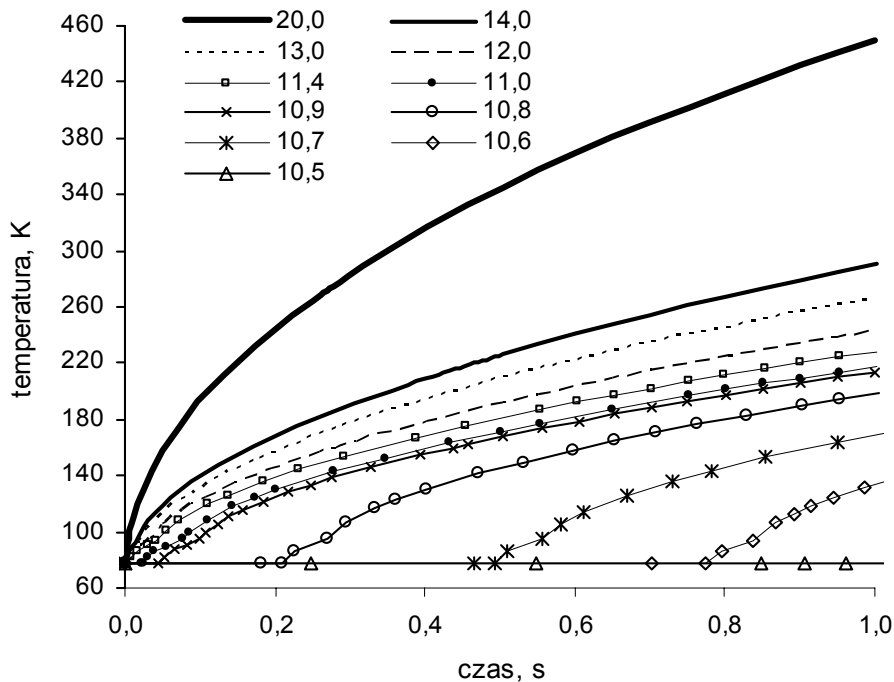
Rezystywność nadprzewodnika będąca funkcją trzech zmiennych: temperatury, pola magnetycznego i prądu zmienia swoją wartość niemal skokowo podczas przejścia nadprzewodzącego. Poprzez zdefiniowanie ustalonego prądu w ograniczniku zamiast napięciowych warunków brzegowych na końcach ogranicznika oraz przy założeniu, (potwierdzonym w obliczeniach w pomocniczym modelu magnetodynamicznym polowo-obwodowym), że na nadprzewodnik działa tylko pole magnetyczne własne,

funkcja 3 zmiennych zastąpiona została tutaj funkcją jednej zmiennej z parametrem – zmienną jest temperatura, parametrem prąd. Rezystywność „HTS” w funkcji temperatury dla różnych wartości gęstości prądu w ograniczniku przedstawia rys. 3.15. Wartość temperatury przełączania, przy której w regionie „HTS” następuje przejście nadprzewodzące obliczana jest w procedurze USRSIG w oparciu o wykres prezentowany na rys. 3.18 i parametr procedury (gęstość prądu) [99].

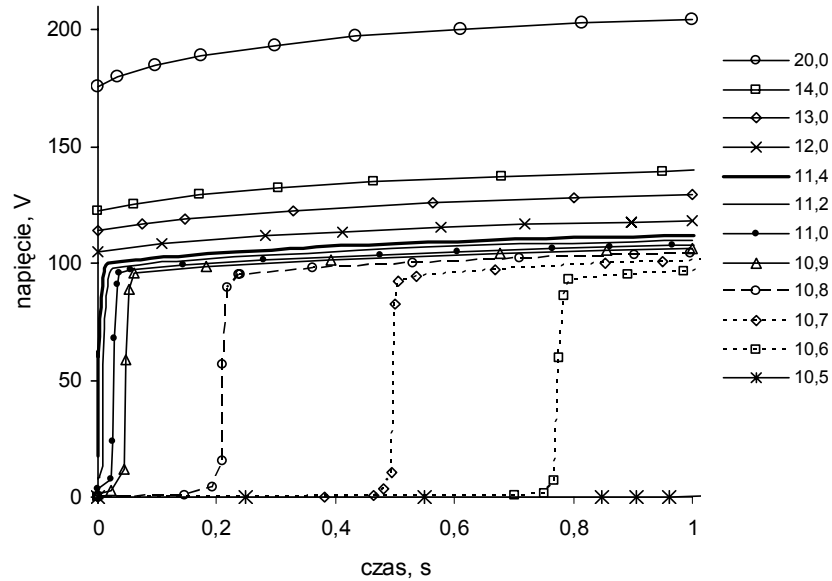
Procedura USRPWD definiuje strumień ciepła przepływający z ogranicznika do ciekłego azotu przez region „wymiana ciepła” zgodnie z wykresem prezentowanym na rys. 3.16 dla chłodzenia techniką w kąpieli ciekłego azotu.

Przewodność cieplna i ciepło właściwe regionów obliczeniowych nie wymagają użycia procedur USRKTH i USRRCP, jak to miało miejsce w przypadku poprzednich modeli cieplnych. Temperatura modelowanego rezystancyjnego SFCL jest wyższa od 77 K i temperaturowe zależności parametrów cieplnych obszarów można zamodelować dostępnymi funkcjami programu FLUX2D [99].

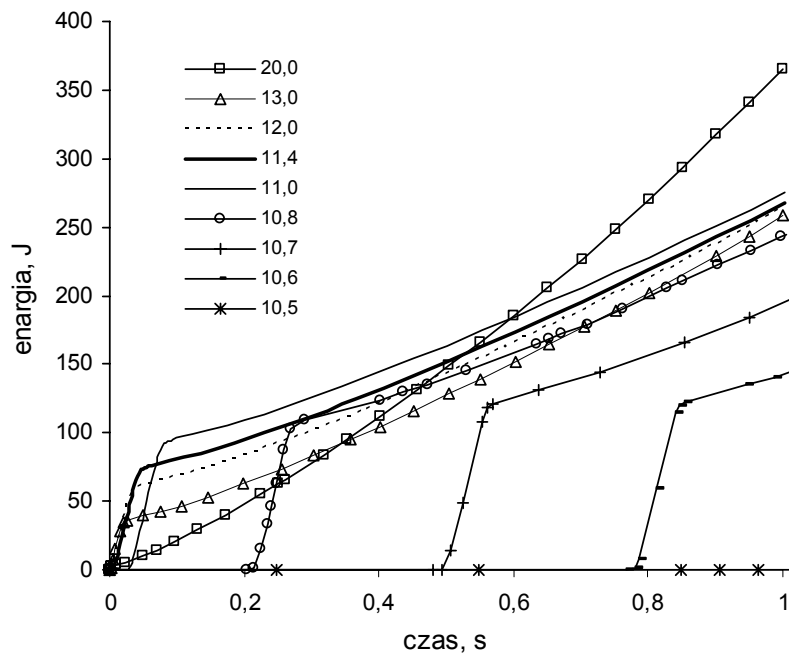
Maksymalną temperaturę, napięcie i energię przekazywana do ciekłego azotu w funkcji czasu dla różnych gęstości prądu w ograniczniku przedstawiają rys. 3.19, rys. 3.20 i rys. 3.21.



Rys. 3.19. Zmiana maksymalnej temperatury ogranicznika w czasie dla różnych gęstości prądu (A/mm^2)



Rys. 3.20. Zmiana napięcia na ograniczniku w czasie dla różnych gęstości prądu (A/mm^2)

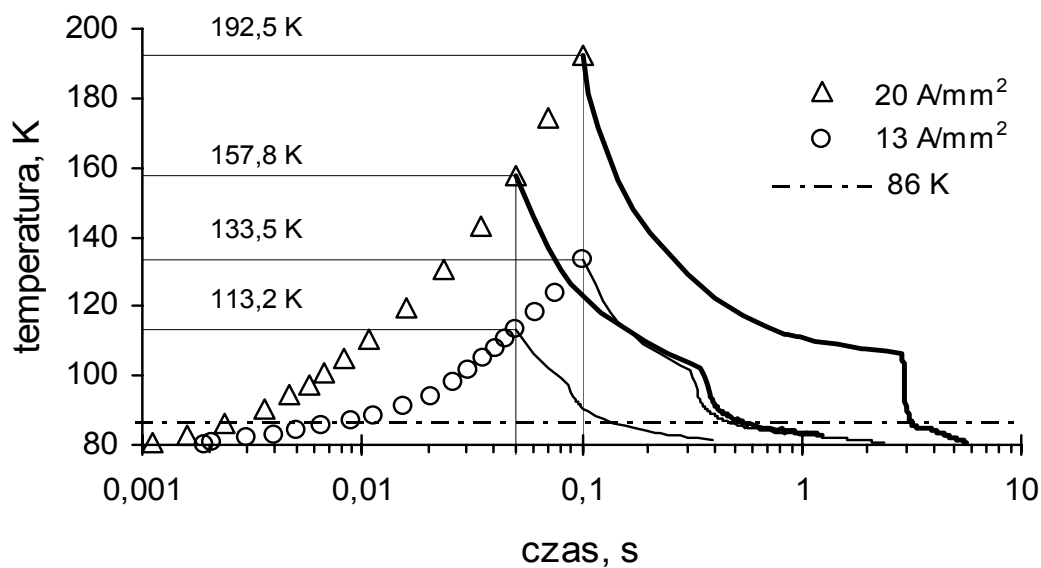


Rys. 3.21. Zmiana energii przepływającej pomiędzy ogranicznikiem a IN_2 w czasie dla różnych gęstości prądu (A/mm^2)

Dla gęstości prądu w przedziale pomiędzy 10,6-11,0 A/mm^2 wyraźnie widoczne jest opóźnienie w zadziałaniu ogranicznika. Zjawisko to obserwowane podczas eksperymentów jest bardzo groźne zarówno dla

ogranicznika prądu jak i zabezpieczanego przez ogranicznik zewnętrznego obwodu. Energia przekazywana do ciekłego azotu (rys. 3.21) jest znacząca i nie może być pomijana jak to założono w [105].

Różnice w maksymalnej temperaturze, do jakiej nagrzej się ogranicznik, i w czasie reaktywacji dla różnych gęstości prądu i różnych czasów wyłączenia prądu przez wyłącznik przedstawia rys. 3.22. Temperatura wzrasta do 157,8 K lub 192,5 K gdy prąd ($J = 20 \text{ A mm}^{-2}$) zostaje wyłączony odpowiednio po czasie 0,05 s lub 0,1 s. Dla $J = 13 \text{ A mm}^{-2}$ temperatura wzrasta do 113,2 K lub 133,5 K odpowiednio. Założono, że prąd znamionowy ogranicznika może zostać ponownie włączony gdy temperatura ogranicznika obniży się poniżej 86 K (temperatura przełączania dla prądu znamionowego). Tak więc czas reaktywacji wynosi 0,14 s dla $13 \text{ A mm}^{-2}/0,05 \text{ s}$. Czas ten wzrasta do 0,5 s dla $13 \text{ A mm}^{-2}/0,1 \text{ s}$. Czas reaktywacji wynosi 0,57 s dla $20 \text{ A mm}^{-2}/0,05 \text{ s}$. Czas ten wzrasta do 3,19 s dla $20 \text{ A mm}^{-2}/0,1 \text{ s}$.



Rys. 3.22. Zmiana temperatury w czasie dla różnych gęstości prądu w ograniczniku i różnych czasów wyłączenia prądu przez wyłącznik

3.4. Podsumowanie modelowania numerycznego zjawisk elektrotermicznych

Podstawowe trudności związane z modelowaniem zagadnień cieplnych w urządzeniach nadprzewodnikowych wynikają z ograniczonych danych dotyczących właściwości cieplnych materiałów i parametrów źródeł

ciepła (zimna) w funkcji temperatury w zakresie temperatur kriogenicznych.

Trzy zaprezentowane modele numeryczne zagadnień cieplnych w urządzeniach nadprzewodnikowych powstały przy wykorzystaniu narzędziowego programu polowego FLUX2D. Dotyczą one wszystkich technik chłodzenia wykorzystywanych w urządzeniach nadprzewodnikowych.

Urządzenia nadprzewodnikowe różniące się zarówno funkcją, geometrią jak i techniką chłodzenia od strony modelowania numerycznego wykazują wiele podobieństw. W wewnętrznych obszarach obliczeniowych urządzeń ciepło przepływa na drodze przewodnictwa. Właściwości cieplne obszarów są funkcją temperatury. Różnice występują w oddawaniu ciepła do czynnika lub urządzenia chłodzącego. Zaprezentowane modele numeryczne można zaadaptować do zamodelowania zagadnień cieplnych w większości urządzeń nadprzewodnikowych.

Do zdefiniowania złożonych zależności temperaturowych właściwości fizycznych obszarów obliczeniowych wykorzystano wieloparametrowe procedury użytkownika USRSIG, USRKTH i USRRCP, w których jednym z parametrów jest współczynnik zapełnienia uzwojenia λ_{sc} pozwalający uwzględnić w obliczeniach złożoną budowę wewnętrzną przewodów nawojowych i uzwojeń nadprzewodnikowych. Do zdefiniowania strumienia ciepła odbieranego przez kriochłodziarkę SRDK 408 wykorzystano zaawansowaną, wieloparametrową procedurę użytkownika USRPWD.

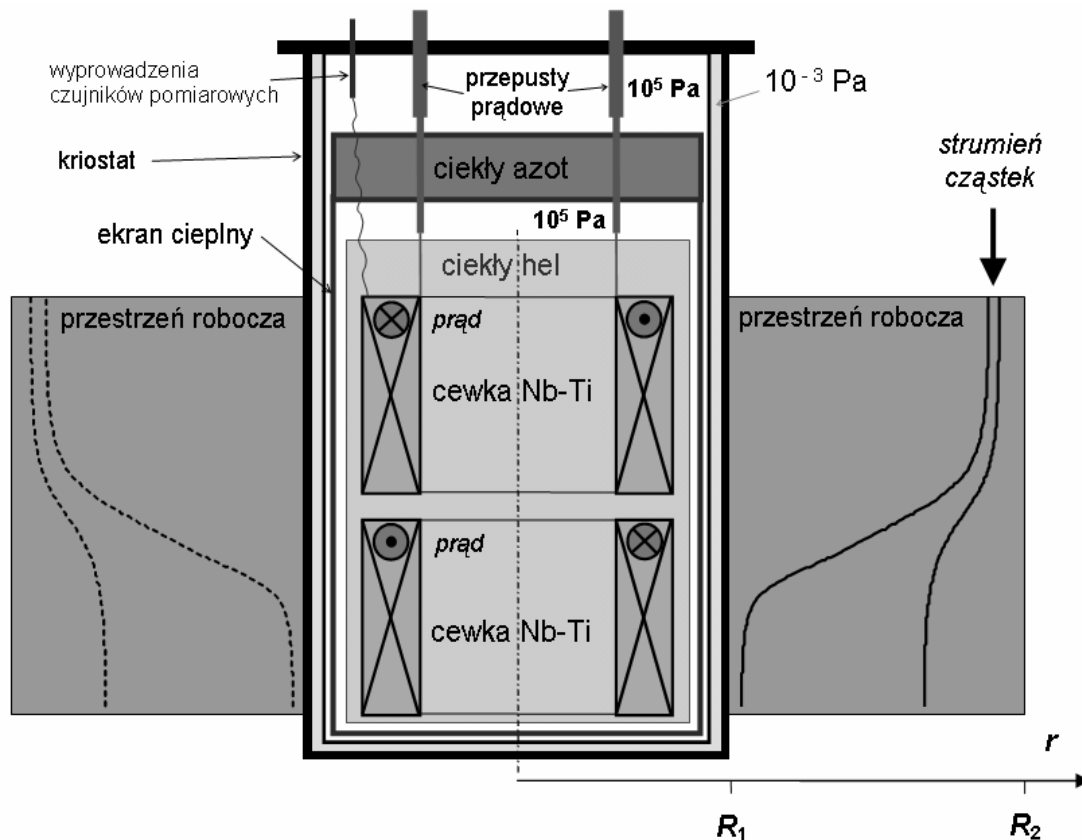
W programie FLUX2D technikę chłodzenia wymuszonego można zamodelować pośrednio wykorzystując wieloparametrową procedurę użytkownika USRAMB dającą możliwość uzależnienia temperatury otoczenia od temperatury obiektu i położenia.

Rezystywność elektryczna nadprzewodnika będąca funkcją 3 zmiennych: temperatury, pola magnetycznego i prądu została zastąpiona w procedurze USRSIG funkcją jednej zmiennej (temperatury) z parametrem (gęstością prądu). Umożliwiło to przy odpowiednio dobranych warunkach brzegowych uwzględnić w obliczeniach wpływy 3 zmiennych: temperatury, pola magnetycznego i prądu na rezystywność nadprzewodnika.

W elektrotermicznym modelu numerycznym nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu rezystancyjnego zmieniono geometrię stosu nadprzewodnikowego i kierunek przepływu prądu, co pozwoliło na wykorzystanie programu narzędziowego FLUX2D.

4. MODELOWANIE NUMERYCZNE ZJAWISK MAGNETOSTATYCZNYCH SPRZEŻONYCH Z HYDRODYNAMICZNYMI

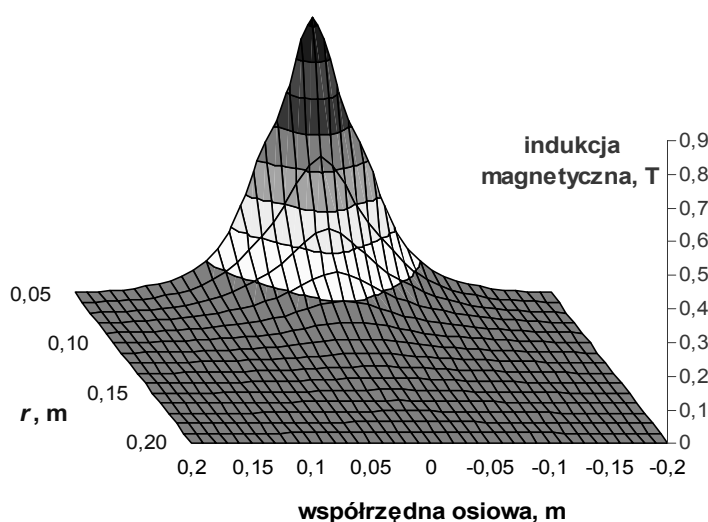
Zagadnienia magnetostaticzne dotyczą przede wszystkim stałoprądowych uzwojeń nadprzewodnikowych. Przy modelowaniu numerycznym zagadnień magnetostaticznych w urządzeniach nadprzewodnikowych zakłada się, że problemy chłodzenia są rozwiązane, a temperatura urządzenia jest ustalona. Punkt pracy uzwojenia jest więc funkcją tylko gęstości prądu i pola magnetycznego zgodnie z charakterystyką krytyczną nadprzewodnika.



Rys. 4.1. Nadprzewodnikowy separator OGMS i trajektorie cząstek w przestrzeni roboczej. R_1 i R_2 – promień wewnętrzny i zewnętrzny przestrzeni roboczej separatora

W Pracowni Technologii Nadprzewodnikowych w Lublinie (IEL) prowadzone były badania eksperymentalne separacji magnetycznej OGMS z wykorzystaniem elektromagnesów nadprzewodnikowych. Separacja ma-

gnetyczna pozwala na oddzielanie cząstek o silnych właściwościach magnetycznych od cząstek o słabych właściwościach magnetycznych np. ferromagnetyków od paramagnetyków czy silnych paramagnetyków od słabych paramagnetyków. Źródłem siły magnetycznej odchylającej cząstki w nadprzewodnikowym separatorze typu OGMS jest elektromagnes zbudowany z dwóch współosiowych cewek nadprzewodnikowych o przekroju prostokątnym umieszczonych w kriosłacie jedna nad drugą (rys. 4.1), zasilanych przeciwsobnie (rys. 4.1, rys. 4.3). Taki układ cewek wytwarza w przestrzeni roboczej silne i niejednorodne pole magnetyczne (rys. 4.2), co jest podstawą działania separatora magnetycznego OGMS.



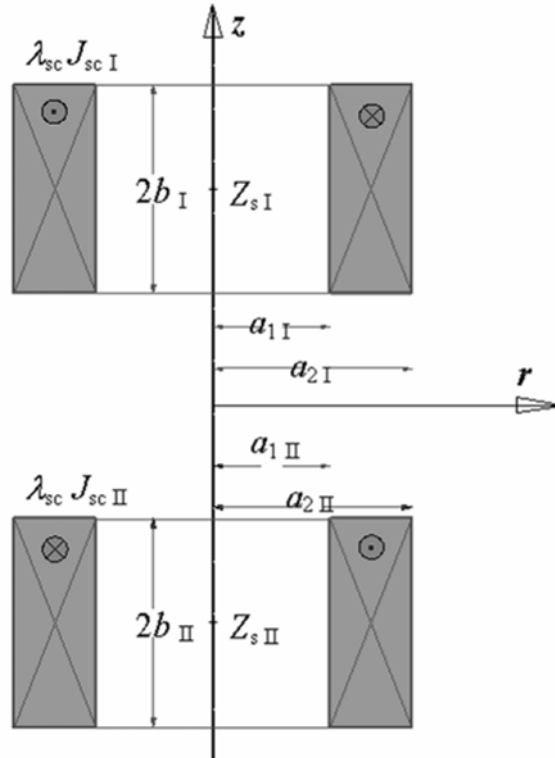
Rys. 4.2. Rozkład indukcji magnetycznej w przestrzeni roboczej separatora OGMS. (Podprogram „*Pole magnet.*”) [61]

Pole magnetyczne w separatorze OGMS ma najlepsze parametry ze względu na separację (jest najsilniejsze i najbardziej niejednorodne) przy wewnętrznej ścianie przestrzeni roboczej. Wraz ze wzrostem odległości od elektromagnesu (rys. 4.2) [61] [80] maleje zarówno indukcja jak i gradient indukcji. Tak ukształtowane pole magnetyczne odchyła cząstki (para- i ferromagnetyczne), poruszające się w strumieniu cząstek w przestrzeni roboczej, w kierunku środka elektromagnesu.

Przekrój elektromagnesu nadprzewodnikowego separatora OGMS przedstawia rys. 4.3. Każda cewka elektromagnesu scharakteryzowana jest jednoznacznie przez pięć parametrów:

- a_1 – promień wewnętrzny,
- a_2 – promień zewnętrzny,

$2b$ – długość,
 Z_s – osiową współrzędną środka uzwojenia,
 $\lambda_{sc} J_{sc}$ – średnią gęstość prądu w przekroju uzwojenia,
 gdzie J_{sc} oznacza gęstość prądu w nadprzewodniku, a λ_{sc} – współczynnik
 zapelnienia uzwojenia.



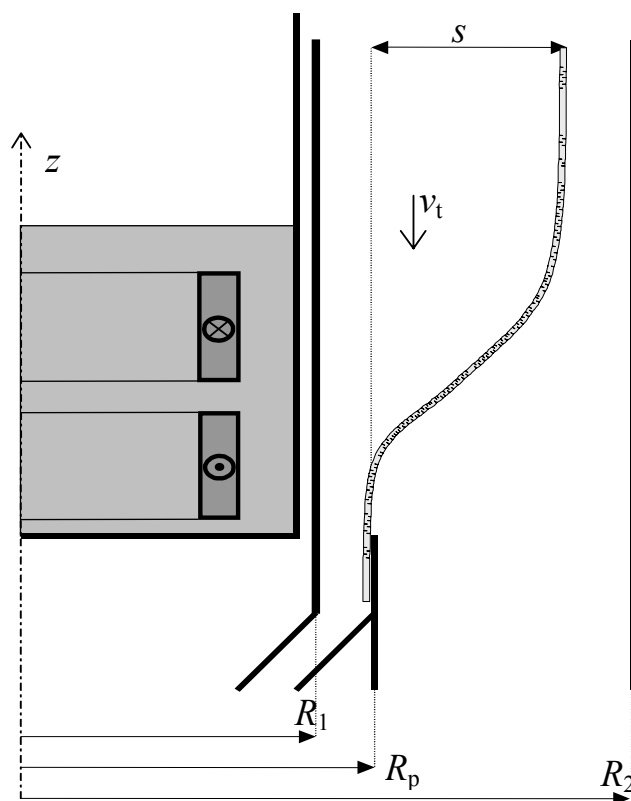
Rys. 4.3. Przekrój elektromagnesu nadprzewodnikowego separatora OGMS

Poruszająca się w przestrzeni roboczej separatora cząstka magnetyczna uzyskuje całkowite odchylenie s (rys. 4.4) i w oparciu o tą wielkość zdefiniowano podstawowe parametry procesu separacji: wydajność W oraz jakość separacji K :

$$(4-1) \quad W = \pi \cdot v_t \cdot ((R_p + s)^2 - R_p^2)$$

$$(4-2) \quad K = \begin{cases} \frac{(R_p + s)^2 - R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} \cdot 100\%, & R_2 > R_p + s \\ 100\%, & R_2 \leq R_p + s \end{cases}$$

gdzie W oznacza wydajność separacji, K – jakość separacji, R_p – promień przegrody separacyjnej, R_1 i R_2 – promień wewnętrzny i zewnętrzny przestrzeni roboczej separatora, s – całkowite odchylenie cząstki w separatorze, a v_t – prędkość transportu ośrodka.



