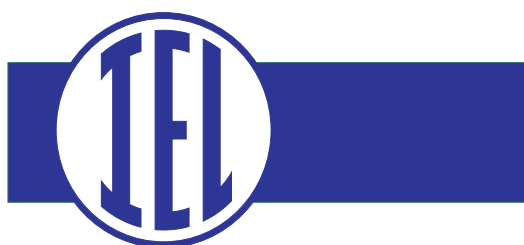


**PRACE
INSTYTUTU
ELEKTROTECHNIKI**

**PROCEEDINGS
OF
ELECTROTECHNICAL
INSTITUTE**

ISSN-0032-6216



WARSZAWA
LXV
Zeszyt 279

REDAKCJA

REDAKTOR NACZELNY:

dr hab. inż. Wojciech Krajewski, prof. IEL
tel.: 22 11 25 347, e-mail: w.krajewski@iel.waw.pl

SEKRETARZ REDAKCJI:

Magdalena Kamińska
tel. 22 11 25 221, e-mail: m.kaminska@iel.waw.pl

RADA PROGRAMOWA

Przewodniczący:

prof. Marian Kaźmierkowski

Polska Akademia Nauk

Członkowie:

prof. Kazimierz Adamiak

University of Western Ontario, Canada

prof. Hartmut Brauer

Ilmenau University of Technology, Germany

prof. Ivo Doležel

Czech Technical University, Czech Republic

prof. Zenon Hotra

Narodowy Uniwersytet Techniczny „Lvivska Politechnika”, Ukraina

prof. Bill Lionheart

University of Manchester, United Kingdom

prof. Piotr E. Marszałek

Duke University, USA

prof. Henryk Sibilski

Instytut Elektrotechniki

prof. Josef Slama

Slovak University of Technology, Slovakia

prof. Jan Sokołowski

Université de Lorraine, Campus des Aiguillettes, France

Redakcja techniczna: Magdalena Kamińska

Wszystkie artykuły publikowane w *Pracach Instytutu Elektrotechniki* są recenzowane. Wersja drukowana jest wersją pierwotną czasopisma.

Prace IEL indeksowane są w następujących bazach: BazTech, e-PNP, Google Scholar, IBUK, Index Copernicus, EBSCO oraz Inspec.

Wszystkie informacje o czasopiśmie, instrukcje oraz formularze dla autorów i recenzentów znajdują się na stronie www.praceiel.pl

ADRES REDAKCJI:

Instytut Elektrotechniki
Dział Marketingu i Informacji Naukowej
ul. M. Pożaryskiego 28, 04-703 Warszawa
tel.: 22 11 25 221; fax: 22 11 25 445;
e-mail: m.kaminska@iel.waw.pl

WSZELKIE PRAWA ZASTRZEŻONE

© Copyright by Instytut Elektrotechniki



INSTYTUT
ELEKTROTECHNIKI

Michał Majka



BEZRDZENIOWE NADPRZEWODNIKOWE
OGRANICZNIKI PRĄDU ZWARCIOWEGO
TYPU INDUKCYJNEGO



**Prace Instytutu
Elektrotechniki**
ISSN-0032-6216, LXV,
zeszyt 279, 2018

DOI: 10.5604/01.3001.0012.7702



OPINIOWALI:

dr hab. inż. Antoni CIEŚLA, prof. AGH

prof. dr Bartłomiej A. GŁOWACKI

SPIS TREŚCI

STRESZCZENIE	9
WYKAZ OZNACZEŃ I SKRÓTÓW.....	10
1. WPROWADZENIE	12
1.1. Zakres pracy	14
1.2. Podstawowe pojęcia nadprzewodnictwa	15
2. TAŚMY NADPRZEWODNIKOWE DRUGIEJ GENERACJI.....	20
2.1. Rezystancja taśm HTS 2G firmy SuperPower	23
2.2. Eksperymentalne wyznaczenie rezystancji taśm HTS 2G w funkcji temperatury.....	26
2.3. Prąd w warstwach taśm HTS 2G firmy SuperPower	31
2.4. Badania eksperymentalne taśm HTS 2G w stanach przejściowych.....	33
2.4.1. Badania pojedynczej taśmy HTS 2G w stanach przejściowych	34
2.4.2. Badania równoległe połączonych taśm HTS 2G w stanach przejściowych	38
2.5. Dobór taśm nadprzewodnikowych do nadprzewodnikowych ograniczników prądu.....	42
2.6. Połączenia lutowane taśm HTS 2G	50
2.6.1. Pomiary rezystancji połączeń lutowanych taśm ReBCO mikroomierzem Megger DLRO-10X.....	53
2.6.2. Pomiary rezystancji połączeń lutowanych taśm ReBCO prądem pomiarowym 100, 150 i 200 A	55
3. CHŁODZENIE NADPRZEWODNIKOWYCH OGRANICZNIKÓW PRĄDÓW ZWARCIOWYCH W KĄPIELI CIEKŁEGO AZOTU	58
4. ZASADA DZIAŁANIA NADPRZEWODNIKOWYCH OGRANICZNIKÓW PRĄDU...	65
5. WYBRANE PROJEKTY SFCL NA ŚWIECIE.....	70
5.1. Rezystancyjne nadprzewodnikowe ograniczniki prądu	72
5.2. Nadprzewodnikowe ograniczniki prądu z nasyconym rdzeniem	75
5.3. Nadprzewodnikowe ograniczniki prądu typu indukcyjnego z ekranowanym rdzeniem	76
5.4. Bezrdzeniowe nadprzewodnikowe ograniczniki prądu typu indukcyjnego	77
6. NADPRZEWODNIKOWY OGRANICZNIK PRĄDU ZWARCIOWEGO	
6,9 kV / 600 A	82
6.1. Model fizyczny ogranicznika prądu 6,9 kV / 600 A	82
6.1.1. Pierwotne uzwojenie miedziane ogranicznika	82
6.1.2. Uzwojenie nadprzewodnikowe ogranicznika	84
6.1.3. Montaż modułów nadprzewodnikowego ogranicznika prądu	87
6.1.4. Kriostat ogranicznika	94
6.2. Model numeryczny ogranicznika 6,9 kV / 600 A.....	96
6.3. Pomiary elektryczne parametrów uzwojeń ogranicznika 6,9 kV / 600 A	104
6.3.1. Pomiary rezystancji połączeń	104
6.3.2. Pomiary rezystancji i indukcyjności uzwojeń ogranicznika	107
6.3.3. Pomiar współczynnika sprzężenia magnetycznego pomiędzy uzwojeniami.....	112
6.3.4. Pomiary rezystancji izolacji.....	114
6.4. Testy zwarciove ogranicznika 6,9 kV / 600 A	116
6.5. Podsumowanie	118

7. NADPRZEWODNIKOWY OGRANICZNIK PRĄDU ZWARCIOWEGO	
15 kV / 140 A.....	119
7.1. Model fizyczny ogranicznika prądu 15 kV / 140 A	119
7.1.1. Uzwojenia nadprzewodnikowe ogranicznika	123
7.1.2. Pierwotne uzwojenie miedziane ogranicznika	124
7.1.3. Montaż nadprzewodnikowego ogranicznika prądu.....	126
7.2. Modele numeryczne ogranicznika 15 kV / 140 A.....	128
7.2.1. Model numeryczny ogranicznika do analizy wpływu liczby zwojów ogranicznika na temperaturę końcową w chwili wyłączenia zwarcia	128
7.2.1.1. Wyniki obliczeń numerycznych.....	131
7.2.2. Model numeryczny ogranicznika do analizy zmian temperatury w stanie ograniczania prądu i w stanie reaktywacji.....	152
7.2.2.1. Geometria modelu numerycznego ogranicznika	152
7.2.2.2. Wyniki analizy numerycznej.....	156
7.3. Pomiary parametrów elektrycznych uzwojeń ogranicznika w temperaturze pokojowej.....	163
7.3.1. Pomiary rezystancji izolacji uzwojeń nadprzewodnikowych	163
7.3.2. Pomiar rezystancji kontaktów w łączeniowych blokach miedzianych.	165
7.3.3. Pomiar indukcyjności cewek pierwotnego uzwojenia HTS	166
7.3.4. Pomiar impedancji, rezystancji, indukcyjności uzwojeń nadprzewodnikowych i uzwojenia miedzianego	167
7.4. Testy zwarciove ogranicznika 15 kV / 140 A	168
7.5. Podsumowanie	172
8. WNIOSKI KOŃCOWE.....	173
LITERATURA	175