Rys. 4.4. Trajektoria cząstki w przestrzeni roboczej separatora OGMS. R_1 i R_2 – promień wewnętrzny i zewnętrzny przestrzeni roboczej, R_p – promień przegrody separacyjnej, s – całkowite odchylenie cząstki w separatorze, v_t – prędkość transportu ośrodka

Większość cząstek po odchyleniu opuszcza separator. Część z nich uderza w wewnętrzną ściankę przestrzeni roboczej i tam są zatrzymywane. To, czy cząstka zostanie wychwycona, czy tylko odchylona, zależy od wielu czynników, między innymi od rodzaju i rozmiarów cząstki, jak również od współrzędnych początkowych cząstki w przestrzeni roboczej separatora oraz prędkości strumienia, w którym porusza się cząstka [80]. Praca nadprzewodnikowego separatora magnetycznego OGMS, którego zadaniem jest selektywne odchylenie cząstek magnetycznych zakłócana jest niekorzystnym zjawiskiem wychwytywania cząstek magnetycznych na ściance przestrzeni roboczej.

Pracę nadprzewodnikowego separatora magnetycznego OGMS można podzielić, podobnie jak wspomnianego w rozdziale 1.4 elektromagnesu

nadprzewodnikowego, na trzy niezależne etapy. Etapy pracy dotyczą separatorów wyposażonych w elektromagnesy, których parametry zamieszczone są w tab. 16.

W pierwszym etapie pracy nadprzewodnikowy elektromagnes separatora jest schładzany od temperatury pokojowej do temperatury roboczej rzędu kilku kelwinów. Model numeryczny chłodzenia elektromagnesu nadprzewodnikowego techniką kontaktową został opisany w rozdziale 3.2. W drugim etapie pracy jako początkowy rozkład temperatur w elektromagnesie przyjmuje się jako końcowy rozkład temperatur w pierwszym etapie pracy. W elektromagnesie będącym już w stanie nadprzewodzącym zwiększany jest prąd od zera do prądu roboczego. W drugim etapie pracy urządzenia decydują zjawiska cieplne i przewodnictwa elektrycznego – model sprzężony elektrotermiczny.

Zjawiska, które występują podczas pierwszego i drugiego etapu pracy, są istotne do określenia szybkości schładzania elektromagnesu nadprzewodnikowego (rys. 3.14) oraz strat ciepła w kriostacie podczas pracy. Pozwala to na oszacowanie rozruchowej objętości cieczy kriogenicznych i eksploatacyjnego zapotrzebowania na czynnik chłodzący. Pozwala to na określenie częstotliwości koniecznych uzupełnień czynnika chłodzącego w przypadku wykorzystania techniki chłodzenia w kąpieli albo czasu schładzania i wymaganej mocy chłodniczej przy chłodzeniu techniką kontaktową. Parametry te nie wpływają na separację magnetyczną. Modele numeryczne, w których można badać pracę separatora OGMS w pierwszym i drugim etapie są modelami ogólnymi nie powiązаныmi z separacją magnetyczną stosowanymi do elektromagnesów nadprzewodnikowych dowolnych zastosowań.

W trzecim etapie pracy elektromagnes znajduje się w stanie nadprzewodzącym, prąd w nim płynący jest ustalony oraz ustalona jest temperatura elementów nadprzewodnikowych separatora. W przestrzeni roboczej separatora przebiega proces separacji magnetycznej a o pracy elektromagnesu nadprzewodnikowego decydują stałoprądowe zjawiska magnetyczne – model magnetostatyczny. W przestrzeni roboczej separatora zachodzą zjawiska hydrodynamiczne sprzężone ze zjawiskami magnetostatycznymi.

Zjawiska w trzecim etapie związane z prawidłową pracą separatora, czyli odchyłaniem cząstek, mogą być analizowane przy wykorzystaniu modelu matematycznego trajektorii cząstki w separatorze OGMS [80]. Zjawiska w trzecim etapie związane z niekorzystnym procesem wychwytywania cząstek magnetycznych na ścianie przestrzeni roboczej mogą być analizowane przy wykorzystaniu modelu matematycznego krawędzi wychwyty cząstek w separatorze OGMS [106][107]. Oba modele

matematyczne posłużyły do opracowania odpowiednich modeli numerycznych. Pierwszy model numeryczny jest jednolitym programem napisanym w PASCAL-u. Kolejne dwa modele numeryczne (hybrydowe) są systemami programów napisanych w C++ i programów wykonawczych, zarządzających pracą narzędziowych programów polowych FLUX2D i PC-OPERA.

4.1. Matematyczno-numeryczny model trajektorii cząstki w separatorze OGMS

Przyjęto, że model ten dotyczy trzeciego etapu pracy separatora, w którym temperatura pracy elektromagnesu nadprzewodnikowego została ustalona i układ chłodzenia zapewnia jej utrzymanie na wymaganym poziomie. Zagadnienia cieplne mogą być więc pominięte. W modelu tym zakłada się również, że cząstki ferromagnetyczne nie zostały wychwycone w separatorze i pomijany jest wpływ tych cząstek na rozkład pola magnetycznego. Przy takim założeniu można przyjąć, że pole magnetyczne wytwarzane jest przez elektromagnes nadprzewodnikowy w środowisku liniowym. Zarówno elektromagnes nadprzewodnikowy jak i przestrzeń robocza separatora OGMS mają symetrię obrotową.

Możliwe były dwa podejścia do opracowania modelu numerycznego:

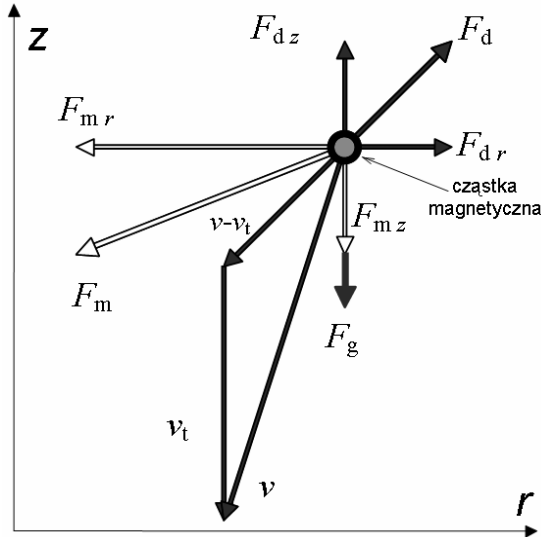
- opracowanie gęstej sieci rozkładu pola magnetycznego w przestrzeni roboczej separatora i analiza ruchu cząstki w takiej sieci,
- analiza ruchu cząstki która „widzi” pole magnetyczne w punkcie, w którym się aktualnie znajduje oraz w sąsiedztwie tego punktu.

Jednym z uzasadnień zastosowania pierwszego podejścia byłoby wykorzystanie do obliczeń sieci rozkładu pola magnetycznego komercyjnego programu polowego. Program ten musiałby współdziałać z programem komputerowym, w którym byłyby analizowane zagadnienia hydrodynamiczne związane z ruchem cząstki w strumieniu. Ze względu na minimalizacją czasu obliczeń wybrano drugie podejście. Dokładna analiza zjawisk w przestrzeni roboczej separatora pozwoliła na opracowanie modelu matematycznego trajektorii cząstki w separatorze.

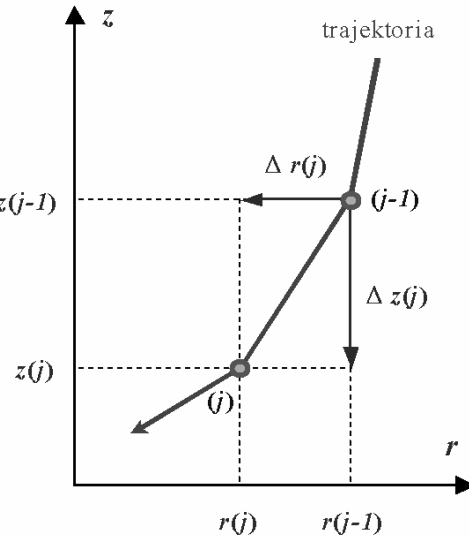
4.1.1. Analiza ruchu cząstki i model matematyczny

Rys. 4.5 przedstawia kierunki sił działających na cząstkę w przestrzeni roboczej separatora oraz kierunki prędkości cząstki. W modelu matematycznym przyjęto, że kierunek siły grawitacji oraz kierunek prędkości

transportu ośrodka pokrywają się z kierunkiem osi Z oraz, że separowane cząstki są kulkami o promieniu R_c .



Rys. 4.5. Rozkład sił działających na cząstkę i kierunki jej prędkości w przestrzeni roboczej separatora magnetycznego



Rys. 4.6. Fragment trajektorii cząstki w modelu matematycznym

Na cząstkę magnetyczną działają w przestrzeni roboczej separatora trzy główne siły:

siła grawitacji wyrażona równaniem:

$$(4-3) \quad \vec{F}_g = (4\pi/3) \cdot \delta \cdot \vec{g} \cdot R_c^3$$

gdzie R_c oznacza promień cząstki, δ – jej gęstość, a g – przyspieszenie grawitacyjne;

siła hydrodynamiczna (lepkości) wyrażona równaniem:

$$(4-4) \quad \vec{F}_d = -6\pi \cdot \eta \cdot R_c \cdot (\vec{v} - \vec{v}_t)$$

gdzie η oznacza współczynnik lepkości ośrodka, v_t – prędkość transportu ośrodka, a v – prędkość cząstki; oraz

siła magnetyczna wyrażona równaniem [108][80]:

$$(4-5) \quad \vec{F}_m = \frac{4\pi \chi \cdot R_c^3}{3\mu_0 (\chi + 1)} \nabla(B^2)$$

gdzie χ oznacza podatność magnetyczną cząstki, R_c – promień cząstki, B – indukcję magnetyczną, a $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m.

Tab. 22. Zestawienie równań opisujących model matematyczny trajektorii cząstki w separatorze OGMS [80]

	równania	opis
(4-6)	$\begin{cases} m \frac{dv_r}{dt} = F_{mr} + F_{dr} \\ m \frac{dv_z}{dt} = F_{mz} + F_{dz} + F_g \end{cases}$	Równania ruchu cząstki
(4-7)	$\begin{cases} p = \frac{R_c}{3f} \\ p = \frac{R_c^2 \delta \sqrt{F_{mr}^2 + (F_{mz} + F_g)^2}}{27\pi \eta^2} \cdot \\ \cdot \left(t_p \frac{9\eta}{2\rho R_c^2} + e^{-t_p \frac{9\eta}{2\delta R_c^2}} - 1 \right) \end{cases}$	Układ równań do obliczania średniej drogi swobodnej p oraz czasu t_p pomiędzy zderzeniami
(4-8)	$\begin{cases} V_r = \frac{p F_{mr}}{t_p \sqrt{F_{mr}^2 + (F_{mz} + F_g)^2}} \\ V_z = \frac{p (F_{mz} + F_g)}{t_p \sqrt{F_{mr}^2 + (F_{mz} + F_g)^2}} + v_t \end{cases}$	Układ równań do obliczania składowych średniej prędkości cząstki pomiędzy zderzeniami
(4-9)	$\begin{cases} r(j) = \Delta r(j) + r(j-1) \\ z(j) = \Delta z(j) + z(j-1) \end{cases}$	Układ równań opisujący współrzędne punktu wyznaczającego trajektorię cząstki (rys. 4.6)
(4-10)	$\Delta d(j) = \sqrt{\Delta r^2(j) + \Delta z^2(j)}$	
(4-11)	$\begin{cases} \Delta r(j) = \frac{V_r(j-1) \cdot \Delta d(j)}{\sqrt{V_r^2(j-1) + V_z^2(j-1)}} \\ \Delta z(j) = \frac{V_z(j-1) \cdot \Delta d(j)}{\sqrt{V_r^2(j-1) + V_z^2(j-1)}} \end{cases}$	Układ równań opisujący przyrosty współrzędnych punktów wyznaczających trajektorię cząstki
(4-12)	$\begin{cases} r(k) = r(0) + \sum_{j=1}^k \Delta r(j) \\ z(k) = z(0) + \sum_{j=1}^k \Delta z(j) \end{cases}$	Układ równań stanowiący model matematyczny trajektorii cząstki w separatorze OGMS
(4-13)	$s = r(n) - r(0) = \sum_{j=1}^n \Delta r(j)$	Równanie opisujące całkowite odchylenie cząstki w separatorze – podstawowy parametr w obliczeniach wydajności i jakości separacji

Tab. 23. Opis oznaczeń stosowanych w modelu matematycznym trajektorii cząstki w separatorze OGMS

symbol	opis
B	indukcja magnetyczna
f	współczynnik upakowania cząstek w strumieniu
F_{dr}, F_{dz}	składowa radialna i osiowa siły lepkości
F_g	siła grawitacji
F_{mr}, F_{mz}	składowa radialna i osiowa siły magnetycznej
g	przyspieszenie grawitacyjne
m	masa cząstki
p	średnia droga swobodna cząstki
$r(j), z(j)$	współrzędna radialna i osiowa j -tego punktu trajektorii
R_c	promień cząstki
t_p	czas pomiędzy zderzeniami cząstek
v_r, v_z	składowa radialna i osiowa chwilowej prędkości cząstki
v_t	prędkości transportu ośrodka
V_r, V_z	składowa radialna i osiowa średniej prędkości cząstki
δ	gęstość cząstki
χ	podatność magnetyczna cząstki

4.1.2. Model numeryczny - SEP_MAG

W oparciu o model matematyczny (tab. 22) powstał program komputerowy [109] SEP_MAG³⁴ będący modelem numerycznym trajektorii cząstki w separatorze OGMS. Jest to model numeryczny liniowych zjawisk magnetostatycznych sprzężonych ze zjawiskami hydrodynamicznymi. Parametry pola magnetycznego mogą być obliczane metodami dla środowisk liniowych – w prezentowanym modelu jest to całkowanie numeryczne równań opisujących składowe indukcji magnetycznej od pojedynczej cewki elektromagnesu [80]:

$$(4-14) \left\{ \begin{array}{l} B_r(r, z) = \frac{\mu}{2\pi} \cdot \int_{a_1}^{a_2} \int_0^\pi \int_{Z_s-b}^{Z_s+b} \frac{\lambda_{sc} J_{sc} r_x (z - z_x) \cos \Theta}{(r_x^2 + r^2 - 2r_x r \cos \Theta + (z - z_x)^2)^{3/2}} dr_x d\Theta dz_x \\ B_z(r, z) = \frac{\mu}{2\pi} \cdot \int_{a_1}^{a_2} \int_0^\pi \int_{Z_s-b}^{Z_s+b} \frac{\lambda_{sc} J_{sc} (r_x - r \cos \Theta) r_x}{(r_x^2 + r^2 - 2r_x r \cos \Theta + (z - z_x)^2)^{3/2}} dr_x d\Theta dz_x \end{array} \right.$$

³⁴ napisany przez autora w PASCAL-u

gdzie r, z, Θ oznaczają współrzędne walcowe, r_x, z_x – zmienne całkowania, B_r, B_z – radialną i osiową składową indukcji magnetycznej, a_1, a_2 – promień wewnętrzny i zewnętrzny cewki, Z_s – współrzędną osiową środka cewki, b – połowę długości cewki, μ – przenikalność magnetyczną, $\lambda_{sc} J_{sc}$ – średnią gęstość prądu w cewce. Indukcja magnetyczna od całego elektromagnesu jest sumą indukcji magnetycznych od pojedynczych cewek. W modelu analizowane są zjawiska hydrodynamiczne w przestrzeni roboczej separatora oraz zjawiska magnetostaticzne w elektromagniesie nadprzewodnikowym i przestrzeni roboczej separatora. Dostęp i możliwość dokonywania zmian w całym kodzie źródłowym programu czyni ten model numeryczny bardzo wszechstronnym i łatwym do uaktualnień narzędziem badań.



Rys. 4.7. Schemat blokowy modelu numerycznego SEP_MAG

Program SEP_MAG składa się z 4 podprogramów zarządzających danymi oraz z 4 podprogramów obliczeniowych (rys. 4.7). Podprogram „*Nadprzewodnik*” umożliwia zmianę wartości następujących parametrów:

- stosunku miedzi do nadprzewodnika C_{sc} ,
- średnicy przewodu,
- współczynnika wypełnienia uzwojenia λ_{sc} ,
- prądu i indukcji magnetycznej wyznaczających charakterystykę krytyczną przewodu nadprzewodnikowego.

Podprogram „*Zmiany w cewce*” umożliwia zmianę wartości:

- promienia wewnętrznego wybranej cewki a_1 ,
- promienia zewnętrznego wybranej cewki a_2 ,
- długości wybranej cewki $2b$,
- współrzędnej osiowej środka wybranej cewki Z_s ,
- średniej gęstości prądu w cewce $\lambda_{sc} J_{sc}$.

Podprogramy „*Zm. Trajektorii*” i „*Trajektorja*” umożliwiają zmianę wartości:

- promienia separowanej cząstki R_c ,
- gęstości cząstki δ ,
- podatności magnetycznej cząstki χ ,
- prędkości transportu ośrodka v_t ,
- początkowej współrzędnej radialnej cząstki $r(0)$,
- początkowej współrzędnej osiowej cząstki $z(0)$,
- współczynnika lepkości ośrodka η ,
- współczynnika upakowania cząstek w strumieniu f .

Podprogram „*Param. zerowe*” umożliwia zapisywanie do pliku lub odczytywanie z pliku o rozszerzeniu „*ZER*” wartości wszystkich parametrów używanych przez program SEP_MAG. Dodatkowo program SEP_MAG podczas uruchamiania odczytuje wartości wszystkich parametrów z pliku

$$a_{1I} = a_{1II} = 0,104 \text{ m}$$

$$a_{2I} = a_{2II} = 0,1259 \text{ m}$$

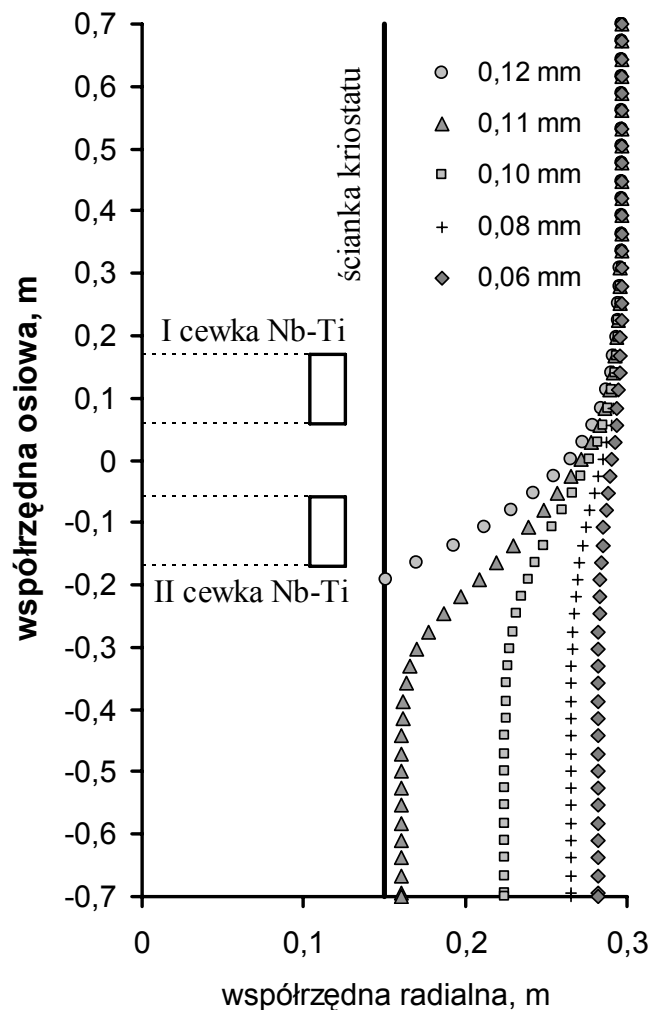
$$2b_I = 2b_{II} = 0,1112 \text{ m}$$

$$Z_{sI} = 0,1141 \text{ m}$$

$$Z_{sII} = -0,1141 \text{ m}$$

$$\lambda_{scI} J_{scI} = 3 \cdot 10^8 \text{ A/m}^2$$

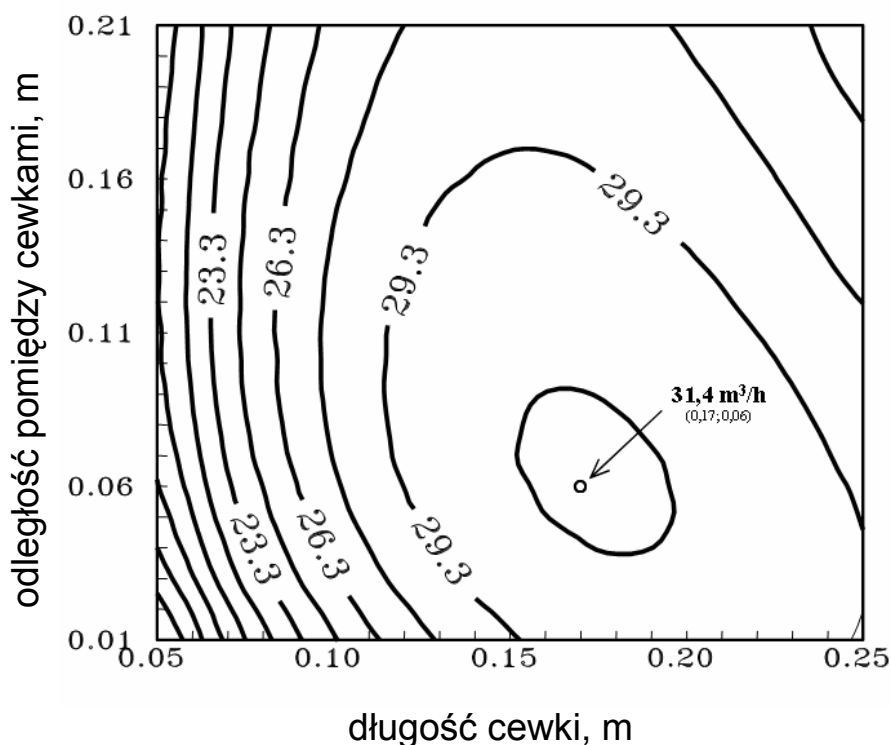
$$\lambda_{scII} J_{scII} = -3 \cdot 10^8 \text{ A/m}^2$$



Rys. 4.8. Trajektorie cząstek ferromagnetycznych o różnych średnicach w separatorze OGMS z elektromagnesem LTS (II, tab. 16), $v_t = 2 \text{ m/s}$ (podprogram „*Trajektorja*”)

„000000.ZER” oraz po zakończeniu działania zapisuje do tego pliku ostatnie wartości wszystkich parametrów programu. Pozwala to na pracę z ostatnio zmienionymi parametrami albo na odczyt zapisanych parametrów programu. Podprogram „*Pole magnet.*” pozwala na obliczanie składowych indukcji magnetycznej oraz indukcji całkowitej w separatorze OGMS. Wyniki obliczeń wyświetlane są na ekranie tekstowym oraz zapisywane do plików tekstowych. Rys. 4.2 przedstawia rozkład indukcji magnetycznej w przestrzeni roboczej separatora OGMS (EXCEL) zgodnie z danymi obliczonymi w podprogramie „*Pole magnet.*” Podprogram „*Trajektoria*” pozwala na obliczanie i obserwowanie (ekran graficzny) ruchu cząstki w separatorze OGMS. Współrzędne punktów na trajektorii cząstki mogą być zapisywane do pliku tekstowego. Rys. 4.8 (EXCEL) przedstawia trajektorie cząstek ferromagnetycznych o różnych średnicach w przestrzeni roboczej separatora OGMS z elektromagnesem LTS (II, tab. 16) przy prędkości transportu $v_t = 2$ m/s. Współrzędne punktów trajektorii obliczone zostały w podprogramie „*Trajektoria*”.

Podprogram „*Oblicz. char*” pozwala na obliczanie wydajności separatora w funkcji dwóch wybranych parametrów konstrukcyjnych.