CONTENTS

ABSTRACT.....	9
LIST OF SYMBOLS AND ACRONYMS	10
1. INTRODUCTION.....	12
1.1. Scope of work.....	14
1.2. Basic concepts of superconductivity.....	15
2. SECOND GENERATION SUPERCONDUCTING TAPES	20
2.1. Resistance of HTS 2G tapes from SuperPower	23
2.2. Experimental determination of HTS 2G tapes resistance as a function of temperature	26
2.3. Current in layers of SuperPower HTS 2G tapes.....	31
2.4. Experimental researches on HTS 2G tapes in transient states	33
2.4.1. Testing of single 2G HTS tape in transient states.....	34
2.4.2. Testing of parallel-connected 2G HTS tapes in transient states	38
2.5. Selection of HTS tapes for superconducting fault current limiters	42
2.6. Soldered joints of 2G HTS tapes	50
2.6.1. Resistance measurements of soldered joints of ReBCO tapes with low resistance ohmmeter Megger DLRO-10X.....	53
2.6.2. Resistance measurements of soldered joints of ReBCO tapes with 100, 150 and 200 A measuring current	55
3. COOLING OF SUPERCONDUCTING FAULT CURRENT LIMITERS IN LIQUID NITROGEN BATH.....	58
4. PRINCIPLE OF OPERATION OF SUPERCONDUCTING FAULT CURRENT LIMITERS	65
5. SELECTED PROJECTS OF SFCLS IN THE WORLD	70
5.1. Resistive superconducting fault current limiters	72
5.2. Saturated core fault current limiters.....	75
5.3. Inductive superconducting fault current limiters with shielded iron core.....	76
5.4. Coreless inductive superconducting fault current limiters.....	77
6. SUPERCONDUCTING FAULT CURRENT LIMITER 6.9 KV / 400 A.....	82
6.1. Physical model of the 6.9 kV / 600 A current limiter	82
6.1.1. Primary copper winding of the limiter	82
6.1.2. Superconducting winding of the limiter	84
6.1.3. Assembly of superconducting current limiter modules.....	87
6.1.4. Cryostat of the limiter	94
6.2. Numerical model of 6.9 kV / 600 A limiter.....	96
6.3. Electrical measurements of electrical parameters of the 6.9 kV / 600 A limiter windings	104
6.3.1. Measurements of the resistance of connections	104
6.3.2. Measurements of resistance and inductance of the limiter windings	107
6.3.3. Measurement of magnetic coupling coefficient between winding	112
6.3.4. Measurements of insulation resistance.....	114
6.4. Short-circuit tests of 6.9 kV / 600 A limiter.....	116
6.5. Summary	118

7. SUPERCONDUCTING FAULT CURRENT LIMITER 15 kV / 140 A	119
7.1. Physical model of the 15 kV / 140 A superconducting fault current limiter ...	119
7.1.1. Superconducting windings of the limiter.....	123
7.1.2. Primary copper winding of the limiter	124
7.1.3. Assembly of the superconducting fault current limiter.....	126
7.2. Numerical models of 6.9 kV / 600 A limiter.....	128
7.2.1. Numerical model of the limiter for the analysis of the influence of the number of turns of the limiter windings on the final temperature at the moment of switching off the short circuit.....	128
7.2.1.1 Results of numerical calculations	131
7.2.2. Numerical model of the limiter for the analysis of temperature changes in the state of limiting current and in the reactivation state	152
7.2.2.1 Geometry of numerical model.....	152
7.2.2.2 Results of numerical analysis	156
7.3. Measurements of the electrical parameters of the limiter windings at room temperature	163
7.3.1. Measurements of the insulation resistance of the superconducting windings	163
7.3.2. Measurement of the contacts resistance of the copper connection blocks.....	165
7.3.3. Measurement of the inductance of the primary HTS coils	166
7.3.4. Measurement of impedance, resistance and inductance of HTS windings and copper winding.....	167
7.4. Short-circuit tests of 15 kV / 140 A limiter.....	168
7.5. Summary	172
8. FINAL CONCLUSIONS.....	173
REFERENCES	175

STRESZCZENIE *Sily elektrodynamiczne występujące w trakcie przepływu prądu zwarciovego mogą uszkodzić urządzenia systemu elektroenergetycznego w ciągu kilkudziesięciu milisekund. Każde uszkodzenie sieci elektrycznej tego typu pociąga za sobą kosztowne i czasochłonne naprawy, dlatego ważne jest, aby działanie sieci było zabezpieczone niezawodnym systemem ochrony. Nadprzewodnikowy ogranicznik prądu zwarciovego (SFCL – ang. Superconducting Fault Current Limiter) to urządzenie elektryczne o znikomej impedancji w normalnych warunkach pracy, które przechodzi w stan wysokiej impedancji podczas zwarcia, ograniczając prąd zwarciovowy. Ograniczniki nadprzewodnikowe działają bardzo szybko, ograniczając pierwszą, najniebezpieczniejszą szczytową wartość prądu zwarciovego, chroniąc w ten sposób urządzenia sieci elektrycznej przed dynamicznymi skutkami przepływu prądu zwarciovego.*

W pracy omówiono główne zagadnienia dotyczące nowych konstrukcji bezrdzeniowych ograniczników prądu zwarciovego typu indukcyjnego o parametrach znamionowych 6,9 kV/600 A i 15 kV/140 A. Kompaktowa konstrukcja bezrdzeniowego ogranicznika prądu zwarciovego składa się z trzech sprzężonych magnetycznie uzwojeń chłodzonych ciekłym azotem. Przedstawione bezrdzeniowe konstrukcje ograniczników mają małą masę, a napięcie na ograniczniku podczas normalnej pracy jest znikome. W pracy przedstawiono projekty i modele numeryczne ograniczników oraz wyniki testów zwarciovych. Praca zawiera również wyniki badań eksperymentalnych prowadzonych nad taśmami nadprzewodnikowymi drugiej generacji z których obecnie budowane są ograniczniki. Wyniki tych badań są niezbędne przy konstruowaniu modeli numerycznych nadprzewodnikowych ograniczników prądu.

Słowa kluczowe: *nadprzewodnikowy ogranicznik prądu zwarciovego, bezrdzeniowy, taśmy nadprzewodnikowe, test zwarciovy, ciekły azot*

Wykaz oznaczeń i skrótów

B	– indukcja magnetyczna, T
B_c	– krytyczna indukcja magnetyczna, T
c_p	– ciepło właściwe, $J/m^3 \cdot K$
E	– energia, J
F	– siła, N
h	– współczynnik konwekcji cieplnej, $W/m^2 \cdot K$
H	– natężenie pola magnetycznego, A/m
H_{c1}	– natężenie dolnego krytycznego pola magnetycznego, A/m
H_{c2}	– natężenie górnego krytycznego pola magnetycznego, A/m
I	– prąd, A
I_c	– prąd krytyczny, A
I_N	– prąd znamionowy, A
i_p	– ograniczony prąd zwarciaowy szczytowy, A
i_{peak}	– spodziewany prąd zwarciaowy szczytowy, A
J	– gęstość prądu elektrycznego, A/m^2
J_c	– gęstość prądu krytycznego, A/m^2
k	– współczynnik sprzężenia magnetycznego
k_c	– współczynnik przewodnictwa cieplnego, $W/m \cdot K$
L	– indukcyjność, H
L_1	– indukcyjność uzwojenia pierwotnego, H
L_2	– indukcyjność uzwojenia wtórnego, H
L	– długość, m
M	– indukcyjność wzajemna, H
μ	– przenikalność magnetyczna, H/m
n	– liczba zwojów
P_{ch}	– moc cieplna odprowadzana do cieczy chłodzącej, W
P_e	– moc elektryczna, W
\dot{q}	– gęstość strumienia ciepła, W/m^2
\dot{Q}	– strumień ciepła, W
R	– rezystancja, Ω
ρ	– rezystywność, $\Omega \cdot m$
s	– pole przekroju poprzecznego, m^2
S_{ch}	– pole powierzchni wymiany ciepła, m^2
T	– temperatura, K
T_c	– temperatura krytyczna, K
T_{max}	– temperatura maksymalna, K
t	– czas, s
t_k	– czas trwania zwarcia, s

t_{lim}	– czas ograniczania prądu, s
T_{max}	– temperatura maksymalna, K
T_p	– temperatura początkowa, K
U	– napięcie, V
U_N	– napięcie znamionowe, V
U_{sfcl}	– napięcie na ograniczniku w stanie wyczekiwania, V
v	– objętość, m ³
X	– reaktancja, Ω
X_m	– reaktancja indukcji wzajemnej, Ω
Ψ	– strumień skojarzony, Wb
Z	– impedancja, Ω
1G	– pierwsza generacja
2G	– druga generacja
Bi2212	– nadprzewodnik $Bi_2Sr_2CaCu_2O_8$
Bi2223	– nadprzewodnik $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$
HTS	– nadprzewodnik wysokotemperaturowy (ang. High Temperature Superconductor)
LTS	– nadprzewodnik niskotemperaturowy (ang. Low Temperature Superconductor)
MgB ₂	– nadprzewodnik dwuborek magnezu
PIT	– technologia rurowo-proszkowa (ang. Powder-In-Tube)
Quench	– niekontrolowane przejście nadprzewodnika ze stanu nadprzewodzącego do stanu rezystywnego
ReBCO	– rodzina związków chemicznych wykazujących nadprzewodnictwo (ang. rare-earth barium copper oxide)
SFCL	– nadprzewodnikowy ogranicznik prądu zwarciovego (ang. Superconducting Fault Current Limiter)
YBCO	– nadprzewodnik $YBa_2Cu_3O_7$