Rys. 4.9. Mapa wydajności (w m³/h) separatora OGMS w funkcji długości cewki oraz odległości pomiędzy cewkami dla cząstek paramagnetycznych o średnicy 100 μm oraz $v_t = 0,1$ m/s, (podprogram „*Oblicz. char*”) [110][111]

Mapę wydajności separatora OGMS (w m³/h) w funkcji długości cewki oraz odległości pomiędzy cewkami dla cząstek paramagnetycznych o średnicy 100 μm oraz prędkości transportu $v_t = 0,1$ m/s przedstawia rys. 4.9. Dane do rys. 4.9 obliczono w podprogramie „*Oblicz. char*”.

Podprogram „*OPTYMALIZACJA*” pozwala na znalezienie wartości dwóch wybranych parametrów konstrukcyjnych, dla których separator OGMS, przy ustalonych pozostałych parametrach, ma największą wydajność [82] [110] [111]. Maksymalna wydajność separatora dla danych na rys. 4.9 wynosząca 31,4 m³/h osiągana jest w elektromagnesie o długości jednej cewki równej 0,17 m i odległości pomiędzy cewkami równej 0,06 m, przy założeniu, że $a_2 = 0,126$ m a długość przewodu T54-1,35/0,4 TV (rys. 2.9, tab. 4) użytego do wykonania elektromagnesu jest równa 10 km. Program SEP_MAG kontroluje położenie punktu pracy elektromagnesu nadprzewodnikowego separatora. W podprogramie „*Zmiany w cewce*”, w którym wprowadzane są dane wpływające na położenie punktu pracy, program sygnalizuje błąd, jeżeli punkt pracy znajdzie się ponad charakterystyką krytyczną nadprzewodnika i nie pozwala opuścić podprogramu bez skorygowania danych. W pod-programach obliczeniowych „*Oblicz. char*” i „*OPTYMALIZACJA*” punkt pracy (prąd w cewkach) aktualizowany jest automatycznie po każdej zmianie geometrii cewek nadprzewodnikowych.

4.1.3. Analiza kosztów separatora OGMS dla kotła OP-215

Wykorzystując program SEP_MAG dokonano przybliżonej oceny kosztów odsiarczania węgla spalanego w kotle OP-215 z wykorzystaniem instalacji z separatorem OGMS.

Istotne dla analizy parametry techniczne kotła i paliwa:

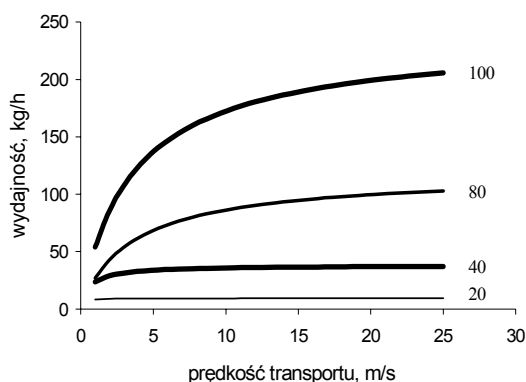
- kocioł zużywa 20 t węgla na godzinę,
- kocioł współpracuje z 4 młynami kulowymi, zasilającymi kocioł w czterech miejscach każdy,
- wydajność każdego młyna wynosi 15 t/h,
- zawartość siarki w węglu który będzie spalany w kotle wynosi $\%S = 0,9 \div 1,2 \%$,
- średnia zawartość siarki pirytovej (FeS₂) w całkowitej ilości siarki w spalonym węglu $\%FeS_{2|S} = 26,75\%$.

Do uzyskania pełnej wydajności kotła potrzebna jest praca przy najmniej dwóch młynów z wydajnością 10 t/h każdy. Z kotłem muszą więc współpracować przynajmniej 2 separatory OGMS o wydajności 10 t/h każdy. Separator OGMS może odseparować tylko siarkę pirytową. W wa-

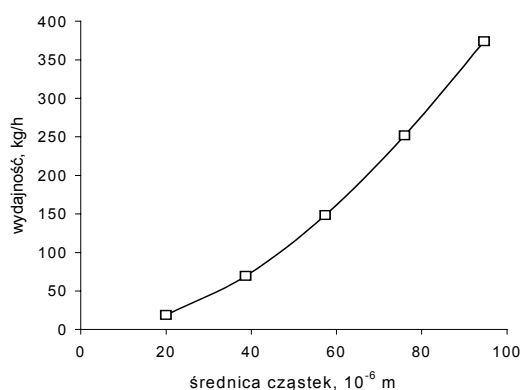
runkach technicznych stopień odzysku pirytu można oszacować na 75 %. Zawartość siarki w węglu po separacji OGMS wyniesie więc:

$$(4-15) \quad \%S_M = \%S (1 - (\%FeS_2|_S/100\%) 0,75) = 0,72 \pm 0,96\%$$

Zastosowanie nadprzewodnikowych separatorów OGMS pozwoli na obniżenie ilości siarki wpadającej do kotła z $(0,9 \div 1,2) \%$ do $(0,72 \div 0,96) \%$. Zawartość siarki pirytowej w analizowanym węglu jest mała, więc również obniżenie zawartości siarki przy pomocy separatora OGMS jest małe. Ze względu na kary za zanieczyszczanie środowiska stopień oczyszczenia węgla jest wystarczający. W innych gatunkach węgla siarka pirytowa może stanowić nawet połowę całkowitej siarki w węglu [112].



Rys. 4.10. Wydajność separatora z elektromagnesem LTS (II, tab. 16) w funkcji prędkości transportu ośrodka oraz średnicy cząstek (μm)



Rys. 4.11. Wydajność separatora z elektromagnesem LTS (II, tab. 16) w funkcji średnicy cząstek dla ustalonej prędkości transportu ośrodka = 25 m/s

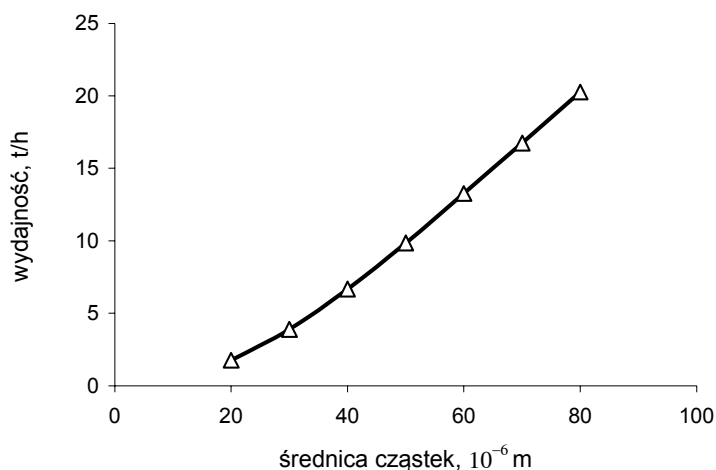
Wydajność separacji OGMS jest funkcją wielu parametrów. W rozpatrywanym przypadku istotna jest zależność od prędkości transportu oraz granulacji separowanego materiału. Zależność wydajności od prędkości transportu i średnicy separowanych cząstek w separatorze z elektromagnesem LTS (II, tab. 16) przedstawia rys. 4.10. Ponieważ za młynem 80 % węgla to cząstki poniżej 80 μm przyjęto do obliczeń wydajności średnią granulację = 50 μm . Dla takiej granulacji wydajność prototypu separatora OGMS z elektromagnesem LTS (II, tab. 16) przy prędkości transportu ośrodka = 25 m/s wynosi tylko ok. 100 kg/h (rys. 4.11).

Dla separatora o wydajności 10 t/h zaprojektowany został, z wykorzystaniem modelu numerycznego SEP_MAG, nowy elektromagnes nawinięty przewodem Nb-Ti - SKNT-0,85-8910-0,42. Parametry tego elektro-

magnesu przedstawione są w tab. 24. Wstępną kalkulację kosztów separatora z elektromagnesem o parametrach z tab. 24 przedstawiono w tab. 25.

Tab. 24. Parametry 2-cewkowego elektromagnesu nadprzewodnikowego dla separatora OGMS o wydajności 10 t/h.

Odległość pomiędzy cewkami	m	0,14
Promień wewnętrzny cewki	m	0,45
Promień zewnętrzny cewki	m	0,50
Prąd roboczy	A	227
Długość cewki	m	0,40
Liczba zwojów w cewce		15860
Przewód nadprzewodnikowy		SKNT-0,85-8910-0,42
Długość przewodu	m	2 x 47336



Rys. 4.12. Wydajność separatora z elektromagnesem Nb-Ti (tab. 24) w funkcji średnicy cząstek dla prędkości transportu ośrodka = 25m/s

Tab. 25. Przybliżony koszt separatora OGMS

Element separatora	koszt, PLN
Elektromagnes nadprzewodnikowy	530 000
kriostat z kriogenicznymi urządzeniami pomocniczymi	100 000
dewar helowy i azotowy	60 000
Zasilacz	20 000
moduł separujący	40 000
RAZEM	750 000

Tab. 26. Przybliżone koszty inwestycyjne instalacji odsiarczania dla kotła OP-215

Element	Liczba	koszt, PLN
separator OGMS	2	1 500 000
skraplarka helowa	1	1 300 000
Razem		2 800 000

Elektromagnes nadprzewodnikowy chłodzony będzie techniką w kąpieli ciekłego helu. W celu zapewnienia pełnej autonomii układu separacyjnego wydaje się słuszne dołączenie do systemu skraplarki. Jedna skraplarka, w zależności od wydajności może obsłużyć dowolną liczbę separatorów. Koszt skraplarki w małym stopniu zależy od jej wydajności. Przybliżony koszt skraplarki helowej, obsługującej dwa separatory wynosi 1.300.000 PLN. W instalacji bez skraplarki koszty inwestycyjne zmniejszają się z 2.800.000 PLN do 1.500.000 PLN ale zwiększa to koszty eksploatacyjne o ok. 200-400 PLN/dobę.

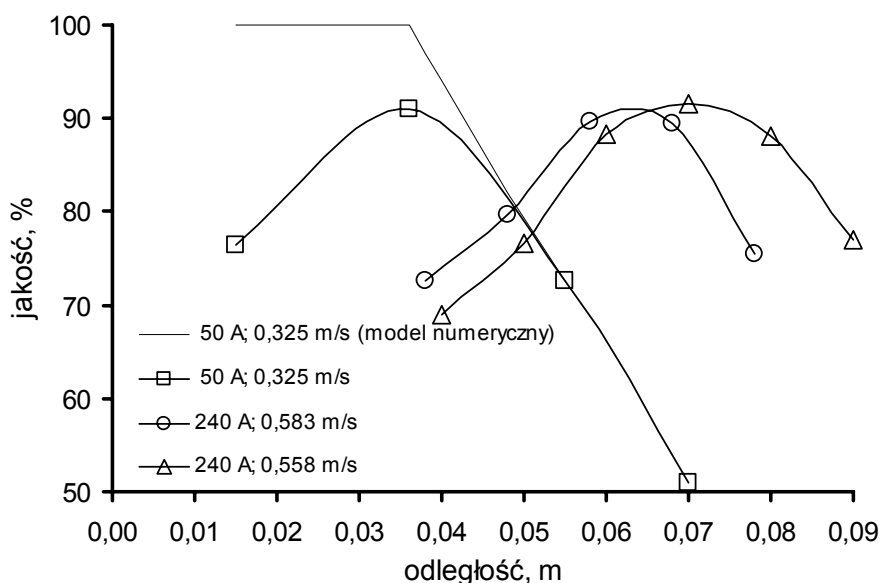
4.2. Matematyczno-numeryczne modele hybrydowe krawędzi wychwytu cząstek w separatorze OGMS

Przyjęto, że modele te dotyczą, podobnie jak model numeryczny trajektorii cząstki, trzeciego etapu pracy separatora, w którym temperatura pracy elektromagnesu nadprzewodnikowego została ustalona, a układ chłodzenia zapewnia jej utrzymanie na wymaganym poziomie. Zagadnienia cieplne mogą być więc pominięte. W modelach tych zakłada się, że separacja cząstek odbywa się w przestrzeni pomiędzy wewnętrzną a zewnętrzną ścianką separatora, które mają kształt cylindrów współosiowych z elektromagnesem nadprzewodnikowym. Podczas separacji cząstek ferromagnetycznych część tych cząstek zostaje wychwyconych na wewnętrznej ściance separatora. Wychwycone cząstki ferromagnetyczne formują krawędź wychwytu. Pole magnetyczne wytwarzane jest więc przez elektromagnes nadprzewodnikowy w środowisku nieliniowym. W modelach tych rozpatrywane są zjawiska magnetostatyczne i hydrodynamiczne w przestrzeni roboczej separatora. Ponieważ zarówno elektromagnes jak i przestrzeń robocza separatora OGMS mają symetrię obrotową, obliczenia magnetostatyczne modelu można było realizować w programach polowych PC-OPERA i FLUX2D. Obliczenia hydrodynamiczne realizowane są w programach komputerowych napisanych przez autora w C++ [113]. Częścią magnetostatyczną i hydrodynamiczną sterują programy zarządzające napisane przez autora. Zasadniczą częścią tych hybrydowych modeli

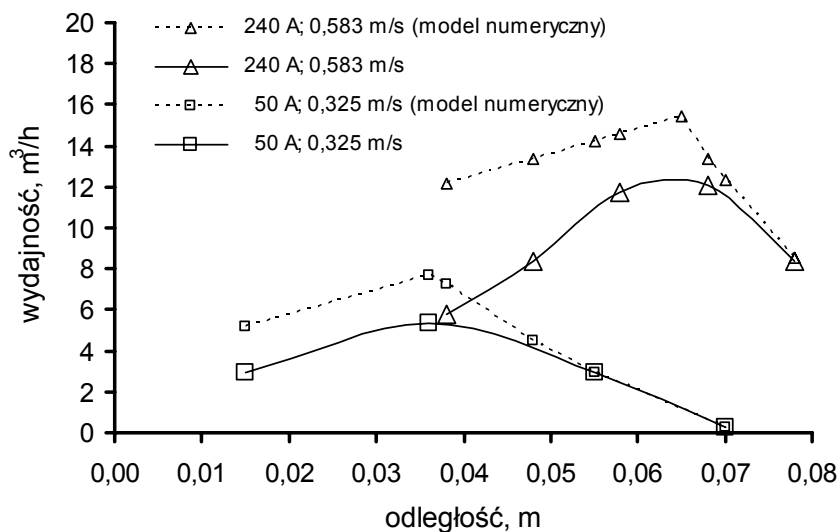
numerycznych są programy napisane w C++, a obliczenia w programach FLUX2D i PC-OPERA wspomagają tylko obliczenia w programach C++. Dokładna analiza zjawisk związanych z wychwytywaniem cząstek w separatorze pozwoliła na opracowanie modelu matematycznego krawędzi wychwytu.

4.2.1. Analiza sił wychwytyjących cząstki i model matematyczny

Wychwycony materiał ferromagnetyczny zaburza przepływ strumienia cząstek w separatorze prowadząc nawet do zablokowania przestrzeni roboczej. Obserwowane było to podczas badań eksperymentalnych prowadzonych z udziałem autora. Badania dotyczyły oczyszczania wody z zanieczyszczeń ferromagnetycznych. Rys. 4.13 oraz rys. 4.14 przedstawiają wyniki badań eksperymentalnych jakości oraz wydajności separacji w nadprzewodnikowym separatorze OGMS [61][81][107]. Przebiegi teoretyczne obliczone z wykorzystaniem modelu numerycznego SEP_MAG pokazują, jaka byłaby jakość i wydajność separacji, gdyby pominięto niekorzystne zjawisko wychwytywania cząstek w separatorze. Im większe pole magnetyczne w przestrzeni roboczej separatora tym większa maksymalna wydajność separacji, ale również większe różnice pomiędzy obliczeniami w modelu numerycznym nie uwzględniającym zjawiska wychwytu a danymi z eksperymentów.



Rys. 4.13. Jakość oczyszczania wody z cząstek ferromagnetycznych w separatorze OGMS [107] w funkcji odległości separatora od ścianki kriostatu dla różnych prądów w elektromagnesie i różnych prędkości transportu ośrodka



Rys. 4.14. Wydajność oczyszczania wody z cząstek ferromagnetycznych w separatorze OGMS [107] w funkcji odległości separatora od ścianki kriostatu dla różnych prądów w elektromagnesie i różnych prędkości transportu ośrodka

Badania eksperymentalne wykazały (rys. 4.13 i rys. 4.14), że możliwe jest prowadzenie skutecznej separacji z dużą wydajnością i jakością z materiałem wychwyconym na ścianie separatora, gdy odpowiednio dobrane zostaną parametry separacji.

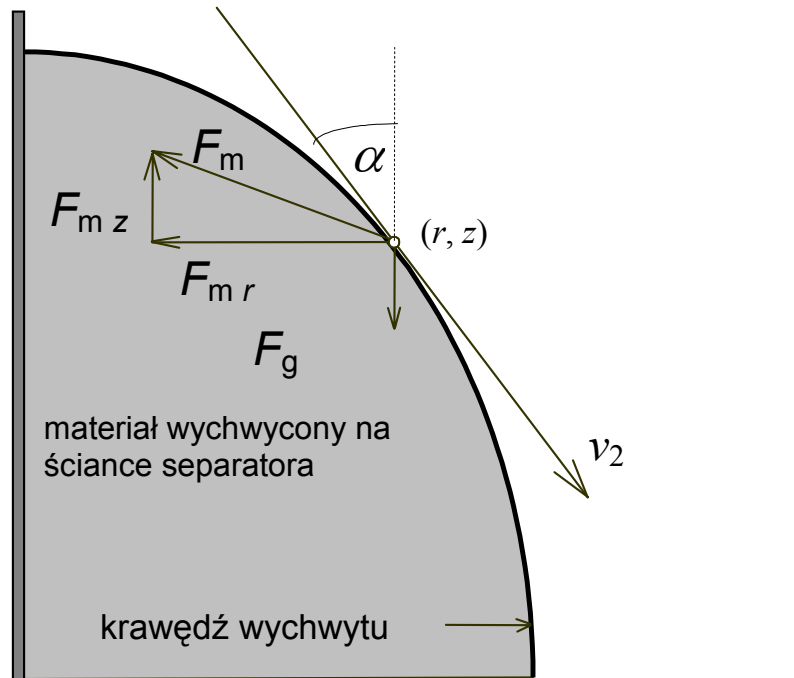
Jeżeli cząstka zostanie wychwycona na ścianie to znaczy, że siła magnetyczna przeważa nad pozostałymi. Cząstki zaczynają gromadzić się na ścianie separatora zmniejszając przekrój przepływu zawiesiny w separatorze. Przy założeniu, że zawiesina jest nieściśliwa oraz, że prędkość ma stałą wartość w każdym miejscu określonego poprzecznego przekroju przepływu, prędkość zawiesiny jest odwrotnie proporcjonalna do pola przekroju, przez który przepływa:

$$(4-16) \quad S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2$$

gdzie S_1 , S_2 oznaczają pola przekroju przestrzeni roboczej separatora, a v_1 i v_2 – prędkości zawiesiny. Jeżeli r oznacza promień powierzchni wychwytu w separatorze oraz przyjmując, że $v_t = v_1$ to:

$$(4-17) \quad v_2 = v_t \cdot (R_2^2 - R_1^2) / (R_2^2 - r^2)$$

gdzie R_1 i R_2 oznaczają promień wewnętrzny i zewnętrzny przestrzeni roboczej separatora. Przyrost materiału ferromagnetycznego powoduje zmniejszenie przekroju separatora i w konsekwencji wzrost prędkości przepływu, co zwiększa wartość siły hydrodynamicznej działającej na cząstki.



Rys. 4.15. Kierunki sił i prędkości w przestrzeni roboczej separatora OGMS na krawędzi wychwyty

Z drugiej strony, wychwytywany materiał ferromagnetyczny działa jak ekran magnetyczny zmniejszając wartość siły magnetycznej działającej na cząstkę. Te dwa czynniki mogą doprowadzić do zatrzymania procesu przyrostu materiału ferromagnetycznego w separatorze i ukształtowania krawędzi wychwyty nie blokującej przepływu. Jeżeli α oznacza kąt pomiędzy krawędzią wychwyty a osią Z , (rys. 4.15) to spełnione jest następujące równanie, które otrzymuje się przez porównanie rzutów sił na oś o kierunku prędkości v_2 [107][106][114]:

$$(4-18) \quad f_b(r, z) = 6\pi \cdot R_c \cdot \eta \cdot v_t \cdot \frac{R_2^2 - R_1^2}{R_2^2 - r^2} + \\ - \tau (\cos \alpha \cdot F_{mr}(r, z) - \sin \alpha \cdot (F_{mz}(r, z) - F_g)) + \\ - (\sin \alpha \cdot F_{mr}(r, z) + \cos \alpha \cdot (F_{mz}(r, z) - F_g))$$

gdzie: r, z – współrzędne punktu na krawędzi wychwyty ($R_1 \leq r < R_2$), τ – współczynnik tarcia, η – współczynnik lepkości ośrodka, v_t – początkowa prędkość transportu, R_1 i R_2 – promień wewnętrzny i zewnętrzny przestrzeni roboczej, χ – podatność magnetyczna cząstki, R_c – promień cząstki, α – kąt pomiędzy styczną do krawędzi wychwyty w (r, z) a osią Z , F_g – siła grawitacji, F_{mr} , F_{mz} – radialna i osiowa składowa siły magnetycznej.

Jeżeli na krawędzi wychwyty siła hydrodynamiczna równoważona jest przez siłę magnetyczną to w równaniu (4-18) $f_b(r, z) = 0$. Po wprowadzeniu $f_{b_m}(r, z)$ i $f_{b_d}(r, z)$ równanie równowagi hydrodynamiczno-magnetostaticznej na krawędzi wychwyty przybiera postać:

$$(4-19) \quad \begin{cases} f_{b_d}(r, z) = 6\pi \cdot R_c \cdot \eta \cdot v_t \cdot \frac{R_2^2 - R_1^2}{R_2^2 - r^2} \\ f_{b_m}(r, z) = \sin \alpha \cdot F_{m_r}(r, z) + \cos \alpha \cdot (F_{m_z}(r, z) - F_g) + \\ \quad + \tau (\cos \alpha \cdot F_{m_r}(r, z) - \sin \alpha \cdot (F_{m_z}(r, z) - F_g)) \\ f_{b_d}(r, z) = f_{b_m}(r, z) \end{cases}$$

gdzie: (r, z) – współrzędne punktu leżącego na krawędzi wychwyty, $f_{b_d}(r, z)$ – część równania brzegu zależna od przepływu, $f_{b_m}(r, z)$ – część równania brzegu zależna od siły magnetycznej.

Określenie kształtu wychwyconego materiału pozwala na właściwe zaprojektowanie przestrzeni roboczej separatora tak, żeby przepływ separowanej zawiesiny nie był blokowany. Właściwe rozmieszczenie przegród separacyjnych ogranicza również blokowanie wypływu odchylonych cząstek ferromagnetycznych z separatora, co zwiększa jakość separacji. Znajomość kształtu wychwyconego materiału pozwala na obliczanie rozkładu pola magnetycznego w pracującym separatorze. Pole magnetyczne zostaje osłabione w przestrzeni roboczej separatora, ale jednocześnie ulega wzmocnieniu w środku elektromagnesu powodując wzrost maksymalnej indukcji magnetycznej w cewkach nadprzewodnikowych. Ten wzrost indukcji może doprowadzić do przekroczenia warunków krytycznych w nadprzewodniku, do wyjścia elektromagnesu ze stanu nadprzewodzącego i do przerwania procesu separacji. W skrajnym przypadku może dojść do uszkodzenia elektromagnesu. Wychwycony materiał należy uwzględnić już w fazie projektowania elektromagnesu nadprzewodnikowego oraz później, przy projektowaniu przestrzeni roboczej separatora.

4.2.2. Hybrydowy model numeryczny wychwyty cząstek (FLUX2D)

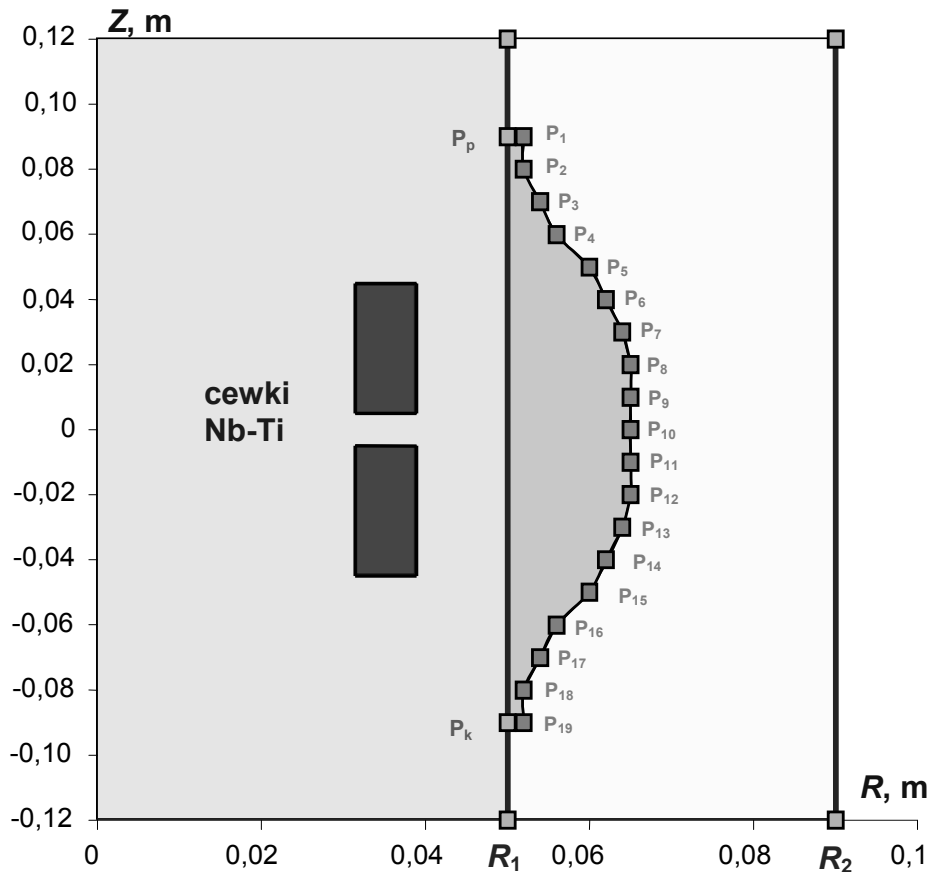
Model numeryczny dotyczy separatora magnetycznego OGMS z elektromagnesem LTS (I, tab. 16, rys. 3.12). Materiał wychwytywany w przestrzeni roboczej reprezentowany jest przez krawędź wychwyty zdefiniowaną przez krzywą łamaną łączącą punkty od P_1 do P_{19} (rys. 4.16),

których współrzędne osiowe (w metrach) zmieniają się od 0,09 do -0,09 co -0,01 [106] [107].

Obliczenia krawędzi wychwyty prowadzone są przy wykorzystaniu moduły magnetostaticznego MS programu polowego FLUX2D [115] [91]. W module MS zmienną podstawową jest potencjał wektorowy a rozwiązane jest równanie [91][115]:

$$(4-20) \quad \text{rot}((1/\mu) \cdot \text{rot}(\vec{A})) = \vec{J} - \text{rot}(\vec{H}_{ko})$$

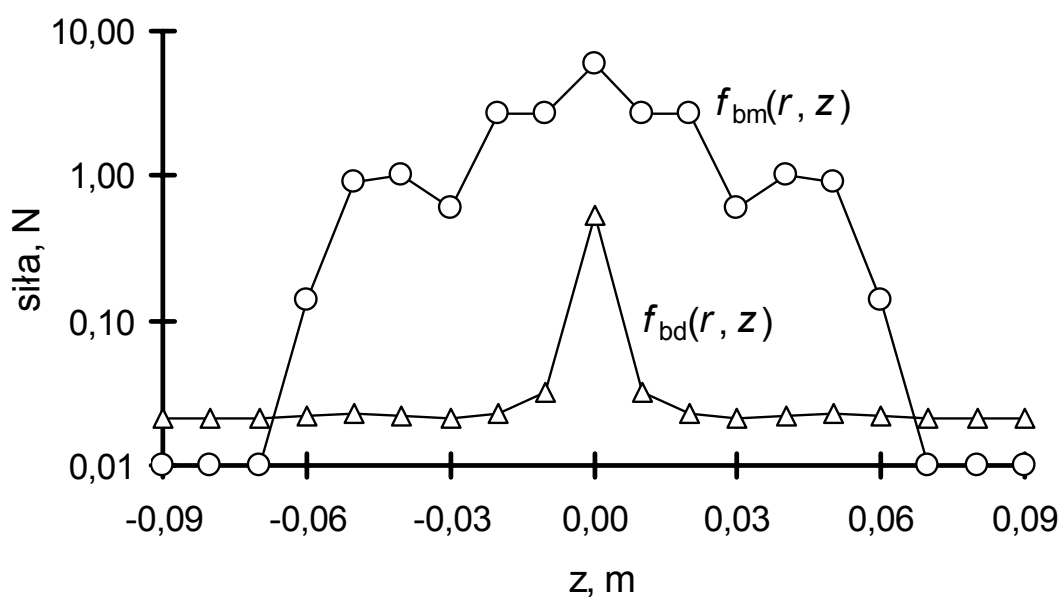
gdzie A oznacza potencjał wektorowy (Wb/m), J – gęstość prądu (A/m^2), μ – przenikalność magnetyczna (H/m), H_{ko} – natężenie pola koercji magnesu trwałego (A/m).



Rys. 4.16. Geometria układu obliczeniowego

Zagadnienie obliczania krawędzi wychwyty można ogólnie sformułować jako: obliczanie współrzędnych brzegu środowiska nieliniowego, czyli współrzędnych punktów od P_1 do P_{19} (rys. 4.16), przy zadanej funkcji na tym brzegu, zależnej od tych współrzędnych. Jest to więc poszukiwanie

geometrii obszaru obliczeniowego przy znanych warunkach równowagi na granicy obszaru o nieliniowych właściwościach magnetycznych. Warunki równowagi nie są jednak takiej samej natury jak rozwiązywane zagadnienie. Problem jest magnetostaticzny natomiast warunki są hydrodynamiczno-magnetostaticzne. W każdym kroku obliczeniowym konieczna jest zmiana geometrii układu obliczeniowego zgodnie z danymi wygenerowanymi w kroku poprzednim, sprawdzenie warunków równowagi hydrodynamiczno-magnetostaticznych na krawędzi wychwytu i przygotowanie zmian geometrii dla kroku następnego. Zarówno fakt zmiany geometrii obszaru obliczeniowego jak i warunki hydrodynamiczno-magnetostaticzne wykluczają możliwość prowadzenia obliczeń tylko w narzędziowym programie polowym. W modelu numerycznym krawędzi wychwytu w programie FLUX2D obliczane są tylko parametry magnetostaticzne na krawędzi wychwytu. Warunki hydrodynamiczne, ocena konieczności i kierunku zmian geometrii obszaru obliczeniowego oraz generowanie zmian geometrii wykonywane są poza programem FLUX2D. W oparciu o wstępne obliczenia układu bez wychwyconego materiału, następuje określenie wstępnego kształtu krawędzi wychwytu. Po każdej sekwencji modułów **PREFLU**, **PROPHY** (albo **COPPRO**), **RESGEN** i **EXPGEN** [115] przeprowadzona zostaje analiza zgodności przewidywań i wyników obliczeń i podjęta decyzja: czy zmienić geometrię układu dla kolejnego kroku obliczeniowego, czy zakończyć obliczenia.



Rys. 4.17. Wykresy części $f_{bm}(r, z)$ i $f_{bd}(r, z)$ równania równowagi na krawędzi wychwytu w kolejnym kroku obliczeniowym [106]

Wykresy składowych równania równowagi na krawędzi wychwytu w kolejnym kroku obliczeniowym przedstawia rys. 4.17. Jeżeli $f_{b_m}(r, z)$ ma w wybranym punkcie krawędzi większą wartość niż $f_{b_d}(r, z)$ to należy zwiększyć wartość współrzędnej radialnej tego punktu i odwrotnie: jeżeli $f_{b_m}(r, z) < f_{b_d}(r, z)$ to wartość współrzędnej radialnej punktu należy zmniejszyć. Zwiększanie współrzędnej radialnej punktu zmniejsza siłę magnetyczną i zwiększa siłę hydrodynamiczną i odwrotnie.

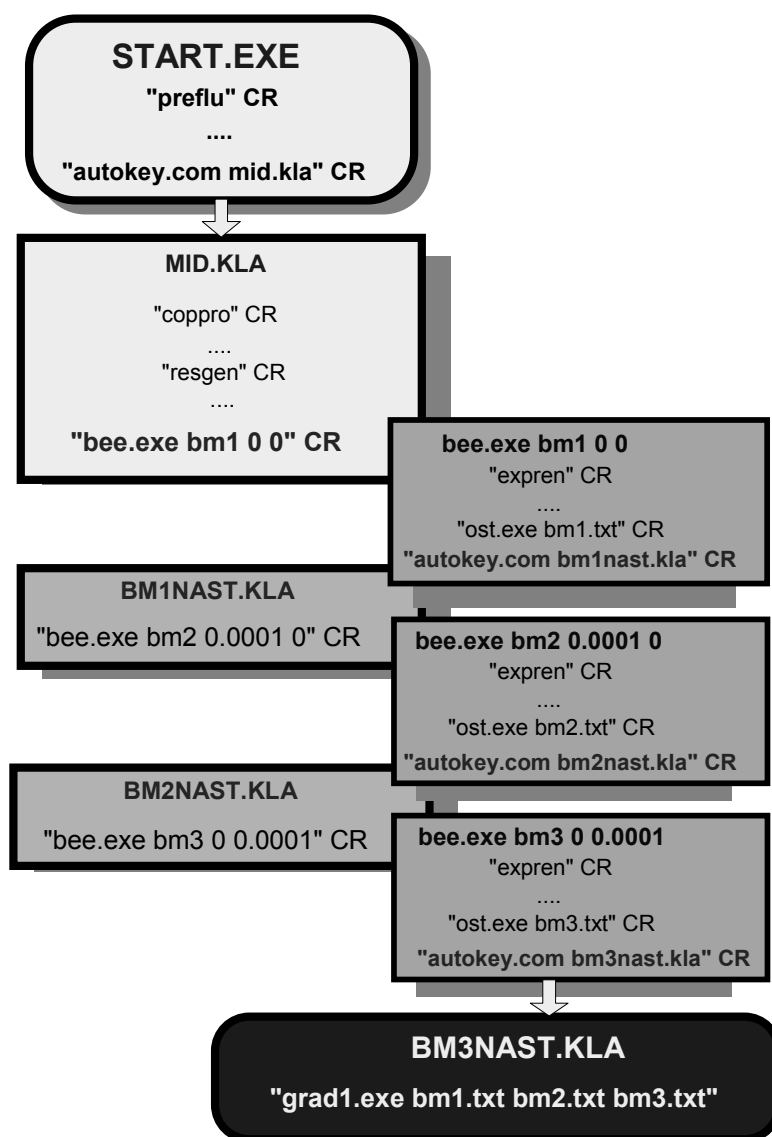
Obliczenia można przerwać, gdy w każdym punkcie wyznaczającym krawędź wychwytu części równania równowagi mają równą wartość, czyli:

$$(4-21) \quad \left\{ \begin{array}{l} f_{b_m}(P_1) = f_{b_d}(P_1) \\ f_{b_m}(P_2) = f_{b_d}(P_2) \\ f_{b_m}(P_3) = f_{b_d}(P_3) \\ \dots\dots\dots \\ f_{b_m}(P_{10}) = f_{b_d}(P_{10}) \\ \dots\dots\dots \\ f_{b_m}(P_{19}) = f_{b_d}(P_{19}) \end{array} \right.$$

Analizując wykresy na rys. 4.17 i biorąc pod uwagę geometrie układu (rys. 4.16) należy zmniejszyć wartości współrzędnych radialnych punktów $P_1, P_2, P_3, P_{17}, P_{18}, P_{19}$ a wartości współrzędnych radialnych punktów od P_4 do P_{16} zwiększyć [106].

Obliczenia krawędzi wychwytu prowadzone przy wykorzystaniu modelu numerycznego są bardzo czasochłonne. Wynika to stąd, że zmiana współrzędnych któregokolwiek z 19 punktów wyznaczających krawędź wychwytu (rys. 4.16) powoduje zmiany w równaniu równowagi (4-19) we wszystkich 19 punktach. Konieczne są bardzo małe zmiany współrzędnych punktów. Wydłuża to czas obliczeń, który może trwać kilka dni (bez przerwy). Istotna jest więc również odpowiednia organizacja obliczeń wymagająca innego podejścia do współpracy z programem FLUX2D. Standardowa współpraca z programem FLUX2D może odbywać się tylko przy użyciu klawiatury komputera. Należało zatem użyć programu zewnętrznego, który symuluje wykorzystanie klawiatury bez faktycznego jej używania. Sterowanie całym krokiem obliczeniowym odbywa się przez programy zewnętrzne (programy napisane przez autora), które uruchamiają kolejne moduły programu FLUX2D: preprocesor, moduł obliczeniowy i postprocesor; naprzemiennie z programami wprowadzającymi zmiany do FLUX2D i odczytującymi z FLUX2D wyniki obliczeń do analizy. Współ-

praca pomiędzy programami autora a modułami programu FLUX2D odbywa się za pomocą generowanych przez te programy sekwencji tekstowych wykorzystywanych następnie przez program symulujący wykorzystanie klawiatury. Dane obliczeniowe z FLUX2D są zapisywane do plików tekstowych wykorzystywanych przez programy autorskie. Algorytm automatyzacji obliczeń krawędzi wychwyty przedstawia rys. 4.18.



Rys. 4.18. Algorytm automatyzacji obliczeń krawędzi wychwyty

Program *START.EXE*³⁵ przejmuje sterowanie programem FLUX2D. Program ten poszukuje, w katalogu roboczym pliku o nazwie *PUNK*, ze

³⁵ Program napisany przez autora w C++

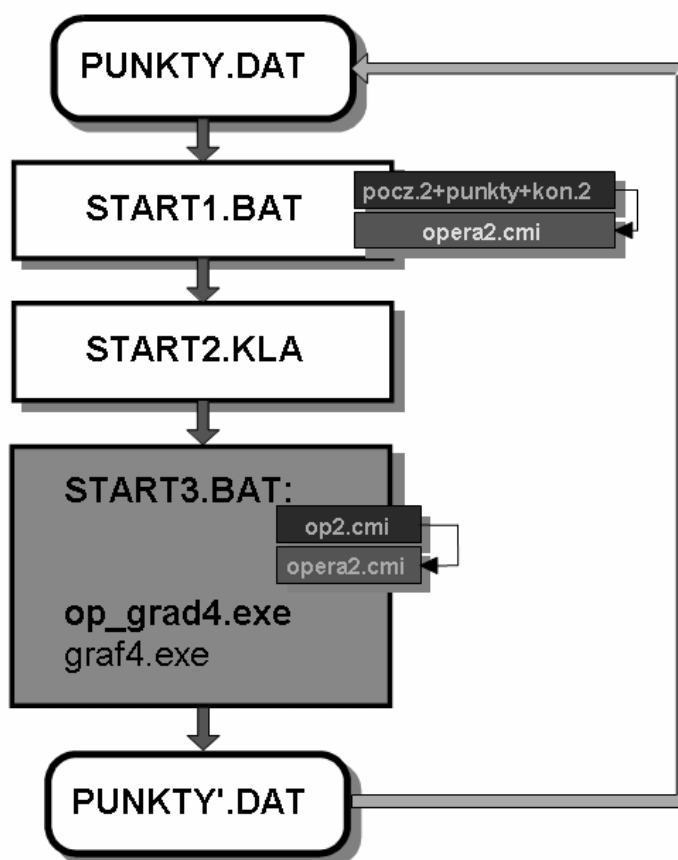
współrzędnymi krawędzi wychwyty, z rozszerzeniem będącym kolejną liczbą trzycyfrową. Jeżeli np. ostatnim plikiem ze współrzędnymi jest plik **PUNK.013** to dane z tego pliku użyte zostaną dla utworzenia sekwencji tekstowej uruchamiającej moduł preprocesora **PREFLU** i po wprowadzeniu geometrii układu obliczeniowego generowana jest siatka obliczeniowa. Na zakończenie wykonywania programu **START.EXE** następuje wywołanie sekwencji testowej z pliku **MID.KLA**³⁶ przez komendę: `autokey.com mid.kla`. Sekwencja tekstowa **MID.KLA** uruchamia kolejno moduły **COPPRO** i **RESGEN**. Następnie trzy razy zostaje wywołany program **BEE.EXE**³⁵ z odpowiednimi parametrami, który korzystając z modułu postprocesora **EXPGEN** oblicza wartości indukcji magnetycznej w punktach krawędzi wychwyty oraz w sąsiedztwie tych punktów. Wyniki tych obliczeń zapisane zostają w plikach *bm1.txt*, *bm2.txt* i *bm3.txt*. Te trzy pliki wykorzystuje program **GRADI.EXE**³⁵ wywołany z odpowiednimi parametrami na zakończenia bieżącego kroku obliczeniowego. Program **GRADI.EXE** oblicza i analizuje siły magnetyczne i hydrodynamiczne na krawędzi wychwyty (równanie równowagi (4-19)) i na tej podstawie zmienia geometrię krawędzi wychwyty zapisując ją w pliku o nazwie **PUNK** z kolejnym numerem w rozszerzeniu (**PUNK.014** jeżeli do ciągu obliczeń wykorzystane zostały współrzędne z pliku **PUNK.013**). Utworzenie nowego pliku **PUNK.014** (przykładowo) pozwala rozpocząć kolejny krok obliczeniowy przez wywołanie programu **START.EXE**.

Podczas prowadzenia obliczeń zdarzały się niekontrolowane przerwy w działaniu modelu numerycznego. Po długotrwałym testowaniu modelu numerycznego stwierdzono, że przerwy te nie były wywoływane przez programy napisane przez autora, ale przez przypadkowe błędy generatora siatki w module **PREFLU**. Po wygenerowaniu siatki z tzw. „słabymi elementami” (pure elements) cały system obliczeniowy zawieszał działanie. „Słabe elementy” nie stanowią problemu przy ręcznej obsłudze programu **FLUX2D**. Jednak obliczenia prowadzone, bez nadzoru, w nocy czy w weekendy bardzo często były przerywane, co wydłużało czas do otrzymania pożądaných wyników. Ponieważ pojawianie się przypadkowych błędów generatora siatki programu **FLUX2D** nie jest możliwe do wyeliminowania (użytkownik nie ma dostępu do kodu źródłowego generatora siatki obliczeniowej programu **FLUX2D**) autor postanowił wybrać inny program narzędziowy do prowadzenia długotrwałych obliczeń krawędzi wychwyty. Decyzja o zmianie programu narzędziowego spowodowana została wykryciem w programie błędu uniemożliwiającego prowadzenie długotrwałych obliczeń.

³⁶ Napisana przez autora

4.2.3. *Hybrydowy model numeryczny wychwytu cząstek (PC-OPERA)*

Model numeryczny dotyczy, tak jak model opisany w poprzednim rozdziale, separatora magnetycznego OGMS z elektromagnesem LTS (I, tab. 16, rys. 3.12). Zautomatyzowany schemat obliczeń krawędzi wychwytu przy użyciu programu PC-OPERA [116] [106] przedstawia rys. 4.19. Geometria krawędzi wychwytu w programie PC-OPERA jest podobna do tej z programu FLUX2D (rys. 4.16). W przekroju dwuwymiarowym wychwycony materiał ferromagnetyczny zajmuje obszar pomiędzy prostą łączącą punkt P_p z punktem P_k a krzywą łamaną przechodzącą przez punkty od P_1 do P_{19} . Współrzędne punktów tworzących krzywą łamaną obrazującą krawędź wychwytu umieszczone są w pliku **PUNKTY.DAT**.



Rys. 4.19. Schemat automatyzacji obliczeń krawędzi wychwytu przy użyciu programu PC-OPERA

Organizacja obliczeń w modelu numerycznym wykorzystującym program PC-OPERA jest inna od tej w modelu numerycznym bazującym na programie FLUX2D, opisanej w rozdziale 4.2.2. Współpraca modelu

numerycznego z programem PC-OPERA odbywa się przez odpowiednio skomponowane przez autora pliki sterujące **opera2.cmi**. Uruchomienie **START1.BAT**³⁷ rozpoczyna ciąg obliczeń jednego kroku obliczeniowego modelu numerycznego zakończonych po sekwencji tekstowej **START2.KLA**³⁷ i pliku wykonawczym **START3.BAT**³⁷ utworzeniem pliku **PUNKTY'.DAT** z nowymi współrzędnymi punktów określających krawędź wychwyty. Jeżeli wszystkie różnice radialnych współrzędnych odpowiednich punktów ze plików **PUNKTY.DAT** i **PUNKTY'.DAT** są dostatecznie małe to obliczenia zostają zakończone. Jeżeli nie to obliczenia rozpoczynają się od początku z nowymi współrzędnymi z pliku **PUNKTY'.DAT**. Decyzję o tym podejmowana jest w programie **op_grad4.exe**³⁸ uruchamiany z programem graficznym **graf4.exe**³⁸ na zakończenie **START3.BAT**.

Przyjęto, że w pierwszym kroku obliczeniowym w separatorze jest niezerowy obszar z wychwyconym materiałem ferromagnetycznym o grubości równej $(r-R_1) = 0,001$ m oraz w trakcie obliczeń grubość ta nie może zostać zmniejszona poniżej 0,001 m. Wynika to z wymagań generatora siatki obliczeniowej programu PC-OPERA. Z drugiej strony grubość obszaru wychwyconego materiału powinna być mniejsza od grubości separatora, czyli mniejsza od (R_2-R_1) . Jeżeli grubość byłaby równa (R_2-R_1) to w równaniu (4-17) prędkość wzrosłaby do ∞ (dzielenie przez zero). Przyjęto więc, że maksymalna grubość wychwyconego materiału nie może przekraczać wartości $(R_2-R_1-0,001)$.

Obliczenia rozpoczynane są od początkowego kształtu wychwyconego materiału z grubością we wszystkich punktach równą 0,001 m. Zanim dojdzie do osiągnięcia kształtu wychwyconego materiału, dla którego spełnione jest równanie równowagi hydrodynamiczno-magnetostatycznej dla krawędzi wychwyty (4-19), program zmienia kształt krawędzi. Jeżeli w punkcie krzywej łamanej siły wychwytyjące przeważają nad siłami unoszącymi cząstki – grubość materiału w tym punkcie, w następnym kroku obliczeniowym, zostaje zwiększona. W przeciwnym przypadku grubość w tym punkcie, w następnym kroku obliczeniowym, zostaje zmniejszona. Dokonywane jest to w programie **op_grad4.exe**.

Rys. 4.20 przedstawia tekst pliku **op2.cmi**³⁷ w formacie wewnętrznych poleceń [116] programu PC-OPERA, który wykorzystywany jest w **START3.BAT** do odczytywania w postprocesorze PC-OPERA parametrów pola magnetycznego w punktach krawędzi wychwyty o współrzędnych umieszczonych w pliku **PUNKTY.DAT**.

³⁷ Napisana przez autora

³⁸ Program napisany przez autora w C++

```

read tester.st
zoom
K
0.05 -0.1
0.12 0.1
$ open 1 punkty.dat read
$ open 2 f.xxx write
$ form 1 string string=' '
$ form 2 expo 0
$ assi 2 1 2 1 2 1 2
$ do #i 1 19
$ read 1 #x #y #s #d
point meth=cart comp=bmod xp=#x+0.0011 yp=#y
$ cons #bcr bmod*bmod
point meth=cart comp=bmod xp=#x+0.001 yp=#y+0.0001
$ cons #bcz bmod*bmod
point meth=cart comp=bmod xp=#x+0.001 yp=#y
$ write 2 #x #y (#bcr-bmod*bmod)/0.0001 (#bcz-bmod*bmod)/0.0001
$ end do
$ close 1
$ close 2
end
Yes

```

Rys. 4.20. OP2.CMI do odczytywania parametrów pola magnetycznego na krawędzi wychwyty

Parametry pola magnetycznego zapisywane są do pliku **f.xxx** używanego później przez program **op_grad4.exe** do wygenerowania nowych współrzędnych krawędzi wychwyty w pliku **PUNKTY'.DAT** i do sprawdzania równania równowagi (4-19) na krawędzi wychwyty. Jeżeli podjęta zostanie decyzja o kontynuowaniu obliczeń to dane z pliku **PUNKTY'.DAT** kopiowane są do pliku **PUNKTY.DAT** i krok obliczeniowy może zostać wznowiony. Przerwanie ciągu obliczeń możliwe jest wyłącznie w czasie działania (3 sekundy) pomocniczego programu graficznego **graf4.exe**³⁹, uruchamianego przed wznowieniem obliczeń w kolejnym kroku obliczeniowym. Model numeryczny przystosowany jest do prowadzenia długotrwałych obliczeń bez nadzoru i zabezpieczony jest przed przypadkowym przerwaniem działania. Nawet po wyłączeniu zasilania komputera, model numeryczny wznowia automatycznie działanie od ostatnio poprawnie zakończonego kroku obliczeniowego, gdy zasilanie zostanie przywrócone.