1. WPROWADZENIE

W dzisiejszych czasach wysoka jakość dostarczanej energii elektrycznej jest obligatoryjna, a ilość przerw w dostawach energii powinna być zminimalizowana. Nowoczesne systemy elektroenergetyczne stają się coraz bardziej złożone i podatne na awarie. Zwarcia mogą powstać na skutek wyładowań atmosferycznych, błędnych operacji w stacjach elektroenergetycznych, mechanicznych uszkodzeń napowietrznych linii elektroenergetycznych, kabli, słupów czy zestarzenia, zawilgocenia lub zniszczenia izolacji. Ciągły wzrost mocy zainstalowanej w sieciach przesyłowych prądu przemiennego powoduje wzrastające zapotrzebowanie na urządzenia elektroenergetyczne zdolne nie tylko do wyłączenia dużych prądów w przypadku zwarcia, ale również do ograniczania wartości szczytowych prądów.

Podczas rozbudowy systemu elektroenergetycznego aparatura rozdzielcza musi być dobierana z uwzględnieniem mocy zwarciowej występującej w miejscu zainstalowania. Dołączanie nowych źródeł, w tym odnawialnych źródeł energii, powoduje zwiększenie mocy zwarciowej, a w konsekwencji wzrost wartości prądów zwarciowych. Prądy zwarciowe płynące w stanie zwarcia są jednym z podstawowych zagrożeń dla elementów sieci elektroenergetycznych. Występowanie prądów zwarciowych większych niż dopuszczalne może być przyczyną uszkodzenia lub skrócenia czasu bezawaryjnej pracy elementów systemu. Prądy zwarciowe, których wartość może być nawet kilkaset razy większa od prądów roboczych, wywołują w przewodach oraz w uzwojeniach maszyn i transformatorów wydzielanie się dużej ilości ciepła mimo krótkiego czasu zwarcia oraz powstawanie bardzo dużych sił elektrodynamicznych. Ciepło wydzielające się w przewodach i uzwojeniach podczas przepływu prądu zwarciowego może spowodować wzrost ich temperatury do granicy zagrażającej izolacji urządzeń, a powstające naprężenia mechaniczne mogą przekroczyć wytrzymałość mechaniczną na działanie dynamiczne prądu zwarciowego.

Stosowanie dławików do ograniczania prądów zwarciowych jest rozwiązaniem kosztownym i przy dużych prądach znamionowych przynoszącym istotne straty. Najtańsze rozwiązanie jakim jest bezpiecznik wymaga czasu niezbędnego do wymiany przepalanej wkładki topikowej. W przeciwieństwie do bezpieczników, nadprzewodnikowe ograniczniki prądu nie powodują wyłączenia linii elektroenergetycznej w momencie pojawienia się zwarcia, lecz redukują prądy zwarciowe do bezpiecznego poziomu.

Nadprzewodnikowe ograniczniki prądu efektywnie zmniejszają szczytową wartość prądu zwarciowego w pierwszym półokresie od pojawienia się zwarcia. Są urządzeniami bezpiecznymi, a chłodzenie urządzeń ciekłym azotem jest

neutralne dla środowiska naturalnego. Działanie ograniczników jest samoczynne i niemal natychmiastowe. Ograniczenie prądu zwarciovego powoduje, że urządzenia sieciowe są w mniejszym stopniu narażone na przeciążenia mechaniczne i cieplne, co może znacząco wydłużyć czas ich eksploatacji.

Badania nad nadprzewodnikowymi ogranicznikami prądu z wykorzystaniem wysokotemperaturowych nadprzewodników prowadzone są od wielu lat, podczas których ewolucję przeszły druty i taśmy nadprzewodnikowe. Jeszcze dziesięć lat temu do wykonania prototypów ograniczników wykorzystywane były pierścienie i spirale z nadprzewodnika Bi-2223 lub nadprzewodnikowe elementy cienkowarstwowe. Pojawienie się taśm nadprzewodnikowych pierwszej generacji umożliwiło wykonywanie uzwojeń ograniczników o większej liczbie zwojów i zastąpienie nimi masywnych pierścieni Bi-2223. W chwili obecnej używanie taśmy HTS 1G do wykonywania uzwojeń ograniczników prądu jest ekonomicznie nieuzasadnione ze względu na wysoki koszt taśmy, a przede wszystkim zbyt małą wartość rezystancji taśmy, w stanie rezystywnym, do skutecznego ograniczania prądu zwarciovego. Zmiana nastąpiła wraz z opracowaniem i uruchomieniem produkcji taśm nadprzewodnikowych drugiej generacji w których cienka warstwa nadprzewodnika na niemagnetycznym i rezystywnym podłożu pokryta jest cienką warstwą srebra. Taśmy te umożliwiają budowę skutecznych ograniczników prądu. Ciągły rozwój taśm HTS 2G oraz zwiększanie ich prądu krytycznego powoduje, że koszt wykonania ogranicznika nieustannie maleje, a zmniejszenie strat przemiennoprądowych poprzez zastosowanie podłoża o dużej rezystywności sprawia, że koszt utrzymania temperatury ich pracy w temperaturze 66 – 77 K również znacznie się zmniejszył.

Prowadzone badania nad nadprzewodnikowymi ogranicznikami prądu doprowadziły do opracowania kilku konstrukcji ograniczników, wśród których najbardziej obiecujące w aplikacji są ograniczniki prądu typu rezystancyjnego i indukcyjnego. W dotychczasowych projektach ograniczników prądu typu indukcyjnego z ekranowanym rdzeniem jednym z kluczowych elementów jest rdzeń magnetyczny, którego masa, dla ograniczników dla sieci średnich napięć, zawiera się w przedziale od kilkunastu do kilkudziesięciu ton. W Pracowni Technologii Nadprzewodnikowych Instytutu Elektrotechniki (PTN IEL) od kilku lat prowadzone są intensywne badania nad opracowaniem lekkiej bezrdzeniowej konstrukcji nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu indukcyjnego. Dotychczasowe badania prowadzone w PTN IEL doprowadziły do opracowania dwóch konstrukcji ograniczników tego typu o parametrach znamionowych 6,9 kV / 600 A i 15 kV / 140 A. Dla obu ograniczników wykonano projekty CAD, wykonano ich modele numeryczne, zbudowano rzeczywiste prototypy i przeprowadzono testy zwarciovne. Najważniejsze wyniki prowadzonych badań przedstawiono w kolejnych rozdziałach monografii.

1.1. Zakres pracy

Podstawowym celem pracy jest analiza działania nowej generacji indukcyjnych, bezrdzeniowych nadprzewodnikowych ograniczników prądu zwarciovego.

W pierwszym rozdziale pracy przedstawiono podstawowe pojęcia związane z nadprzewodnictwem.

W rozdziale drugim opisano parametry i właściwości taśm nadprzewodnikowych drugiej generacji (taśm HTS 2G), które są obecnie najczęściej stosowane do wykonywania uzwojeń nadprzewodnikowych ograniczników prądu. Szczegółowo przedstawiono parametry taśm HTS 2G firmy SuperPower. Taśm nadprzewodnikowych tego producenta użyto do wykonania uzwojeń nadprzewodnikowych dwóch modeli fizycznych ograniczników prądu przedstawionych w rozdziale szóstym i siódmym. Rozdział drugi zawiera najważniejsze wyniki badań eksperymentalnych przeprowadzonych przez autora w Pracowni Technologii Nadprzewodnikowych Instytutu Elektrotechniki. Zamieszczono eksperymentalnie wyznaczone charakterystyki rezystancji taśm HTS 2G w funkcji temperatury, które są niezbędne do projektowania nadprzewodnikowych ograniczników prądu oraz tworzenia modeli numerycznych ograniczników, wyniki badań eksperymentalnych taśm HTS 2G w stanach przejściowych oraz charakterystyki nagrzewania taśm nadprzewodnikowych, które pozwalają na określenie temperatury do jakiej zostaną nagrzane uzwojenia ogranicznika chłodzonego ciekłym azotem podczas przepływu prądu zwarciovego. Ponadto rozdział drugi zawiera opis metody wykonywania połączeń lutowanych taśm HTS 2G oraz przeprowadzone wyniki badań eksperymentalnych pomiaru rezystancji połączeń lutowanych, zarówno w temperaturze pokojowej, jak i po schłodzeniu próbek w kąpeli ciekłego azotu.

Rozdział trzeci został poświęcony chłodzeniu ograniczników w kąpeli ciekłego azotu. W rozdziale przedstawiono nieliniowe zależności strumienia ciepła przekazywanego z powierzchni taśmy nadprzewodnikowej do ciekłego azotu w funkcji temperatury powierzchni taśmy nadprzewodnikowej. Charakterystyki te zostały zaimplementowane w modelach numerycznych nadprzewodnikowych ograniczników prądu przedstawionych w rozdziale szóstym i siódmym.

Wprowadzenie do problematyki nadprzewodnikowych ograniczników prądu stanowi rozdział czwarty, w którym opisano zasadę działania nadprzewodnikowych ograniczników prądu.

W rozdziale piątym przedstawione zostały wybrane parametry prototypowych ograniczników prądu zrealizowanych w ostatnich latach.