³⁹ Napisany w C++ przez autora

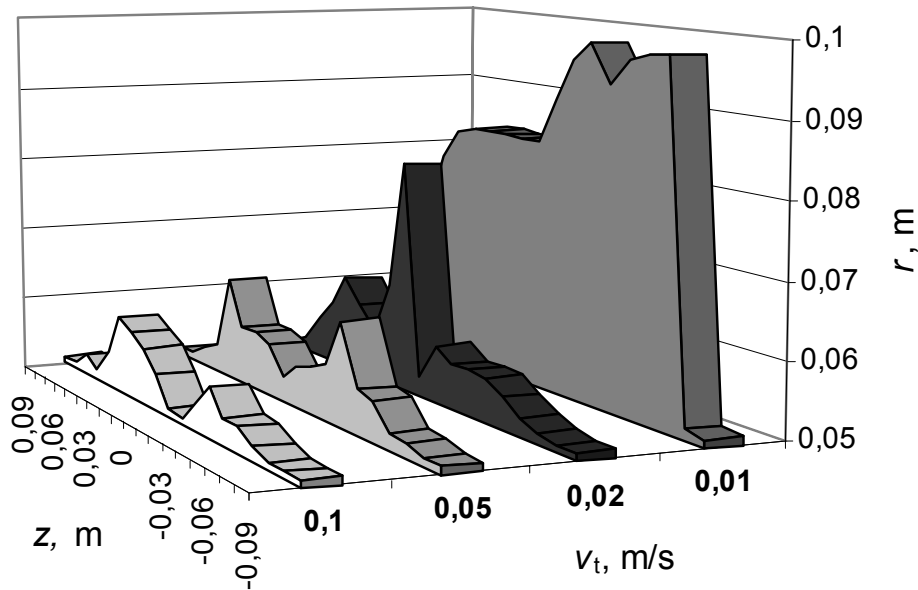
Model numeryczny krawędzi wychwyty wykorzystany został do przeanalizowania wpływu parametrów procesu separacji na kształt wychwyconego materiału ferromagnetycznego [107]. W celu porównania kształtów zaprezentowane zostały objętości i maksymalne grubości zgromadzonego materiału. Maksymalna grubości zgromadzonego materiału oraz współczynnik blokowania przepływu $\psi_{B\%}$ dostarczają informacji o możliwości zablokowania przepływu i zatrzymania pracy separatora.

$$(4-22) \quad \psi_{B\%} = \frac{r_m^2 - R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} \cdot 100\%$$

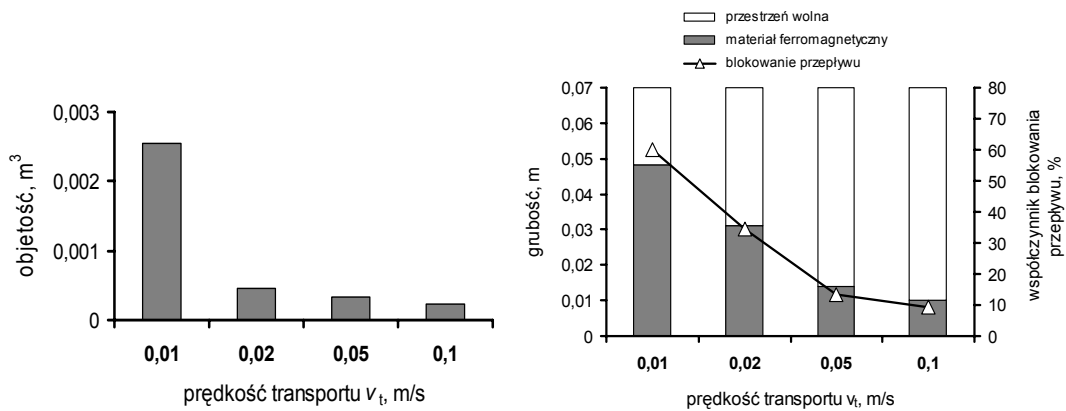
gdzie $\psi_{B\%}$ oznacza współczynnik blokowania przepływu, r_m – maksymalny promieniem krawędzi wychwyty, R_1 i R_2 – wewnętrzny i zewnętrzny promień przestrzeni roboczej separatora.

Im większa objętość materiału ferromagnetycznego wychwyconego w separatorze, tym większy jego wpływ na pole magnetyczne w uzwojeniu nadprzewodnikowym i większe zagrożenie przejściem elektromagnesu do stanu rezystywnego.

Zależność kształtu wychwyconego materiały w przestrzeni roboczej separatora od prędkości transportu dla cząstek o promieniu $R_c = 50 \mu\text{m}$, przy ustalonych rozmiarach przestrzeni roboczej równych odpowiednio $R_1 = 0,05 \text{ m}$ i $R_2 = 0,12 \text{ m}$ przedstawia rys. 4.21. Rys. 4.22 przedstawiający objętość i maksymalną grubość wychwyconego materiału oraz współczynnik blokowania przepływu, wskazuje na ich zależność od prędkości transportu. Im większa prędkość transportu tym mniejsza objętość wychwyconego materiału. Jeżeli maksymalna grubość wychwyconego materiału zbliża się do grubości separatora ($R_2 - R_1$) to może dojść do zablokowania przepływu. Spadek siły magnetycznej spowodowany przyrostem materiału wychwyconego jest w takim przypadku za mały i siła ta nie jest równoważona przez wzrastającą, na skutek zawężania przepływu, siłę hydrodynamiczną. Prowadzi to do zablokowania separatora. Dla prędkości transportu $v_t = 0,01 \text{ m/s}$ współczynnik blokowania przepływu zbliżony jest do 60 % co może wskazywać, że dla prędkości v_t mniejszych od 0,01 m/s przy zachowanych innych warunkach separacji może dojść do zablokowania przepływu w separatorze. Blokowania separacji przy zbyt małej prędkości transportu w stosunku do pola magnetycznego było obserwowane podczas eksperymentów dotyczących badania wydajności oraz jakości separacji. Bardzo znaczny (ponad pięciokrotny) jest przyrost objętości wychwyconego materiału przy zmniejszeniu prędkości transportu z 0,02 m/s do 0,01 m/s.



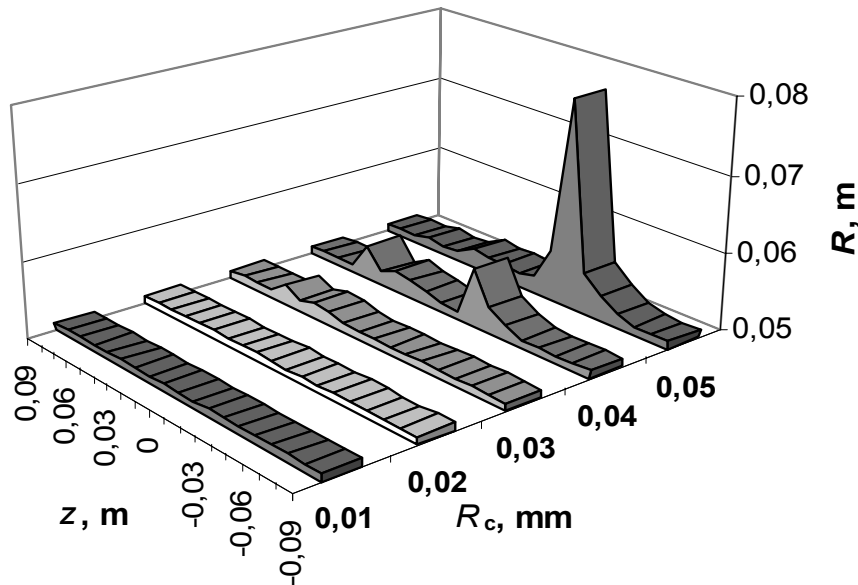
Rys. 4.21. Kształt krawędzi wychwyty w funkcji prędkości transportu ośrodka v_t , $R_c = 50 \mu\text{m}$, $R_1 = 0,05 \text{ m}$, $R_2 = 0,12 \text{ m}$



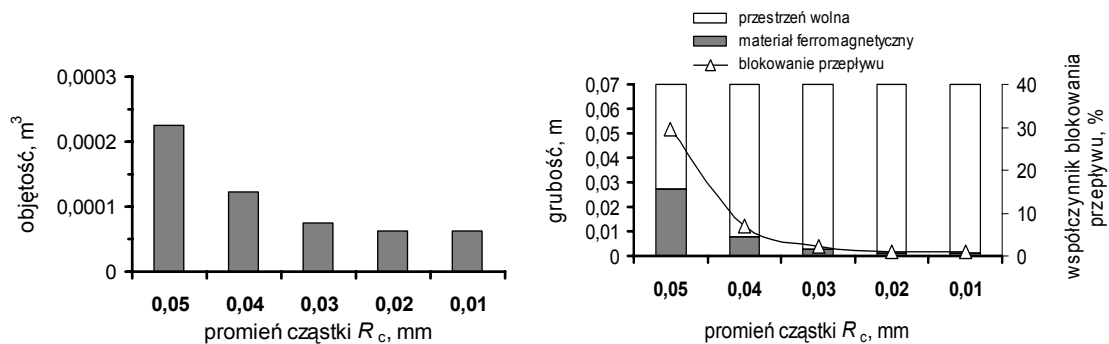
Rys. 4.22. Objętość, maksymalna grubość wychwyconego materiału ferromagnetycznego i współczynnik blokowania przepływu w funkcji prędkości transportu ośrodka dla warunków jak na rys. 4.21

Zależność kształtu krawędzi wychwyty od rozmiarów separowanych cząstek przy ustalonej prędkości transportu oraz ustalonych rozmiarach przestrzeni roboczej równych odpowiednio $R_1 = 0,05 \text{ m}$ i $R_2 = 0,12 \text{ m}$ przedstawia rys. 4.23. Zależności objętości i maksymalnej grubości wychwyconego materiału oraz współczynnika blokowania przepływu od rozmiarów cząstek otrzymane z wykresów na rys. 4.23 przedstawia rys. 4.24. Dla cząstek małych o promieniach $10 \mu\text{m}$ oraz $20 \mu\text{m}$ wychwytywanie materiału ferromagnetycznego jest śladowe – maksymalna grubość wych-

wyconego materiału ferromagnetycznego jest zbliżona do 0,001 m – co odpowiada grubości minimalnej wymaganej w obliczeniach. Dla cząstek o promieniu 30 μm pojawia się materiał ferromagnetyczny wychwycony w separatorze i zaczyna gwałtownie przyrastać wraz ze wzrostem promienia cząstek. Pokazuje to, że problem wychwytywania materiału ferromagnetycznego w separatorze może być znacznie ograniczony przez zmniejszenie granulacji separowanego materiału.



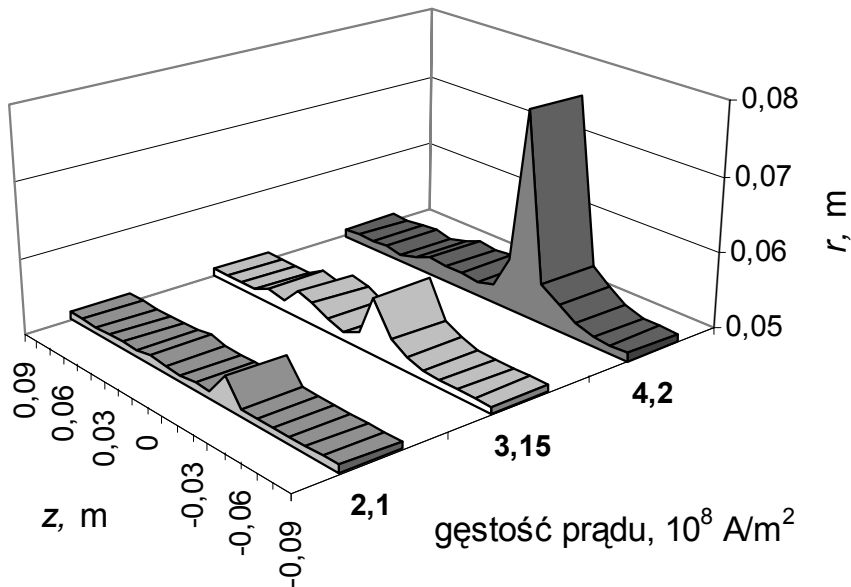
Rys. 4.23. Kształt krawędzi wychwytu w funkcji promienia cząstek R_c ,
 $v_t = 1 \text{ m/s}$, $R_1 = 0,05 \text{ m}$, $R_2 = 0,12 \text{ m}$



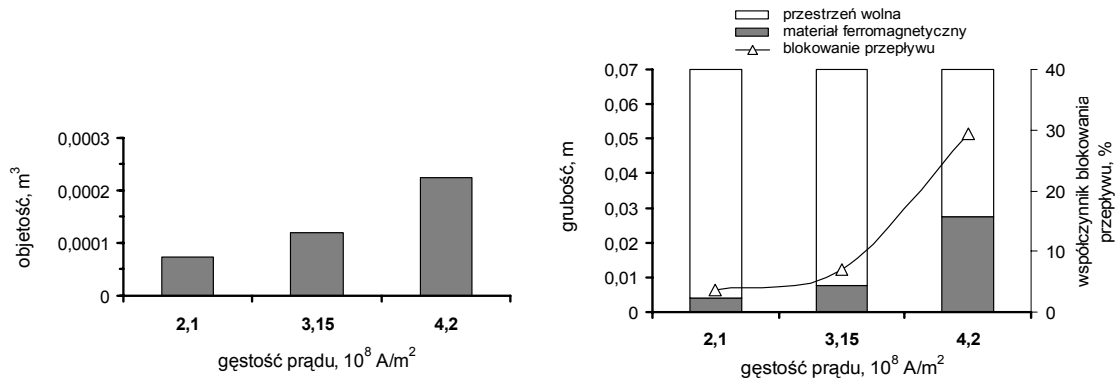
Rys. 4.24. Objętość i maksymalna grubość wychwyconego materiału ferromagnetycznego w przestrzeni roboczej separatora oraz współczynnik blokowania przepływu w funkcji promienia cząstki dla warunków jak na rys. 4.23

Zależność kształtu krawędzi wychwytu od gęstości prądu w cewkach dla cząstek o promieniu $R_c = 50 \mu\text{m}$ oraz dla prędkości transportu $v_t = 1 \text{ m/s}$

i $R_1 = 0,05$ m oraz $R_2 = 0,12$ m przedstawia rys. 4.25. Rys. 4.26 przedstawia objętość oraz maksymalną grubość wychwyconego materiału ferromagnetycznego i współczynnik blokowania przepływu na podstawie krzywych z rys. 4.25. Im większa wartość gęstości prądu w cewkach tym więcej materiału magnetycznego zostaje wychwycone w separatorze. Efekt ten był obserwowany podczas eksperymentów dotyczących badania wydajności oraz jakości separacji. Gęstość prądu w cewkach jest parametrem, który można w bardzo prosty sposób zmieniać i dostosowywać do innych warunków separacji ograniczając wychwytywanie materiału ferromagnetycznego w separatorze.



Rys. 4.25. Kształt krawędzi wychwyty w funkcji gęstości prądu w cewkach.
 $v_t = 1$ m/s, $R_1 = 0,05$ m, $R_2 = 0,12$ m, $R_c = 50$ μ m



Rys. 4.26. Objętość i maksymalna grubość wychwyconego materiału ferromagnetycznego w przestrzeni roboczej separatora oraz współczynnik blokowania przepływu w funkcji gęstości prądu w cewkach dla warunków jak na rys. 4.25

4.3. Podsumowanie modelowania numerycznego zjawisk magnetostatyczno-hydrodynamicznych

Zaprezentowane modele numeryczne zjawisk magnetostatycznych sprzężonych ze zjawiskami hydrodynamicznymi wykorzystują w całości lub decydującej większości programy komputerowe napisane przez autora. Dostęp do kodu źródłowego pozwala tutaj na wprowadzanie dowolnych zmian i pełną kontrolę nad przebiegiem obliczeń. W modelach numerycznych wykorzystujących autorskie programy komputerowe można bezpośrednio uzależnić właściwości materiałów nadprzewodnikowych jednocześnie od trzech parametrów: temperatury, gęstości prądu i indukcji magnetycznej, co nie jest możliwe w programach polowych. W modelu numerycznym trajektorii cząstki punkt pracy elektromagnesu nadprzewodnikowego może być dobierany automatycznie przez program. W hybrydowych modelach numerycznych krawędzi wychwyty (środowisko nieliniowe) programy polowe wykorzystywane są tylko do obliczeń magnetostatycznych. Modele numeryczne krawędzi wychwyty materiału ferromagnetycznego w przestrzeni roboczej separatora OGMS w połączeniu z modelem numerycznym trajektorii cząstki w separatorze OGMS pozwalają na kompleksowe badanie zjawisk zachodzących w przestrzeni roboczej nadprzewodnikowego separatora OGMS. W dwóch zaprezentowanych hybrydowych modelach numerycznych pokazano sposób organizacji obliczeń i współpracy różnych programów autorskich z programami narzędziowymi FLUX2D i PC-OPERA. Poprzez zmianę zewnętrznych programów obliczeniowych można tutaj sprzęgać zjawiska różnej natury ze zjawiskami magnetostatycznymi w uzwojeniach nadprzewodnikowych i modelować dowolne urządzenia nadprzewodnikowe wykorzystujące stałoprądowe pole magnetyczne w magnetycznych środowiskach zarówno liniowych jak i nieliniowych.

5. MODELOWANIE NUMERYCZNE ZJAWISK MAGNETOSTATYCZNYCH

Jako obiekt modelowania numerycznego zjawisk magnetostatycznych wybrany został elektromagnesu HTS dla SMES-a budowanego⁴⁰ w Pracowni Technologii Nadprzewodnikowych (IEI).

Pracę elektromagnesu HTS dla SMES-a można podzielić na dwa niezależne etapy i opracować niezależne modele numeryczne.

W pierwszym etapie pracy elektromagnes SMES-a jest schładzany od temperatury pokojowej do temperatury roboczej rzędu kilkudziesięciu kelwinów. Model numeryczny chłodzenia elektromagnesu LTS technika kontaktową został opisany w rozdziale 3.2. W oparciu o ten model numeryczny można zamodelować zjawiska cieplne w elektromagnesie HTS dla SMES-a podczas jego schładzania.

W drugim etapie pracy w elektromagnesie HTS, będącym już w stanie nadprzewodzącym, prąd w uzwojeniu jest zwiększany bądź zmniejszany w trakcie wprowadzania bądź wyprowadzania energii ze SMES-a. W drugim etapie pracy urządzenia decydują zjawiska cieplne i przewodnictwa elektrycznego – model sprzężony elektrotermiczny.

5.1. Model numeryczny elektromagnesu HTS dla SMES-a

Przedstawiony model numeryczny dotyczy wybranego fragmentu drugiego etapu pracy elektromagnesu HTS dla SMES-a, gdy elektromagnes nadprzewodnikowy osiąga swoje maksymalne parametry w stanie nadprzewodzącym.

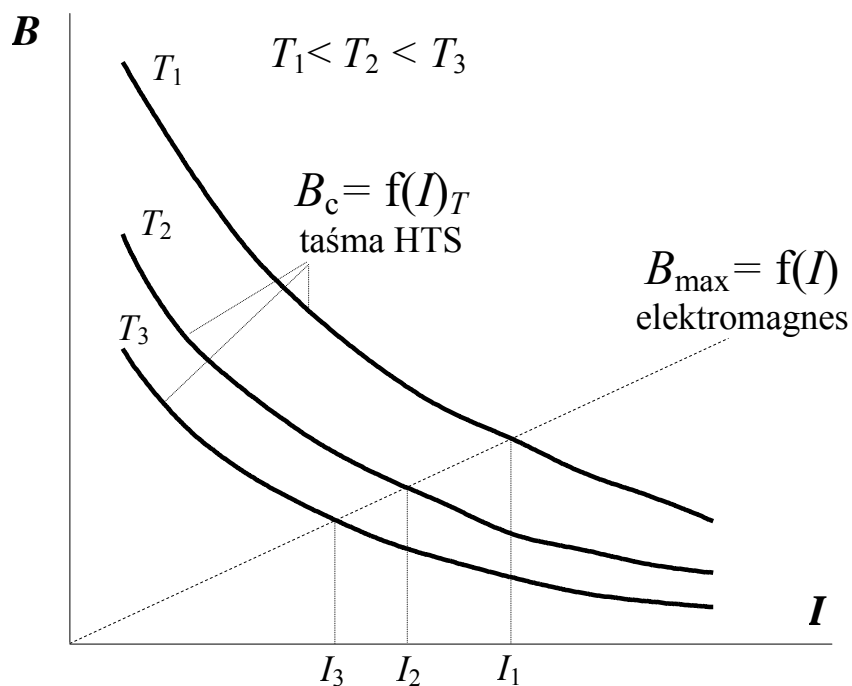
Założono, że układ chłodzenia zapewnia określoną temperaturę (35 K lub 50 K) uzwojenia nadprzewodnikowego a model numeryczny elektromagnesu HTS dla SMES-a dotyczy zjawisk magnetostatycznych. Elektromagnes HTS dla SMES-a ma geometrię osiowosymetryczną, więc do opracowania jego modelu numerycznego można było wykorzystać moduł magnetostatyczny MS (magnetostatics) programu polowego FLUX2D. W module MS zmienną podstawową jest potencjał wektorowy a rozwiązywane jest równanie [91]:

$$(5-1) \quad \text{rot}((1/\mu) \cdot \text{rot}(\vec{A})) = \vec{J} - \text{rot}(\vec{H}_{ko})$$

⁴⁰ Projekt Badawczy KBN 4 T10A 00425 "Nadprzewodnikowy zasobnik energii z elektromagnesem wysokotemperaturowym i autonomicznym układem chłodzenia", 2003-2006

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 powstał w celu obliczenia optymalnej, ze względu na zmagazynowaną energię, konfiguracji uzwojenia elektromagnesu HTS dla SMES-a. Elektromagnes wykonany będzie w postaci cewek krążkowych z taśmy Bi-2223/Ag. Geometria modelu numerycznego zmieniana była podczas poszukiwania optymalnej konfiguracji: liczby uzwojeń krążkowych. W modelu numerycznym zastosowano prosty wybieg, który pozwolił 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. Model numeryczny posłużył do wyznaczenia charakterystyki $B_{max} = f(I)$ elektromagnesu HTS, a obliczenia maksymalnego prądu i energii zmagazynowanej w elektromagnesie w zależności od temperatury pracy uzwojenia dokonano przy wykorzystaniu zewnętrznych programów autorskich. Na rys. 5.1 przedstawiona jest metoda wyznaczania 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. 5.1. Metoda wyznaczania maksymalnego prądu w elektromagnesie HTS

5.2. Wybór konfiguracji uzwojeń elektromagnesu HTS dla SMES-a


Tab. 27. Parametry elektromagnesów dla SMES-a

liczba krajków	l. zw. krajka	a_1	$2b$	L	$I_{c(35\text{ K})}$	$E_{(35\text{ K})}$	$I_{c(50\text{ K})}$	$E_{(50\text{ K})}$
-	-	mm	mm	H	A	J	A	J
$a_2 = 180\text{ mm}$								
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
$a_2 = 160\text{ mm}$								
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

W tab. 27 przedstawione zostały wyniki obliczeń konfiguracji elektromagnesu HTS dla SMES-a przeprowadzonych z wykorzystaniem modelu numerycznego. Wyniki obliczeń były podstawą podjęcia decyzji o liczbie uzwojeń krajkowych a w konsekwencji o liczbie kawałków taśmy

nadprzewodnikowej dostarczonej przez producenta. Założono, że każdy krążek będzie wykonany z jednego kawałka 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. 5.1. Na rys. 5.2 pokazany jest certyfikat jednego z 15 kawałków taśmy zakupionej⁴¹ 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. 5.2) oraz charakterystyk nadprzewodnika Bi-2223 – $B_c=f(J)_T$ podawanych przez producenta (rys. 2.5, rys. 2.6).