W rozdziale szóstym i siódmym przedstawiono dwie konstrukcje bezrdzeniowych nadprzewodnikowych ograniczników prądu zwarciovego chłodzonych w kąpeli ciekłego azotu. Oba ograniczniki były zaprojektowane, wykonane i badane

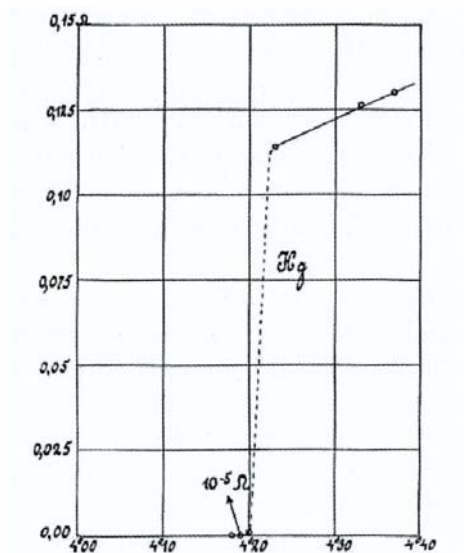
w Instytucie Elektrotechniki w ramach realizacji dwóch projektów badawczych, w których autor był głównym wykonawcą.

W rozdziale szóstym zaprezentowano bezrdzeniowy nadprzewodnikowy ogranicznik prądu zwarciovego o napięciu 6,9 kV i prądzie znamionowy 600 A. W konstrukcji ogranicznika zastosowano równoległe połączenie czterech taśm nadprzewodnikowych, ponieważ prąd znamionowy ogranicznika przekraczał prąd krytyczny pojedynczej taśmy nadprzewodnikowej. Rozdział zawiera wyniki przeprowadzonych symulacji ogranicznika w programie polowo-obwodowym Cedrat Flux2D, szczegółowo opisano wykonany projekt ogranicznika oraz metodę wykonania rzeczywistego ogranicznika. Rozdział zawiera ponadto wyniki pomiarów podstawowych parametrów elektrycznych ogranicznika wykonanych w temperaturze pokojowej (293 K) oraz wyniki przeprowadzonych testów zwarciovych ogranicznika po schłodzeniu w kąpeli ciekłego azotu (77,4 K).

Szczegółowy opis przeprowadzonych analiz i badań eksperymentalnych bezrdzeniowego ogranicznika prądu o parametrach znamionowych 15 kV i 140 A zawiera rozdział siódmy. W rozdziale przedstawiono wyniki przeprowadzonej analizy wpływu liczby zwojów uzwojeń ogranicznika na temperaturę końcową uzwojeń w chwili wyłączenia zwarcia. W wyniku przeprowadzonych symulacji wykazano, że poprzez zmianę liczby zwojów ogranicznika możliwe jest wyrównanie szybkości nagrzewania się uzwojeń ogranicznika podczas przepływu prądu zwarciovego. W rozdziale przedstawiono również wyniki zmian temperatury w stanie ograniczania prądu i w stanie reaktywacji uzyskane w modelu numerycznym ogranicznika uwzględniającym konstrukcję modułową uzwojeń. W rozdziale zaprezentowano model fizyczny ogranicznika 15 kV / 140 A, metodę wykonania uzwojeń nadprzewodnikowych i uzwojenia miedzianego ogranicznika, wyniki przeprowadzonych pomiarów elektrycznych ogranicznika oraz wyniki przeprowadzonych trzech prób zwarciovych ogranicznika. Podsumowanie przeprowadzonych prac znajduje się w rozdziale ósmym.

1.2. Podstawowe pojęcia nadprzewodnictwa

Pierwszy materiał nadprzewodnikowy odkrył Heike Kamerlingh Onnes w 1911 r., który zaobserwował, że rezystancja rtęci spada do zera, gdy próbka zostanie schłodzona poniżej temperatury wrzenia ciekłego helu 4,2 K. Historyczną zależność przedstawia rysunek 1.1 – rezystancja rtęci skokowo rośnie z niemierzalnie małej wartości $< 10^{-5} \Omega$ do 0,1 Ω . Heike Kamerlingh Onnes w kolejnym roku odkrył również, że pole magnetyczne, a więc i prąd elektryczny o wystarczająco dużym natężeniu, powoduje ponowne pojawienie się rezystancji próbki [12], [69], [13], [10], [65], [91], [96].