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%

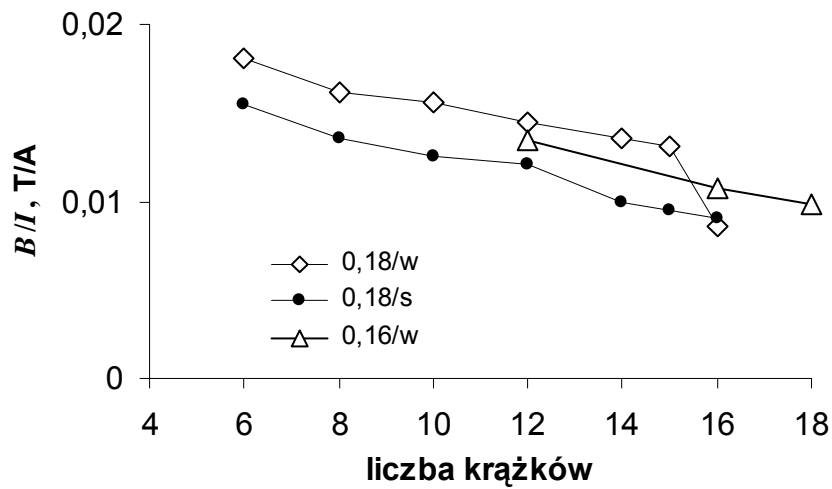
*Test done on representative sample

Rys. 5.2. Certyfikat taśmy Bi-2223/Ag⁴² (tab. 12)

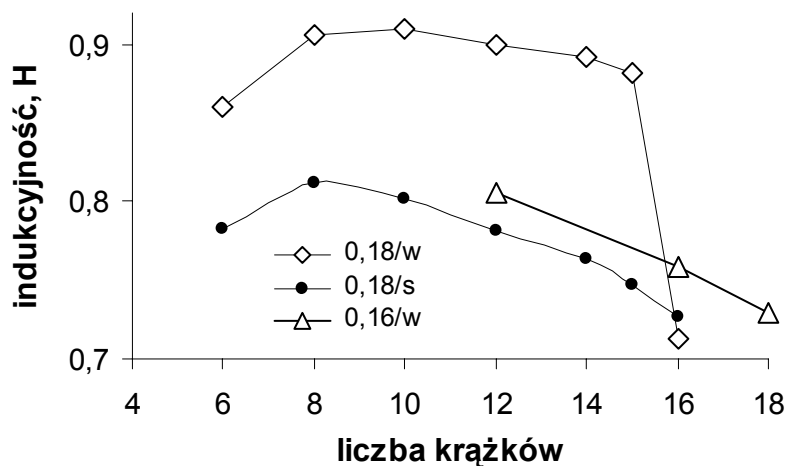
⁴¹ Projekt Badawczy KBN 4 T10A 00425 "Nadprzewodnikowy zasobnik energii z elektromagnesem wysokotemperaturowym i autonomicznym układem chłodzenia", 2003-2006

⁴² Pracownia Technologii Nadprzewodnikowych w Lublinie (IEL)

Obliczenia przeprowadzono przy założeniu, że do wykonania elektromagnesu wykorzystanie będzie 1500 m taśmy HTS (tab. 12, na rys. 5.2). 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 uzwojeń krążkowych od 6 do 18 oraz o promieniu zewnętrznym = 0,16 m z liczbą uzwojeń krążkowych od 12 do 18.



Rys. 5.3. Współczynnik kierunkowy charakterystyki elektromagnesu $B_{\max}=f(I)$



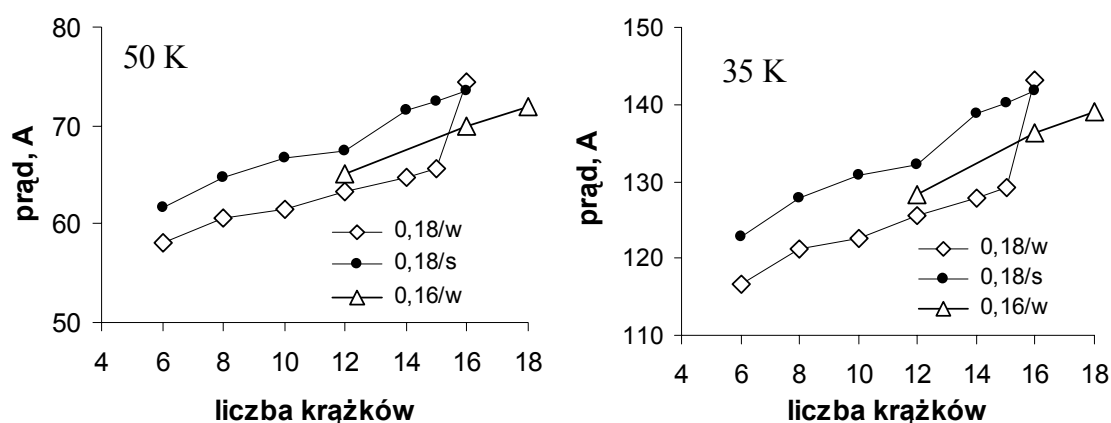
Rys. 5.4. Indukcyjność elektromagnesu SMES-a w funkcji liczby krążków

Charakterystyki $B_{\max}=f(I)$ elektromagnesu HTS są funkcjami liniowymi. Rys. 5.3 przedstawia współczynniki kierunkowe tych charakterys-

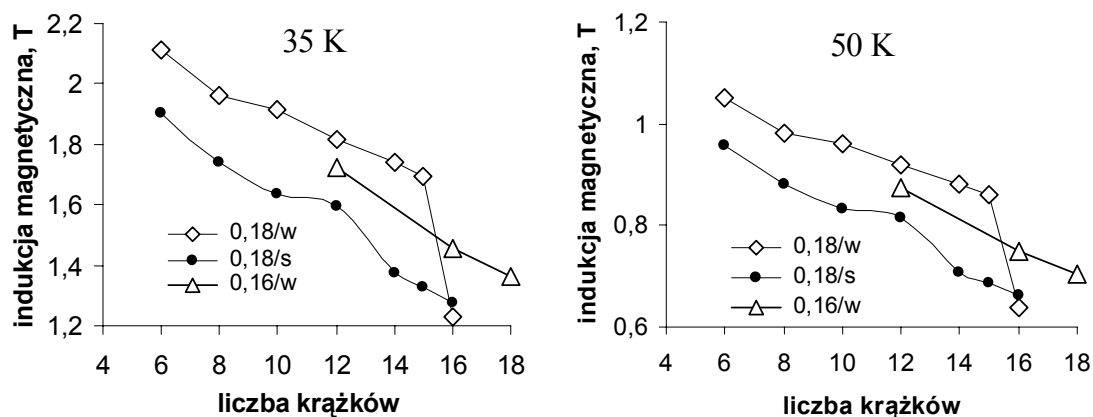
tyk. "0,18/w" oznacza elektromagnes o promieniu zewnętrznym = 0,18 m z małą odległością pomiędzy krążkami krążków a "s" oznacza większą odległość pomiędzy krążkami. Z punktu widzenia maksymalnego pola magnetycznego optymalny jest elektromagnes z 6 krążkami o promieniu zewnętrznym = 0,18 m z małą odległością pomiędzy krążkami.

Rys. 5.4 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.

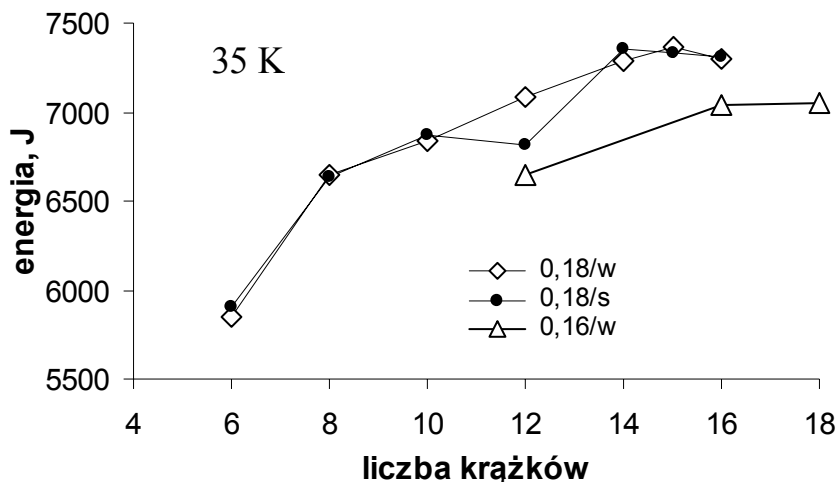
Rys. 5.5 i rys. 5.6 przedstawiają prąd krytyczny i maksymalną indukcję w elektromagnesie SMES-a w funkcji liczby krążków. Z punktu widzenia prądu krytycznego lepsze są elektromagnesy z maksymalną liczbą krążków, a z punktu widzenia indukcji, elektromagnesy z minimalną liczbą krążków.



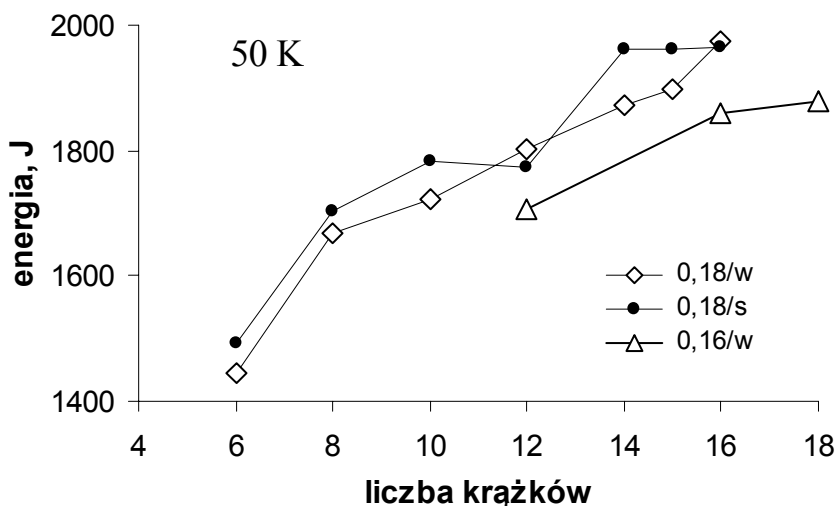
Rys. 5.5. Prąd krytyczny elektromagnesu SMES-a w funkcji liczby krążków



Rys. 5.6. Maksymalna indukcja w elektromagnesie SMES-a w funkcji liczby krążków



Rys. 5.7. Maksymalna energia SMES-a (w temp. 35 K) w funkcji liczby krążków



Rys. 5.8. Maksymalna energia SMES-a (w temp. 50 K) w funkcji liczby krążków

Rys. 5.7 i rys. 5.8 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 te wyniki obliczeń z wynikami zamieszczonymi na rys. 5.4 widać różnice pomiędzy elektromagnesami nadprzewodnikowymi a konwencjonalnymi. Optymalny ze względu na energię elektromagnes konwencjonalny to elektromagnes o największej indukcyjności, czyli zgodnie z rys. 5.4 elektromagnes "0,18/w" z 10 krążkami. Optymalny ze względu na energię elektromagnes nadprzewodnikowy to, zgodnie z rys. 5.7, elektromagnes "0,18/s" z 14 krążkami.

Na podstawie obliczeń wykonanych z wykorzystaniem modelu numerycznego podjęta została decyzja o konfiguracji elektromagnesu HTS dla SMES-a. Wybrano uzwojenie 14-krażkowe, którego parametry zostały wyróżnione w tab. 27. Przekrój tego elektromagnesu przedstawiono na rys. 2.29, a jego wybrane parametry podane są w tab. 17. Ponieważ okazało się, że producent może dostarczyć taśmę w kawałkach będących wielokrotnością 100 m, zakupiona została taśma w 15 kawałkach po 100 m. Pokazuje to, że poza parametrami fizycznymi materiałów należy w trakcie obliczeń optymalizacyjnych urządzeń nadprzewodnikowych uwzględnić również "parametr producenta".

5.3. Podsumowanie modelowania numerycznego zjawisk magnetostatycznych

W modelu numerycznym elektromagnesu HTS dla SMES-a zastosowano metodę rozdzielania etapów pracy urządzenia. W ustalonych warunkach chłodzenia możliwe było rozpatrywanie tylko zjawisk magnetostatycznych.

W modelu numerycznym zaproponowano metodę wyznaczania maksymalnego prądu w elektromagnesie na podstawie charakterystyki elektromagnesu HTS, wyznaczonej w modelu numerycznym, oraz charakterystyk krytycznych taśmy. Pozwoliło to na ominięcie ograniczeń programu FLUX2D i uwzględnienie w obliczeniach zależność parametrów przewodu nadprzewodnikowego od: temperatury, prądu i natężenia pola magnetycznego. Skorzystano z faktu, że indukcja magnetyczna w elektromagnesie SMES-a zależy liniowo od prądu. Model numeryczny posłużył do wyznaczenia charakterystyki elektromagnesu HTS, a obliczenia maksymalnego prądu i energii zmagazynowanej w elektromagnesie w zależności od temperatury pracy uzwojenia dokonano przy wykorzystaniu zewnętrznych programów autorskich.

6. MODELOWANIE NUMERYCZNE ZJAWISK MAGNETODYNAMICZNYCH

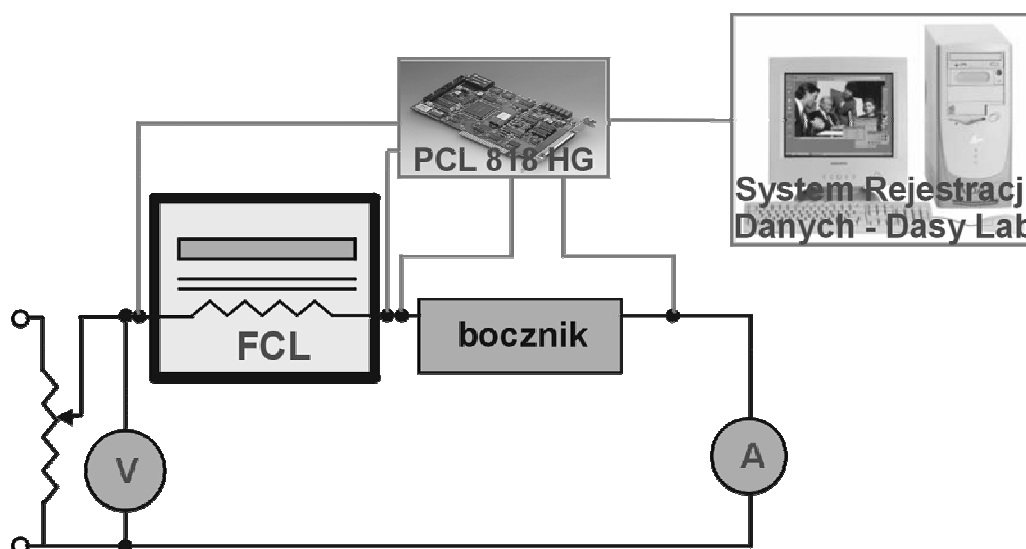
Modelowanie numeryczne zjawisk magnetodynamicznych dotyczące przemiennoprądowych zastosowań nadprzewodników omówione zostanie na przykładzie nadprzewodnikowych ograniczników prądu (SFCL – superconducting fault current limiter) typu indukcyjnego przedstawionych na rys. 2.35 i rys. 2.36. Główne parametry tych ograniczników przedstawione zostały w tab. 28.

Tab. 28. Parametry ograniczników z cylindrem CST-60/50.2

Uzwojenie pierwotne z miedzi		
Średnica przewodu		$0,7 \cdot 10^{-3}$ m
Liczba zwojów		236
Wysokość uzwojenia		0,049 m
Wewnętrzna średnica uzwojenia		0,073 m
Prąd ograniczenia		2,65 A
Nadprzewodnikowe uzwojenie wtórne – cylinder CST-60/50.2 (Bi-2223)		
Temperatura krytyczna		108 K
Średnica wewnętrzna		0,059 m
Wysokość		0,05 m
Grubość ścianki		$2,5 \cdot 10^{-3}$ m
Prąd krytyczny I_c przy 77 K		625 A
Rdzenie magnetyczne		
Przekrój	0,02 m x 0,02 m	0,02 m x 0,03 m
Wysokość kolumny	0,103 m	0,103 m
Szerokość okna	0,036 m	0,036 m

Miarą skuteczności działania ograniczników prądu typu indukcyjnego z uzwojeniem pierwotnym miedzianym i wtórnym nadprzewodnikowym jest przyrost jego impedancji mierzonej na zaciskach uzwojenia pierwotnego wywołany utratą nadprzewodnictwa w uzwojeniu wtórnym. W stanie nadprzewodzącym uzwojenia wtórnego rdzeń ferromagnetyczny jest ekranowany i nie wpuszcza do siebie strumienia magnetycznego. Jego wpływ na wartość impedancji można pominąć. Po przejściu do stanu

rezystywnego ekranowanie znika. Przyjęto więc, że porównanie impedancji ogranicznika bez rdzenia i z rdzeniem może służyć do oceny stopnia ograniczania prądu. Ponieważ napięcia są tu proporcjonalne do impedancji, stopień ograniczania prądu możemy określić przez porównanie napięcia ogranicznika z rdzeniem i bez rdzenia.



Rys. 6.1. Układ pomiarowy wykorzystujący kartę pomiarową PCL 818 HG i program DASY-Lab 6.0 do wyznaczania charakterystyk $U-I$ ogranicznika prądu

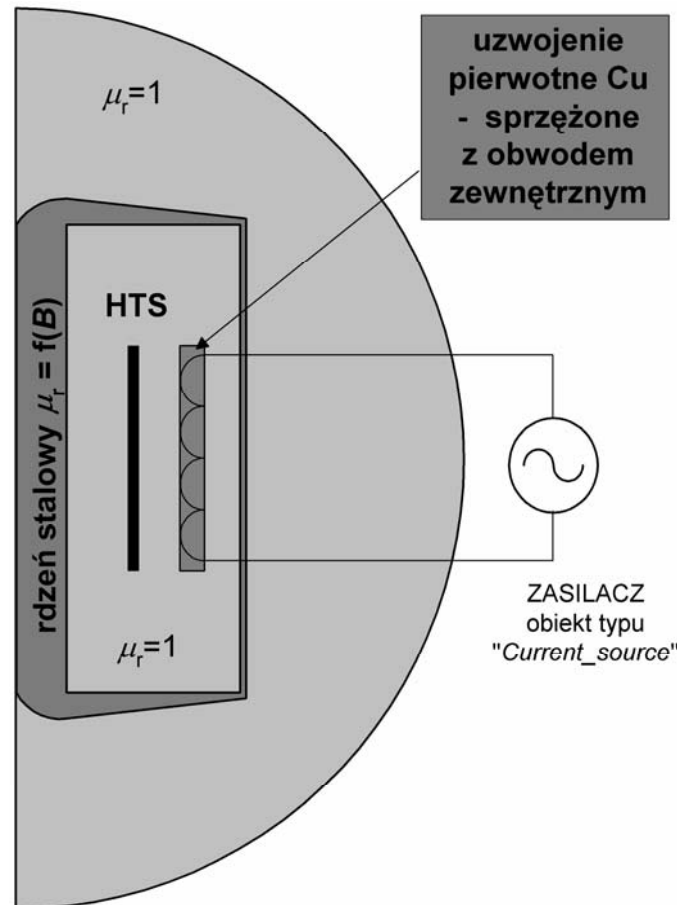
Układ pomiarowy do badań charakterystyk napięciowo-prądowych ograniczników wykorzystujący kartę pomiarową PCL 818 HG [117] i program DASY-Lab 6.0 [118] [119] przedstawia rys. 6.1. W badaniach charakterystyk napięciowo-prądowych wykorzystywane były również inne układy pomiarowe [78].

6.1. Polowo-obwodowy model numeryczny SFCL

Model numeryczny nadprzewodnikowych ograniczników prądu typu indukcyjnego z cylindrem Bi-2223 625 A (77 K) i z zamkniętymi rdzeniami magnetycznymi (tab. 28) [65][77][120] opracowany został w module magnetodynamicznym MD (magnetodynamics) [91] sprzężonym z obwodem zewnętrznym [121] w programie polowo-obwodowym FLUX2D. W module MD zmienną podstawową jest potencjał wektorowy a rozwiązane jest równanie [91]:

$$(6-1) \quad j \cdot \omega \cdot \sigma \cdot \vec{A} + \text{rot}((1/\mu) \cdot \text{rot}(\vec{A})) = \vec{J}$$

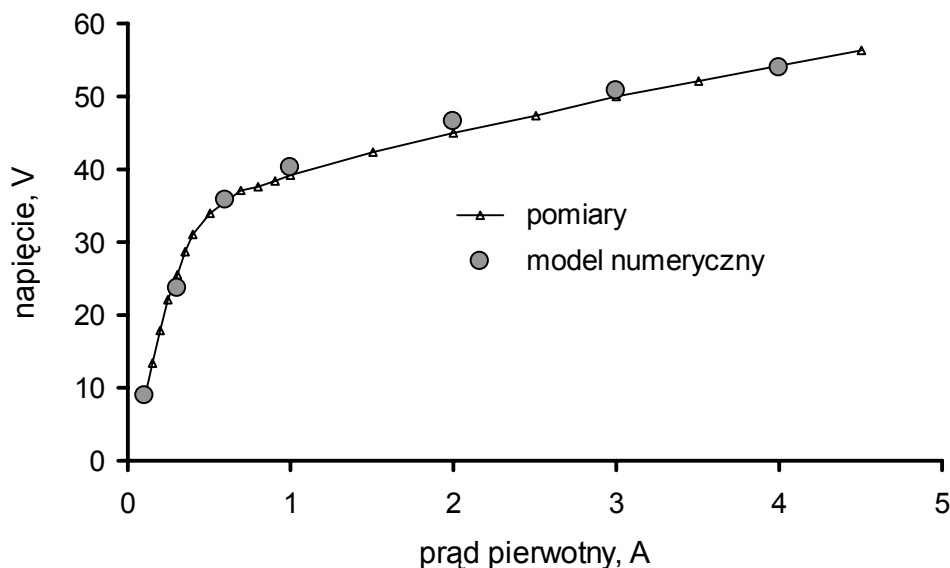
gdzie A oznacza potencjał wektorowy (Wb/m), J – gęstość prądu (A/m^2), ω – częstotliwość kątową (s^{-1}), σ – przewodność elektryczną ($\Omega^{-1}m^{-1}$), μ – przenikalność magnetyczną (H/m), $j = \sqrt{-1}$.



Rys. 6.2. Geometria SFCL w polowo-obwodowym modelu numerycznym – FLUX2D

W modelu numerycznym założono, że układ chłodzenia w sposób wystarczający utrzymuje temperaturę elementów nadprzewodnikowych na poziomie 77 K, tak więc zagadnienie cieplne można było pominąć. Nadprzewodnikowy ogranicznik prądu typu indukcyjnego w przeciwieństwie do innych omawianych w pracy urządzeń nadprzewodnikowych nie ma symetrii obrotowej. Jednym z głównych problemów obliczeniowych przy tworzeniu modelu numerycznego tego ogranicznika było zastąpienie geometrycznego układu trójwymiarowego, o braku symetrii obrotowej, równoważnym mu układem osiowosymetrycznym pozwalającym wykorzystać program FLUX2D. Geometria modelu numerycznego przedstawiona jest na rys. 6.2 [77][65][120]. Zaznaczono tutaj schematycznie, że region odpowiadający pierwotnemu uzwojeniu ogranicznika

sprzężony jest z obwodem zewnętrznym. Region INFINITY, który pozwala na zdefiniowanie tzw. otwartego brzegu, nie jest pokazany na rys. 6.2.

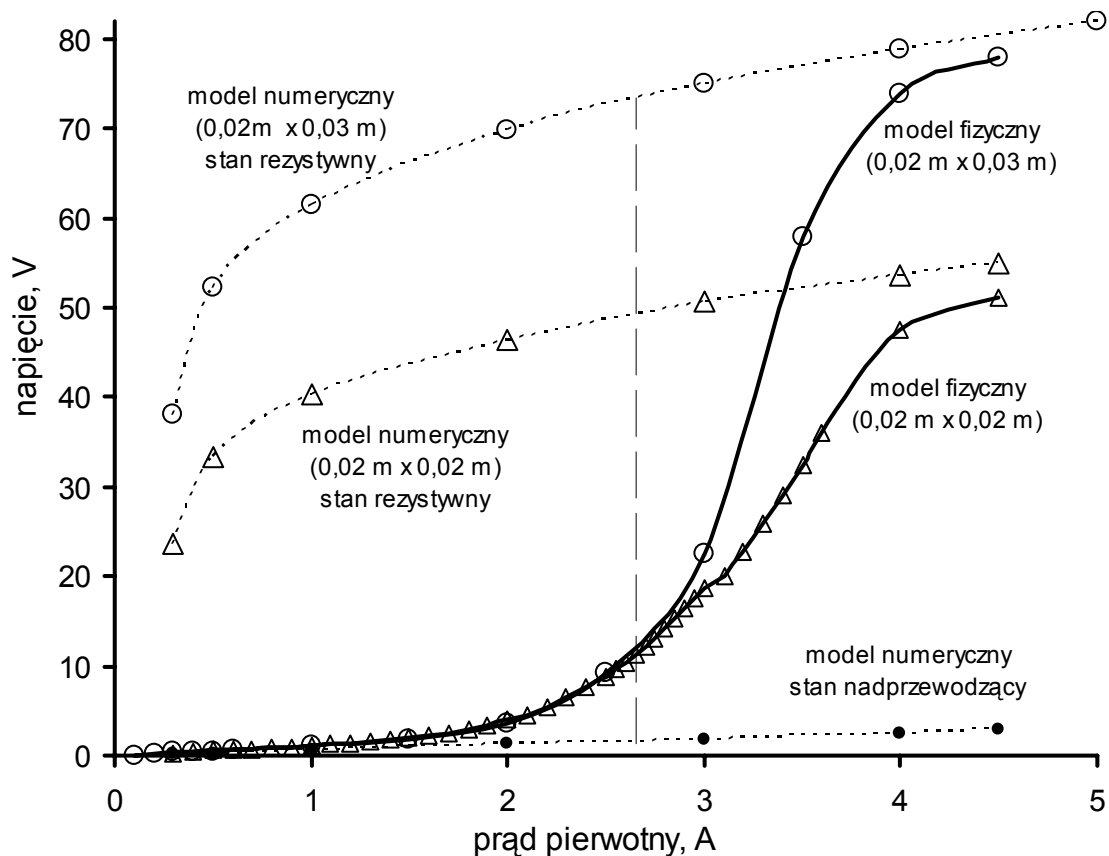


Rys. 6.3. Charakterystyka $U-I$, w temperaturze 293 K, SFCL z cylindrem o $I_{c(77\text{ K})} = 625$ A i rdzeniem magnetycznym o przekroju poprzecznym 2 cm x 2 cm

Do weryfikacji geometrii oraz właściwości fizycznych regionów w modelu numerycznym wybrane zostały wyniki pomiarów w temperaturze pokojowej. Wyniki pomiarów napięcia na ograniczniku w funkcji prądu w temperaturze pokojowej oraz wyniki obliczeń przy wykorzystaniu modelu numerycznego po weryfikacji przedstawia rys. 6.3.

Praca nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu indukcyjnego może być rozpatrywana w dwóch niezależnych stanach: nadprzewodzącym i rezystywnym. Na rys. 6.4 przedstawione zostały wyniki pomiarów napięcia na ogranicznikach (rdzenie magnetyczne o przekrojach 2 cm x 2 cm i 2 cm x 3 cm) w funkcji prądu w temperaturze 77 K oraz wyniki obliczeń przy użyciu modeli numerycznych w stanach nadprzewodzącym oraz rezystywnym. Linia przerywaną zaznaczone zostało miejsce przejścia z charakterystyki $U-I$ stanu rezystywnego na charakterystykę stanu nadprzewodzącego przy założeniu, że cylinder nadprzewodnikowy znajduje się w stanie nadprzewodzącym, jeżeli prąd skuteczny płynący w nim jest mniejszy niż 625 A (2,65 A w uzwojeniu pierwotnym), oraz w stanie rezystywnym, gdy prąd skuteczny w cylindrze nadprzewodnikowym jest większy niż 625 A. Aby otrzymać napięciowo-prądową charakterystykę numeryczną należy ustalić odpowiednią geometrię, właściwości regionów i stan (nadprzewodzący lub rezystywny) w połowej części modelu nume-

rycznego i obliczać napięcia na ograniczniku dla różnych prądów w obiekcie **ZASILACZ** (typu “Current_source” [121]) w obwodowej części modelu numerycznego (rys. 6.2).



Rys. 6.4. Charakterystyki U - I nadprzewodnikowych ograniczników prądu z cylindrem o $I_c(77\text{ K}) = 625\text{ A}$ z zamkniętymi rdzeniami magnetycznymi o różnych przekrojach w temperaturze 77 K

Dla prądu pierwotnego do 1 A charakterystyki U - I modeli numerycznych w stanie nadprzewodzącym niemal pokrywają się z charakterystykami modeli fizycznych. Dla prądu pierwotnego powyżej 4 A charakterystyki modeli fizycznych zaczynają się zbliżać do charakterystyk U - I modeli numerycznych w stanie rezystywnym. Rzeczywista charakterystyka U - I modelu fizycznego ograniczona jest od dołu charakterystyką modelu numerycznego w stanie nadprzewodzącym oraz od góry charakterystyką modelu w stanie rezystywnym (rys. 6.4). Jak to można wywnioskować z wykresów na rys. 6.4 prąd znamionowy tych ograniczników powinien mieścić się w przedziale od 1 A do 1,5 A, a wtedy prąd ograniczany może być zawarty w przedziale od 5 A do 7,5 A (5-krotność prądu znamionowego).

wego). To pokazuje, że porównania pomiędzy charakterystykami z pomiarów można zastąpić porównaniami charakterystyk z obliczeń w modelach numerycznych w stanach nadprzewodzącym i rezystywnym. Ten wybieg pozwala na ominięcie trudności związanych z uzależnieniem przewodności elektrycznej materiału nadprzewodnikowego od gęstości prądu.

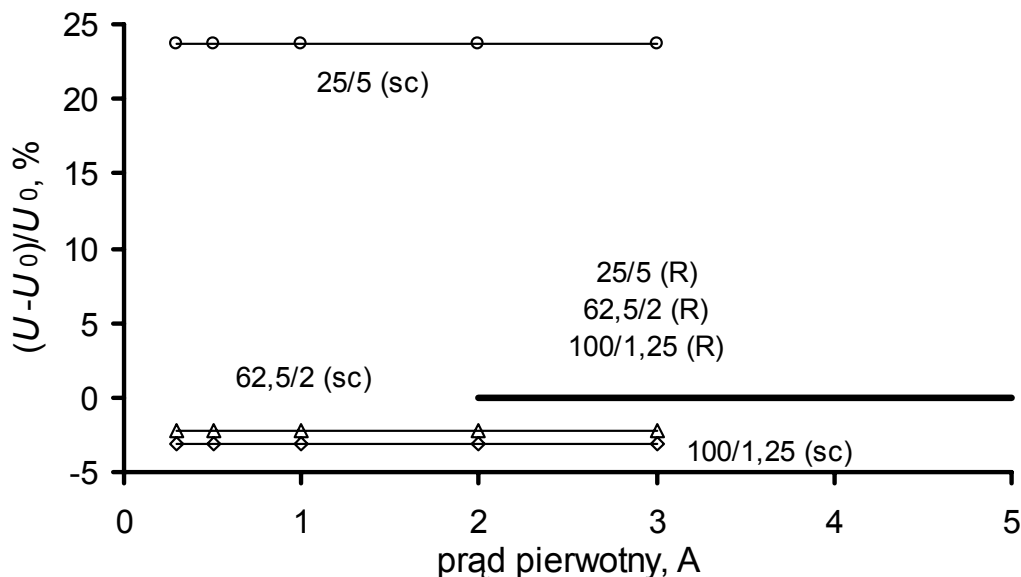
Ponieważ uproszczona geometria w modelu numerycznym SFCL z rdzeniem 0,02 m x 0,03 m utworzona została zgodnie z metodą przyjętą dla modelu numerycznego ogranicznika z rdzeniem 0,02 m x 0,02 m oraz jak pokazuje rys. 6.4, współzależności pomiędzy charakterystyką $U-I$ z pomiarów a charakterystykami modelu numerycznego ogranicznika z rdzeniem o przekroju 0,02 m x 0,03 m są podobne do współzależności pomiędzy charakterystykami ogranicznika z rdzeniem 0,02 m x 0,02 m, więc potwierdziło to słuszność przyjętej metody tworzenia geometrii uproszczonej modelu numerycznego ogranicznika z zamkniętym rdzeniem magnetycznym.

Dokonana została więc podwójna weryfikacja eksperymentalna modeli numerycznych ograniczników z cylindrami Bi-2223 o $I_c(77\text{ K}) = 625\text{ A}$:

I – weryfikacja właściwości rdzenia magnetycznego i jego uproszczonej geometrii na podstawie danych z pomiarów, w temperaturze 293 K, charakterystyki $U-I$ ogranicznika z rdzeniem 0,02 m x 0,02 m (rys. 6.3),

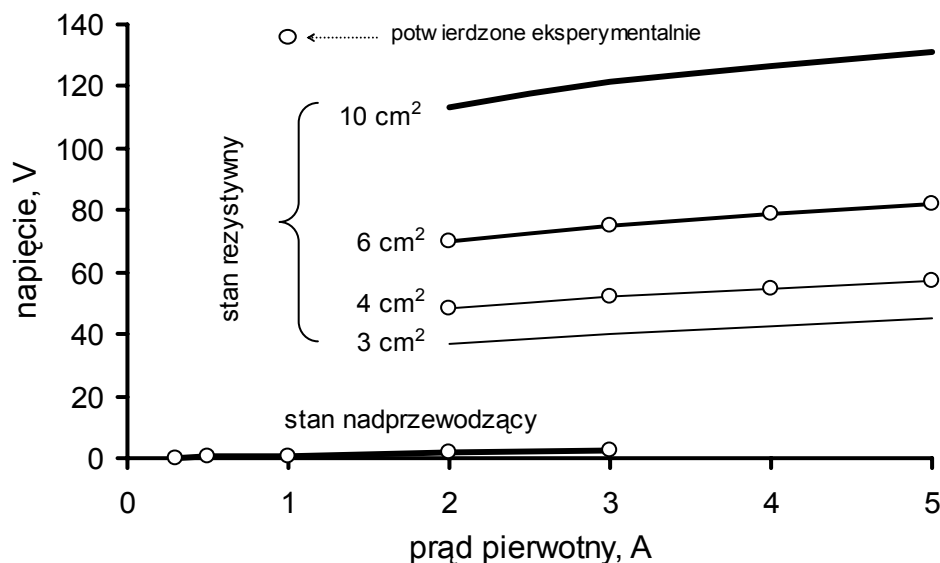
II – weryfikacja metody tworzenia geometrii uproszczonej modelu numerycznego ogranicznika na podstawie wyników z pomiarów (77 K), charakterystyki $U-I$ ogranicznika z rdzeniem 0,02 m x 0,03 m (rys. 6.4).

Rys. 6.5 przedstawia procentowe zmiany charakterystyk $U-I$ ogranicznika w stanie rezystywnym (R) oraz nadprzewodzącym (sc) przy zmianie kształtu cylindra HTS, gdzie U jest napięciem ogranicznika ze zmienioną geometrią cylindra, a U_0 jest napięciem ogranicznika z rdzeniem 0,02 m x 0,02 m i cylindrem o wysokości 50 mm i grubości 2,5 mm. Opisy przy charakterystykach oznaczają kształt cylindra nadprzewodnikowego (wysokość (mm)/grubość(mm)). W trakcie obliczeń, kształt cylindra był tak zmieniany, aby utrzymać stałe pole przekroju cylindra = 125 mm². Zmniejszenie wysokości cylindra do 25 mm spowodowało znaczne zwiększenie napięcia (o 23,6 %) w stanie nadprzewodzącym. Zwiększenie wysokości cylindra do 62,5 mm oraz 100 mm spowodowało zmniejszenie napięcia odpowiednio o 2,2 % oraz 3,2 % w stanie nadprzewodzącym. Wysokość cylindra nadprzewodnikowego powinna być nie mniejsza niż wysokość miedzianego uzwojenia pierwotnego. W przeciwnym wypadku wystąpi niekorzystny wzrost napięcia na ograniczniku w stanie nadprzewodzącym. Zmiany w kształcie cylindra nie mają wpływu na napięcie na ograniczniku w stanie rezystywnym.

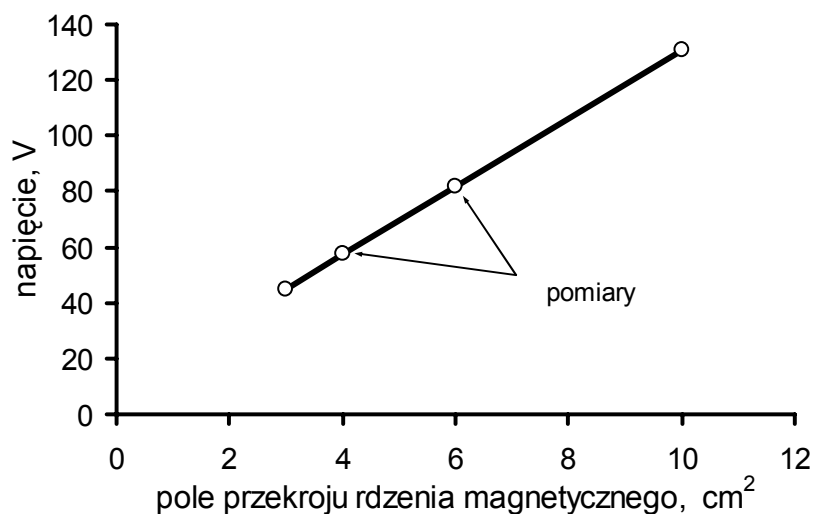


Rys. 6.5. Procentowe zmiany charakterystyk $U-I$ nadprzewodnikowego ogranicznika prądu w stanie rezystywnym (R) oraz nadprzewodzącym (sc) przy zmianie kształtu cylindra nadprzewodnikowego (wysokość, mm)/(grubość, mm)

Zmiany charakterystyk $U-I$ ogranicznika w stanach nadprzewodzącym i rezystywnym w funkcji pola przekroju rdzenia stalowego przedstawia rys. 6.6. Zmiany pola przekroju rdzenia stalowego nie wpływają na charakterystyki napięciowo-prądowe modelu numerycznego ogranicznika w stanie nadprzewodzącym. Można wnioskować na podstawie rys. 6.6, że pole przekroju rdzenia stalowego powinno być tak duże jak to możliwe dla danego cylindra nadprzewodnikowego. W modelach fizycznych ograniczników z cylindrem o prądzie krytycznym = 625 A (77 K), cylinder i miedziane uzwojenie pierwotne są schłodzone do temperatury 77 K – rdzeń stalowy pracuje w temperaturze pokojowej (293 K). Taka konfiguracja redukuje zużycie ciekłego azotu, ponieważ straty w rdzeniu nie podgrzewają ciekłego azotu. Jednak kriostat i naczynie azotowe w sposób istotny ograniczają tutaj maksymalny przekrój rdzenia stalowego do 10 cm^2 (rys. 2.35). Biorąc pod uwagę tylko średnicę wewnętrzną cylindra 625 A (77 K), pole przekroju rdzenia stalowego mogłoby wynosić 27 cm^2 . Jako że zależność napięcia na ograniczniku w stanie rezystywnym od pola przekroju rdzenia stalowego jest niemal liniowa (rys. 6.7), to wzrost pola przekroju rdzenia do 27 cm^2 spowodowałby wzrost napięcia ograniczania 2,7-krotnie. Typowy rdzeń stalowy o największym przekroju prostokątnym równym 6 cm^2 ($2 \text{ cm} \times 3 \text{ cm}$), który można było umieścić w kriostacie ogranicznika, wypełnia tylko 21,9 % przekroju przestrzeń w cylindrze nadprzewodnikowym.



Rys. 6.6. Zmiany charakterystyk $U-I$ w modelu numerycznym SFCL w temperaturze 77 K z cylindrem Bi-2223 o $I_{c(77\text{K})} = 625$ A w funkcji pola przekroju rdzenia stalowego



Rys. 6.7 Napięcie na ograniczniku z cylindrem Bi-2223 o $I_{c(77\text{K})} = 625$ A w funkcji pola przekroju rdzenia dla prądu pierwotnego = 5 A w temperaturze 77 K

W innym ograniczniku z cylindrem o prądzie krytycznym = 112 A (77 K) [65] (rys. 2.37) cylinder nadprzewodnikowy umieszczony jest bezpośrednio na stalowym rdzeniu. Przekrój rdzenia stalowego ograniczony jest więc tylko przez cylinder nadprzewodnikowy. W przypadku typowego rdzenia o przekroju prostokątnym, zastosowanego tutaj, wypełnia on 56,6 % przestrzeni w cylindrze nadprzewodnikowym (rdzeń o przekroju 1 cm x 1 cm). Chłodzenie wszystkich komponentów ogranicznika umożli-

wia zwiększenie (w znaczącym stopniu) pola przekroju poprzecznego rdzenia magnetycznego, które w przeciwnym przypadku ograniczane jest przez kriostat.

6.2. Podsumowanie modelowania numerycznego zjawisk magnetodynamicznych

W magnetodynamicznym modelu numerycznym nadprzewodnikowego ogranicznika prądu zastosowano metodę rozdzielania stanów pracy urządzenia nadprzewodnikowego na dwa niezależne stany: nadprzewodzący i rezystywny. Dzięki temu ominięto trudności w definiowaniu rezystywności nadprzewodnika jako funkcji temperatury, pola magnetycznego i prądu.

Zastosowano tutaj również metodę zastąpienia geometrii rdzenia stalowego, który nie ma symetrii obrotowej, geometrią osiowo-symetryczną. Weryfikacja eksperymentalna potwierdziła, że ta metoda może być stosowana do modelowania nadprzewodnikowych ograniczników prądu typu indukcyjnego.

7. WNIOSKI KOŃCOWE

W pracy przedstawiono 3 sposoby tworzenia modeli numerycznych urządzeń nadprzewodnikowych:

- modele numeryczne utworzone w narzędziowym programie polowo-obwodowym FLUX2D,
- hybrydowe modele numeryczne wykorzystujące autorskie programy obliczeniowe sterujące współpracą z narzędziowymi programami polowymi PC-OPERA i FLUX2D,
- model numeryczny wykorzystujący autorski program obliczeniowy.

Wykazano, że przez zaawansowane programowanie oraz nietypowe i niekonwencjonalne wykorzystanie polowo-obwodowych programów narzędziowych można tworzyć modele numeryczne urządzeń nadprzewodnikowych.

Przedstawione zostały główne problemy występujące przy tworzeniu modeli numerycznych zjawisk: elektrotermicznych, magnetostatycznych, magnetostatyczno-hydrodynamicznych i magnetodynamicznych.

Szczegółowe modele numeryczne podzielone zostały na 4 grupy modeli dotyczących zjawisk:

- elektrotermicznych,
- magnetostatyczno-hydrodynamicznych,
- magnetostatycznych,
- magnetodynamicznych.

Przedstawiono 8 szczegółowych modeli numerycznych i 2 modele matematyczne. Przedstawione modele związane są z różnymi zjawiskami w urządzeniach nadprzewodnikowych badanych eksperymentalnie przez autora, takich jak elektromagnesy nadprzewodnikowe separatorów magnetycznych i SMES-ów, nadprzewodnikowe separatory magnetyczne, krioprzepusty prądowe i nadprzewodnikowe ograniczniki prądu:

- elektrotermiczny model numeryczny krioprzepustu prądowego,
- model numeryczny chłodzenia kontaktowego elektromagnesu LTS,
- elektrotermiczny model numeryczny rezystancyjnego SFCL,
- model matematyczny trajektorii cząstki w separatorze OGMS,
- model numeryczny SEP_MAG separatora OGMS,
- model matematyczny krawędzi wychwyty cząstek magnetycznych w separatorze OGMS,
- numeryczny model hybrydowy wychwyty cząstek w separatorze OGMS (FLUX2D),

- numeryczny model hybrydowy wychwyty cząstek w separatorze OGMS (PC-OPERA),
- magnetostacyjny model numeryczny elektromagnesu HTS dla SMES-a
- polowo-obwodowy model numeryczny indukcyjnego SFCL.

Przedstawiono główne problemy związane z modelowaniem numerycznymi urządzeń nadprzewodnikowych i grup zjawisk oraz sposoby rozwiązania tych problemów.

Podstawowe trudności związane z modelowaniem zagadnień cieplnych w urządzeniach nadprzewodnikowych wynikają z ograniczonych danych dotyczących właściwości fizycznych materiałów w temperaturach kriogenicznych.

Urządzenia nadprzewodnikowe mimo różnic w geometrii jak i zastosowanych technik chłodzenia od strony modelowania numerycznego zagadnień cieplnych wykazują wiele podobieństw. W wewnętrznych obszarach obliczeniowych konkretnych urządzeń ciepło przepływa na drodze przewodnictwa. Właściwości cieplne obszarów są funkcją temperatury. Różnice występują w oddawaniu ciepła do czynnika lub urządzenia chłodzącego.

Przedstawione modele numeryczne dotyczące wszystkich technik chłodzenia wykorzystywanych w urządzeniach nadprzewodnikowych można zaadaptować do modelowania zagadnień cieplnych w większości urządzeń nadprzewodnikowych.

Do zdefiniowania złożonych zależności temperaturowych właściwości fizycznych obszarów obliczeniowych i źródeł wykorzystano wieloparametrowe procedury użytkownika w których jednym z parametrów jest współczynnik zapelnienia uzwojenia pozwalający uwzględnić w obliczeniach złożoną budowę wewnętrzną przewodów nawojowych i uzwojeń nadprzewodnikowych.

Rezystywność elektryczna nadprzewodnika będąca funkcją 3 zmiennych: temperatury, pola magnetycznego i prądu została zastąpiona funkcją jednej zmiennej (temperatury) z parametrem (gęstością prądu). Umożliwiło to przy odpowiednio dobranych warunkach brzegowych uwzględnić w obliczeniach wpływ 3 zmiennych: temperatury, pola magnetycznego i prądu na rezystywność nadprzewodnika.

W przedstawionych modelach numerycznych zjawisk magnetostacyjnych sprzężonych ze zjawiskami hydrodynamicznymi dostęp do kodu źródłowego pozwala na wprowadzanie dowolnych zmian i pełną kontrolę nad przebiegiem obliczeń.

W hybrydowych modelach numerycznych opisano sposób organizacji obliczeń i współpracy różnych programów autorskich z programami narzędziowymi FLUX2D i PC-OPERA. Przez zmianę autorskich programów obliczeniowych można sprzęgać zjawiska różnej natury ze zjawiskami elektromagnetycznymi w uzwojeniach nadprzewodnikowych i modelować elektryczne urządzenia nadprzewodnikowe wykorzystujące pole magnetyczne w środowiskach zarówno liniowych jak i nieliniowych.

W magnetodynamicznym modelu numerycznym nadprzewodnikowego ogranicznika prądu zastosowano metodę rozdzielania stanów pracy urządzenia nadprzewodnikowego na dwa niezależne stany: nadprzewodzący i rezystywny.

Wykazano, że w modelu numerycznym nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu indukcyjnego można zastąpić rzeczywistą geometrię rdzenia stalowego geometrią osiowosymetryczną.

Modele numeryczne zweryfikowane zostały wynikami badań eksperymentalnych.

Modele numeryczne i badania doświadczalne pozwoliły stwierdzić następujące prawidłowości:

- stosowanie metody rozdzielania etapów i stanów pracy urządzeń nadprzewodnikowych upraszcza ich modelowanie numeryczne,
- właściwości cieplne obszarów obliczeniowych w numerycznych modelach cieplnych urządzeń nadprzewodnikowych mogą być definiowane podobnie,
- przedstawione w pracy modele numeryczne można zaadoptować do modelowania zagadnień cieplnych w większości urządzeń nadprzewodnikowych,
- współczynnik wypełnienia uzwojenia pozwala uwzględnić w obliczeniach złożoną budowę wewnętrzną przewodów nawojowych i uzwojeń nadprzewodnikowych,
- właściwości fizycznych obszarów obliczeniowych i źródeł można definiować przez wieloparametrowe procedury użytkownika programu FLUX2D,
- modele numeryczne wykorzystujące programy autorskie pozwalają na dostęp do kodu źródłowego i na pełną kontrolę nad przebiegiem obliczeń,

Najważniejsze wyniki naukowe pracy można podsumować następująco:

- opracowanie metody definiowania rezystywności obszarów obliczeniowych zawierających nadprzewodniki, która w połączeniu z odpowiednio dobranymi warunkami brzegowymi pozwala na

uwzględnienie w obliczeniach wpływu jednocześnie trzech parametrów: temperatury, prądu i pola magnetycznego na właściwości nadprzewodnika,

- opracowanie sposobów organizacji obliczeń i współpracy programów autorskich z programami narzędziowymi FLUX2D i PC-OPERA co pozwoliło na stworzenie hybrydowych modeli numerycznych,
- opracowanie modeli numerycznych dotyczących wszystkich głównych technik chłodzenia urządzeń nadprzewodnikowych: techniki chłodzenia w kąpeli, techniki chłodzenia wymuszonego oraz techniki chłodzenia kontaktowego,
- opracowanie i eksperymentalne zweryfikowanie 8 modeli numerycznych elektrycznych urządzeń nadprzewodnikowych,
- opracowanie modelu matematycznego krawędzi wychwytu cząstek w separatorze OGMS, sprzęgającego zjawiska magneto-statyczne w elektromagnesie nadprzewodnikowym ze zjawiskami hydrodynamicznymi w przestrzeni roboczej separatora,
- zaproponowanie metody zastępczej geometrii rdzenia stalowego w polowo-obwodowym modelu numerycznym indukcyjnego ogranicznika prądu pozwalającej na wykorzystanie programu narzędziowego FLUX2D,
- zaproponowanie metody zastępczej geometrii stosu nadprzewodnikowego i kierunku przepływu prądu w elektrotermicznym modelu numerycznym rezystywnego ogranicznika prądu pozwalającej na wykorzystanie programu narzędziowego FLUX2D,
- zaproponowanie metodę wyznaczania prądu krytycznego elektromagnesu SMES-a na podstawie jego charakterystyki oraz charakterystyk krytycznych przewodu co pozwoliło na ominięcie ograniczeń programu FLUX2D w definiowaniu właściwości nadprzewodników jako funkcji temperatury, prądu i pola magnetycznego

Przedstawione w pracy modele numeryczne, oraz wyniki badań numerycznych zweryfikowane badaniami eksperymentalnymi pozwalają wnioskować, że zarówno programy polowe FLUX2D i PC-OPERA z zaawansowanym programowaniem procedur użytkownika w FORTRANIE oraz programowanie w PASCAL'u i C++ umożliwia tworzenie modeli numerycznych urządzeń nadprzewodnikowych. Dokumentuje to realizację postawionego celu oraz udowadnia tezę pracy.

LITERATURA⁴³

- [1] Rose-Innes A.C., Rhoderick E.H.: Nadprzewodnictwo. PWN, Warszawa, 1973.
- [2] Stankowski J., Czyżak B.: Nadprzewodnictwo. WNT, Warszawa, 1999.
- [3] Cyrot M., Pavuna D.: Wstęp do nadprzewodnictwa. Nadprzewodniki wysokotemperaturowe. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1996.
- [4] Smoliński S.: Nadprzewodnictwo zastosowania. WNT, Warszawa, 1983.
- [5] PN-IEC 60050-815:2002 – Międzynarodowy Słownik Terminologiczny Elektryki – Część 815: Nadprzewodnictwo
- [6] PN-EN 61788 - 1 – Nadprzewodnictwo – Część 1: Pomiar prądu krytycznego. Prąd krytyczny dla prądu stałego nadprzewodników kompozytowych Cu/Nb-Ti
- [7] PN-EN 61788 - 2 – Nadprzewodnictwo – Część 2: Pomiar prądu krytycznego. Prąd krytyczny dla prądu stałego nadprzewodników kompozytowych Nb₃Sn
- [8] IEC 61788-3 – Superconductivity – Part 3: Critical current measurement – DC critical current of Ag-sheathed Bi-2212 and Bi-2223 oxide superconductors
- [9] Glowacki B.A.: Niobium aluminide as a source of high-current superconductors. *Intermetallics*, 7, pp. 117-140, 1999.
- [10] Zhu Y. *et al.*: Microstructure and structural defects in MgB₂ superconductor. *Physica C*, 356, pp. 239-253, 2001.
- [11] Yildirim T. Gülseren O.: „A simple theory of 40 K superconductivity in MgB₂: first-principles calculations of T_c , its dependence on boron mass and pressure,” *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 63 (2002), pp. 2201-2206.
- [12] Schlachter S. I. *et al.*: Influence of the Preparation Process on Microstructure, Critical Current Density and T_c of MgB₂ Power-In-Tube Wires. *IEEE Trans, Appl. Superconduct.*, vol. 13, no. 2, pp. 3203-3206, 2003.
- [13] Applied Superconductivity Conference, ABSTRACTS, Houston, Texas USA, August 4-9, 2002.
- [14] 2004 Applied Superconductivity Conference, CONFERENCE PROGRAM BOOK, Jacksonville, Florida USA, October 3-8, 2004.
- [15] Jha A. R.: Superconductor Technology. Applications to Microwave, Electro-Optics, Electrical Machines, and Propulsion Systems. A WILEY-INTERSCIENCE PUBLICATION, Toronto, 1998.
- [16] Lech W.: Zastosowanie niskich temperatur w urządzeniach energetycznych. Zakład Badań Podstawowych Elektrotechniki MPM i PAN, Warszawa, 1979.
- [17] Brechna H.: Superconducting Magnet Systems. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, J.F.Bermann Verlag, Munchen, 1973.

⁴³ literatura została uszeregowana według kolejności powoływania

-
- [18] Foner S., Schwartz B. B.: Superconducting Machines and Devices. Mir, Moskwa 1977.
- [19] Mikkonen R.: Highlights of S.C. Power Applications in Europe. IEEE Trans, Appl. Superconduct., vol. 12, no. 1, pp. 782-787, 2002.
- [20] Masur L. J. *et al.*: Industrial High Temperature Superconductors: Perspectives and Milestones. IEEE Trans, Appl. Superconduct., vol. 12, no. 1, pp. 1145-1150, 2002.
- [21] American Superconductor, „High temperature superconducting wire,” ASC/HTS-FS-0004, January 2002.
- [22] Manuel P., *et al.*: Prospects for application of high temperature superconductors to electric power networks. Physica C, 372-376, pp. 1591-1597, 2002.
- [23] Malozemoff A. P., Maguire J., Gamble B., Kalisi S.: Power Applications of High-Temperature Superconductors: Status and Perspectives. IEEE Trans, Appl. Superconduct., vol. 12, no. 1, pp. 778-781, 2003.
- [24] Nakatusuka T., *et al.*: Research and development of superconducting cable in Super-ACE project. Cryogenics, 42, pp. 345-350, 2000.
- [25] Ueda K. *et al.*: R&D of a 500 m Superconducting Cable in Japan. IEEE Trans, Appl. Superconduct., vol. 13, no. 2, pp. 1946-1951, 2002.
- [26] Lee P. J. (Ed.): ENGINEERING SUPERCONDUCTIVITY. WILEY-INTERSCIENCE, New York, 2001.
- [27] Qiu M., *et al.*: Studies on High Temperature Superconducting Permanent Magnet. IEEE Trans, Appl. Superconduct., vol. 12, no. 1, pp. 1159-1162, 2002.
- [28] Fujimoto H.: Developing a High-Temperature Superconducting Bulk Magnet for the Maglev Train of the Future. JOM, 50, (10), pp. 16-18, 1998.
- [29] Bea J.-H., *et al.*: The fabrication of superconducting magnet for MRI. Physica C, 372-376, pp. 1342-1345, 2002.
- [30] Maeda H., *et al.*: Present status and future plan of the Tsukuba Magnet Laboratories. Physica B, 216, pp. 141-145, 1996.
- [31] Kozak S., Wojtasiewicz G.: Wybrane zastosowania nadprzewodnictwa w energetyce, XXIV-SPETO, str. 131-134, 2001.
- [32] Luongo C. A. *et al.*: A 100 MJ SMES Demonstration at FSU-CAPS. IEEE Trans, Appl. Superconduct., vol. 13, no. 2, pp. 1800-1805, 2003.
- [33] Snitchler G.: HTS Motor Technology & YBCO Specification. Wire Development Workshop, Jan. 21, 2003.
- [34] Materiały informacyjne producenta, American Superconductor, 2003-2004.
- [35] Lee S., *et al.*: Test Results of a Three Phase HTS Transformer with Double Pan Cake Windings. IEEE Trans, Appl. Superconduct., vol. 12, no. 1, pp. 808-811, 2002.
- [36] High Temperature Superconducting Transformer – <http://www.igc.com>.

- [37] Jelinek Z. *et al.*: Test Results of 14 kVA Superconducting Transformer With Bi-2223/Ag Windings. *IEEE Trans, Appl. Superconduct.*, vol. 13, no. 2, pp. 2310-2312, 2002.
- [38] Schlosser R. *et al.*: Development of High-Temperature Superconducting Transformers for Railway Applications. *IEEE Trans, Appl. Superconduct.*, vol. 13, no. 2, pp. 2325-2330, 2002.
- [39] Tixador P. *et al.*: "Design and Construction of a 41 kVA Bi/Y Transformer. *IEEE Trans, Appl. Superconduct.*, vol. 13, no. 2, pp. 2331-2336, June 2002.
- [40] Kamijo H. *et al.*: Fabrication of Winding Model of High- T_c Superconducting transformer for Railway Rolling Stock. *IEEE Trans, Appl. Superconduct.*, vol. 13, no. 2, pp. 2337-2340, 2002.
- [41] Seong K. C. *et al.*: Current status of SMES in Korea. *Cryogenics*, 42, pp. 351-355, 2002.
- [42] Hamajima T. *et al.*: Specifications and performance experiences of internally cooled small-scale SMES. *Cryogenics*, 38, pp. 1135-1143, 1998.
- [43] Kim H. J., *et al.*: Fabrication and Test of a Superconducting Coil for SMES System. *IEEE Trans, Appl. Superconduct.*, vol. 13, no. 2, pp. 1863-1866, 2002.
- [44] Hanai S., *et al.*: "Design and Test Results of CIC Conductor for a Cost Reduced 100 MW/500 kWh SMES," *IEEE Trans, Appl. Superconduct.*, vol. 13, no. 2, pp. 1810-1813, June 2002.
- [45] Ise T. *et al.*: Magnet Power Supply with Power Fluctuation Compensating Function Using SMES for High Intensity Synchrotron. *IEEE Trans, Appl. Superconduct.*, vol. 13, no. 2, pp. 1814-1817, 2002.
- [46] Hayashi H., *et al.*: Fabrication and Test of a 4 kJ Bi-2223 Pulse Coil for SMES. *IEEE Trans, Appl. Superconduct.*, vol. 13, no. 2, pp. 1867-1870, 2002.
- [47] Friedman A. *et al.*: HT-SMES Operating at Liquid Nitrogen Temperatures for Electric Power Quality Improvement Demonstrating. *IEEE Trans, Appl. Superconduct.*, vol. 13, no. 2, pp. 1875-1878, 2002.
- [48] Ries G., Neumueller H.-W.: Comparison of energy storage in flywheels and SMES. *Physica C*, 357-360, pp. 1306-1310, 2001.
- [49] Gamble B. B. *et al.*: The Status of HTS Motors. prezentowane na IEEE PES Meeting, Chicago, Illinois, July 2002.
- [50] Kalsi S. S.: Development Status of Superconducting Rotating Machines. prezentowane na IEEE PES Meeting, New York, 27-31 January 2002.
- [51] Gubser D. U.: Naval Applications of Magnet Systems. *Physica C*, 341-348, pp. 2525-2528, 2000.
- [52] Baker C. C., Conn R. W., Najmabadi F., Tillack M. S.: Status and prospects for fusion energy from magnetically confined plasmas. *Energy*, vol. 23, no. 7/8, pp. 649-694, 1998.

-
- [53] Dietz J., *et al.*: The ITER fusion experiment. *Vacuum*, vol. 47, no. 6-8, pp. 911-918, 1996.
- [54] Goldacker W., *et al.*: Development of superconducting and cryogenic technology in the Institute for Technical Physics (ITP) of the Research Center Karlsruhe. *Cryogenics*, 42, pp. 735-770, 2002.
- [55] Perkins L. J.: The role of inertial fusion energy in the energy marketplace of the 21th century and beyond. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A* 415, pp. 44-60, 1998.
- [56] Ise T. *et al.*: Magnet Power Supply with Power Fluctuation Compensating Function Using SMES for High Intensity Synchrotron. *IEEE Trans, Appl. Superconduct.*, vol. 13, no. 2, pp. 1814-1821, 2003.
- [57] Scott R. B.: *Technika niskich temperatur*. WNT, Warszawa, 1963.
- [58] Barron R. F.: *Cryogenics systems*. Energoatomizdat, Moskwa, 1989.
- [59] Materiały reklamowe EUROPA METALLI spa, 2002.
- [60] Wilson M. N.: *Superconducting magnets*. Clarendon Press, Oxford 1990.
- [61] Kozak S.: Elektromagnesy nadprzewodnikowe dla separatorów magnetycznych typu OGMS. *PRACE INSTYTUTU ELEKTROTECHNIKI*, zeszyt 206, str. 93-133, 2000.
- [62] Materiały informacyjne producenta, Nexans, 2003-2004.
- [63] Materiały informacyjne producenta, TRITHOR, 2004.
- [64] Kovalev L. K., *et al.*: Electrical machines with bulk HTS elements. The achieved results and future development. *Physica C*, 357-360, pp. 860-865, 2001.
- [65] Janowski T., Stryczewska H. D., Kozak S., Malinowski H., Wojtasiewicz G., Surdacki P., Kondratowicz-Kucewicz B., Kozak J.: *Nadprzewodnikowe ograniczniki prądu*. Wydawnictwo LIBER, Lublin, 2002.
- [66] Materiały informacyjne producenta, CAN Superconductors, 2002-2004.
- [67] 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.
- [68] Lech W.: *Metody chłodzenia elektromagnesów nadprzewodnikowych*. *PRACE INSTYTUTU ELEKTROTECHNIKI*, zeszyt 125, 1983.
- [69] 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.
- [70] Janowski T., Wojtasiewicz G., Malinowski H., Kozak S., Kondratowicz-Kucewicz B.: Stanowisko do eksperymentalnych badań nadprzewodników. *XXIII-SPETO*, str. 171-174, 2000.

- [71] 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.
- [72] Kozak S.: "Current leads of superconducting device calculations", XXII-SPETO 1999, str.133-136, Gliwice - Ustroń 1999.
- [73] Kozak S.: FLUX2D for current leads of superconducting device calculations. Wydawnictwa Uczelniane Politechniki Lubelskiej, ELMECO'97 - Conference Proceedings, pp. 155-160, 1997.
- [74] Materiały informacyjne, Cryomagnetics, 2002.
- [75] Materiały informacyjne, Furukawa Electric, 2003.
- [76] ACCEL-Instruments: Selected Reference Projects. September 2004.
- [77] Kozak S.: Model numeryczny nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu indukcyjnego. III Seminarium „Zastosowania nadprzewodników”, str. 121-126, 2001.
- [78] Wojtasiewicz G., Kozak S.: Pomiary charakterystyk statycznych modelu nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu indukcyjnego. III Seminarium „Zastosowania nadprzewodników”, str. 111-120, 2001.
- [79] Cieśla A.: Analiza stanów pracy separatora matrycowego z elektromagnesem nadprzewodnikowym jako źródłem pola. Rozprawy Monografie 44, Wydawnictwa AGH, Kraków 1996.
- [80] Kozak S.: Obliczanie parametrów elektromagnesów nadprzewodnikowych dla separatorów magnetycznych typu OGMS. Rozprawa doktorska, Instytut Elektrotechniki w Warszawie, 1990.
- [81] Janowski T., Kozak S.: Efficiency of a superconducting OGMS separator", IEEE Transactions on Magnetics, vol. 26, no. 5, pp. 1864-1866, 1990.
- [82] Janowski T., Kozak S.: The superconducting OGMS separator optimization. IEEE Transactions on Magnetics, vol. 29, no. 6, pp. 3261-3263, 1993.
- [83] Cieśla A.: Superconductor magnetic filter: industrial constructions. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, ELMECO 2000 - Conference Proceedings, pp. 174-182, 2000.
- [84] Materiały informacyjne, CARPCO, 2003.
- [85] Iannicelli J., *et al.*: IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 7, no. 2, pp. 1061-1064, 1997.
- [86] Waynert J. A. *et al.*: Restoration and Testing of an HTS Fault Current Controller. IEEE Trans, Appl. Superconduct., vol. 13, no. 2, pp. 1984-1987, 2003.
- [87] Yazawa T. *et al.*: 66 kV-Class High- T_c Superconducting Fault Current Limiter magnet Model Coil Experiment. IEEE Trans. Appl. Superconduct., vol. 13, no. 2, pp. 2040-2043, 2003.
- [88] Materiały informacyjne, ABB, 2003.

-
- [89] Janowski T., Kozak S., Malinowski H., Wojtasiewicz G., Kondretowicz-Kucewicz B., Kozak J.: Properties Comparison of Superconducting Fault Current Limiters with Closed and Open Core. *IEEE Trans. Appl. Superconduct.*, vol. 13, no. 2, pp. 2072-2075, 2003.
- [90] Kazowski E. J., Karcew W. P., Szahtarin W., N.: *Swierhprowodiaszie magnitnye systemy*. Wydawnictwo „NAUKA”, Leningrad, 1967.
- [91] FLUX2D 7.20 - CAD Package for Electromagnetic and Thermal Analysis using Finite Elements, User's Guide, CEDRAT, August 1996.
- [92] Bielecki J., Suchenek M.: *FORTTRAN dla zaawansowanych*. PWN, Warszawa, 1981.
- [93] Kozak S.: Model Numeryczny elektromagnesu nadprzewodnikowego chłodzonego kontaktowo. *Przegląd Elektrotechniczny*, R. LXXIX 9, str. 629-633, 2003.
- [94] FLUX2D 7.20 - CAD Package for Electromagnetic and Thermal Analysis using Finite Elements, Steady State and Transient Thermal Tutorial, CEDRAT, June 1996.
- [95] Janowski T., Kozak S., Kondratowicz-Kucewicz B., Wojtasiewicz G.: Eksperymentalne wyznaczenie krytycznego natężenia pola magnetycznego nadprzewodników. VI Krajowe Sympozjum Pomiarów Magnetycznych, Prace Komisji Metrologii Oddziału PAN w Katowicach, seria: Konferencje nr 3, str.150-157, 2000.
- [96] Model 218 Temperature Monitor, USER'S MANUAL, Lake Shore Cryotronics, Inc., May 1999.
- [97] Małkow M. P. et al.: *Sprawocznik po fiziko-technicznych osnovam kriogeniki*. ENERGOATOMIZDAT, Moskwa, 1985.
- [98] Sosnowski J.: Analysis of the electromagnetic losses generation in the high temperature superconductors. 22nd Seminar IC-SPETO'99, pp.129-132, 1999.
- [99] Kozak S.: „Numerical model of superconducting fault current limiter”, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. LXXX 11, str. 1101-1105, 2004.
- [100] Noe M. et al.: Measurements and tests of HTS bulk material in resistive fault current limiters. *Physica C*, 372-376, pp. 1626-1630, 2002.
- [101] Noe M. et al.: Testing Bulk HTS Modules for Resistive Superconducting Fault Current Limiters. *IEEE Trans. Appl. Superconduct.*, vol. 13, no. 2, pp. 1976-1979, 2003.
- [102] Elschner S. et al.: Manufacturing and Testing of MCP 2212 Bifilar Coils for a 10 MVA Fault Current Limiters. *IEEE Trans. Appl. Superconduct.*, vol. 13, no. 2, pp. 1980-1983, 2003.
- [103] Cha Y.S.: An Empirical Correlation of $E(J, T)$ of a Melt-Cast-Processed BSCCO-2212 Superconductor Under Self Field. *IEEE Trans. Appl. Superconduct.*, vol. 13, no. 2, pp. 2028-2031, 2003.

- [104] Bock J. et al.: Development and successful testing of MCP BSCCO-2212 components for a 10 MVA resistive superconducting fault current limiter. *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 17, no 5, pp. S122-S126, 2004.
- [105] Ye L., Juengst K.-P.: Modeling and Simulation of High Temperature Resistive Superconducting Fault Current Limiters. *IEEE Trans. Appl. Superconduct.*, vol. 14, no. 2, pp. 839-842, 2004.
- [106] Kozak S.: Calculation of the capture edge in the OGMS superconducting separator. *PWN, Journal of Technical Physics*, 39, 3-4, pp. 529-540, 1998.
- [107] Kozak S.: Numerical analysis of phenomena in superconducting OGMS separator. *Journal of Technical Physics*, 42, 1, pp. 53-83, 2001.
- [108] Tamm I. E.: *Podstawy teorii elektryczności*. WNT, Warszawa 1967.
- [109] *TURBO PASCAL 6.0*, Borland International, 1990.
- [110] Kozak S.: The OGMS separator cryoelectromagnet winding designing. *ELMECO'94 - Conference Proceedings*, pp. 285-290, 1994.
- [111] Kozak S.: Selected methods of designing the superconducting coils. *PWN, Journal of Technical Physics*, 38, 3, pp. 533-547, 1997.
- [112] Cieśla A.: Wybrane zagadnienia wykorzystania elektromagnesu nadprzewodnikowego do filtracji magnetycznej. *III Seminarium „Zastosowania nadprzewodników*, str. 65-74, 2001.
- [113] *BORLAND C++ 3.0*, Borland International, 1991.
- [114] Kozak S.: Wychwytywanie materiału ferromagnetycznego w odchylającym separatorze nadprzewodnikowym OGMS. *XVII-SPETO*, str. 271-276, 1994.
- [115] *FLUX2D 7.20 - CAD Package for Electromagnetic and Thermal Analysis using Finite Elements, Tutorial of Magnetostatics*. CEDRAT, June 1996.
- [116] *PC-OPERA REFERENCE MANUAL. Software for Electromagnetic Design from VECTOR FIELDS*, February 1994.
- [117] *PC-LabCard, User's Manual*. Advantech Co., Ltd., June 1994.
- [118] *DASYLab Version 6.0: User Guide*. National Instruments, 2001.
- [119] *DASYLab Version 6.0: Module Reference Guide*. National Instruments 2001.
- [120] Kozak S., Janowski T.: Physical and Numerical Models of Superconducting Fault Current Limiters. *IEEE Trans, Appl. Superconduct.*, vol. 13, no. 2, pp. 2068-2071, 2003.
- [121] *FLUX2D 7.20 - CAD Package for Electromagnetic and Thermal Analysis using Finite Elements, Circuit Equations Coupling*, CEDRAT, December 1996.

MODELLING OF ELECTRIC SUPERCONDUCTING DEVICES

S. KOZAK

SUMMARY *Special properties of the superconductors allow to build the electric devices that have the parameters impossible to be reached while using conventional materials. The electric device can be called superconducting when it contains elements made of the superconductor and working in a superconducting state. Experimental research on the superconducting devices is expensive and time-consuming. Numerical models verified by the results of the experimental research facilitate as well complete examination of superconducting devices as an analysis of phenomena that take place inside the superconducting devices. They allow for examining and analysing the mutual influence of parameters and physical quantities that would be difficult or even impossible to be measured. The change of geometry of the numerical models of the devices does not involve high expenditure connected with building physical models of the superconducting devices. The electric superconducting devices are built as DC or AC ones, with or without mobile parts. The phenomena that occur inside them are of different nature: thermal, electric, magnetic in linear or non-linear environment. Moreover, the running of superconducting devices is connected with the phenomena of movement and collisions of the particles; with hydrodynamics of the solutions and the suspensions; with mechanical stress, and other effects. For this reason, while creating the numerical models, every kind of device needs individual treatment, involving the special conditions of working, a structure, and the phenomena that influence the running. The main problems, concerning the building and cooling of superconducting devices, and connected with numerical modelling of them, have been described in this paper. Three ways of creating numerical models of the superconducting devices have been presented: the numerical models created by using the CAD FEM-circuit program FLUX2D; the hybrid numerical models that use the author's own calculating programs which control the cooperation with the CAD FEM-circuit programs FLUX2D and PC-OPERA; and the numerical model that uses the author's own calculating program only. It has been demonstrated that thanks to the advanced programming and using the CAD FEM-circuit programs properly, it is possible to create the numerical models of the superconducting devices. Ten detailed mathematical-numerical models, including the speciality of the phenomena taking place inside the current leads, the superconducting magnets for magnetic separators and SMES, the superconducting magnetic separators, and the superconducting fault current limiters, have been presented in this paper. The numerical models have been verified by the experimental research.*



Dr inż. Sławomir Kozak w 1980 roku ukończył studia na Politechnice Lubelskiej uzyskując stopień magistra inżyniera elektryka. Od września 1980 roku zatrudniony jest w Instytucie Elektrotechniki w Pracowni Technologii Nadprzewodnikowych, obecnie na stanowisku adiunkta. W 1990 r. uzyskał w Instytucie Elektrotechniki stopień doktora, specjalność – Nadprzewodnictwo. Głównym obszarem jego zainteresowań naukowych są stałoprądowe i przemiennoprądowe zastosowania nadprzewodników niski- i wysokotemperaturowych takie jak: elektromagnesy nadprzewodnikowe, nadprzewodnikowe separatory magnetyczne, SMES-y (superconducting magnetic energy storage), nadprzewodnikowe ograniczniki prądu i kriogeniczne przepusty prądowe. Bierze udział w projektowaniu, budowaniu oraz badaniach eksperymentalnych urządzeń nadprzewodnikowych pracujących w temperaturach kriogenicznych (niska temperatura, wysoka próżnia). Zajmuje się tworzeniem modeli matematycznych i numerycznych opisujących zjawiska magnetostatyczne, magnetodynamiczne, elektrotermiczne i hydrodynamiczne występujące w urządzeniach nadprzewodnikowych. Bierze czynny udział w pracach normalizacyjnych z dziedziny nadprzewodnictwa w Normalizacyjnej Komisji Problemowej nr 290 ds. Technik Specjalnych w Elektryce. Jest członkiem Lubelskiego Towarzystwa Naukowego oraz Polskiego Towarzystwa Zastosowań Elektromagnetyzmu. Autor 58 publikacji w tym 26 samodzielnych.

**Druk niniejszego zeszytu został sfinansowany ze środków KBN,
Projekt Badawczy 4 T10A 000425, (2003...206).**