Rys. 1.1. Historyczny wykres zależności rezystancji rtęci w funkcji temperatury z 26.10.1911 r. [69]

Ze względu na wartość temperatury krytycznej wprowadzono podział nadprzewodników na nadprzewodniki niskotemperaturowe (LTS – ang. low temperature superconductors) oraz nadprzewodniki wysokotemperaturowe (HTS – ang. high temperature superconductors). Granicą rozdzielającą nadprzewodniki niskotemperaturowe od wysokotemperaturowych jest temperatura krytyczna równa 25 K [12], [23], [69]. Temperatura krytyczna jest to wartość temperatury przy której nadprzewodnik przechodzi ze stanu nadprzewodzącego do rezystywnego (lub odwrotnie) przy zerowym polu magnetycznym i zerowym prądzie płynącym przez nadprzewodnik. Temperatury krytyczne dla wybranych nadprzewodników HTS i LTS zamieszczono w tabeli 1 [12], [23], [76], [77], [86].

Jeżeli nadprzewodnik schładzany jest w słabym polu magnetycznym do temperatury niższej niż temperatura krytyczna T_c , to indukcja magnetyczna wewnątrz tego nadprzewodnika jest równa zero: strumień magnetyczny jest całkowicie wypychany z wnętrza nadprzewodnika. Zjawisko to zostało nazwane dla uczczenia jego odkrywców efektem Meissnera-Ochsenfelda.

Nadprzewodnik przechodzi ze stanu nadprzewodzącego do stanu rezystywnego po przekroczeniu pewnej wartości zewnętrznego pola magnetycznego. Ze względu na charakter zachowania się nadprzewodników w zewnętrznym polu magnetycznym został wprowadzony podział na nadprzewodniki I i II rodzaju.

TABELA 1

Temperatury krytyczne wybranych nadprzewodników

Nazwa	T_c , K	Rodzaj nadprzewodnika	
aluminium	1,2	I rodzaju	LTS
ind	3,4	I rodzaju	LTS
rtęć	4,2	I rodzaju	LTS
ołów	7,2	I rodzaju	LTS
niob	9,3	II rodzaju	LTS
NbTi	10,6	II rodzaju	LTS
V ₃ Ga	14,5	II rodzaju	LTS
Nb ₃ Sn	18,3	II rodzaju	LTS
Nb ₃ Al	18,9	II rodzaju	LTS
Nb ₃ Ge	23,7	II rodzaju	LTS
MgB ₂	39	II rodzaju	HTS
YBa ₂ Cu ₃ O ₇	90	II rodzaju	HTS
Bi-2212	85-92	II rodzaju	HTS
Bi-2223	108	II rodzaju	HTS

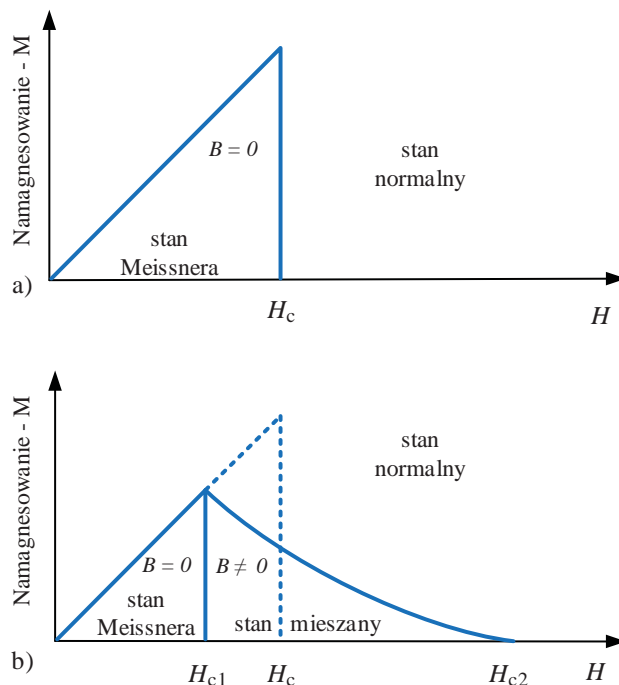
Nadprzewodniki I rodzaju, w stanie nadprzewodzącym, całkowicie wypychają ze swego wnętrza strumień magnetyczny, aż do przejścia do stanu rezystywnego po przekroczeniu natężenia krytycznego pola magnetycznego H_c (rys. 1.2a). Natężenie krytycznego pola magnetycznego jest funkcją temperatury. Większość metali wykazujących nadprzewodnictwo, np. rtęć, aluminium, cyna czy ołów to nadprzewodniki I rodzaju.

Nadprzewodniki II rodzaju charakteryzują się dwoma wartościami natężenia pola krytycznego, wartością dolną H_{c1} oraz górną H_{c2} (rys. 1.2b). Nadprzewodnik II rodzaju poniżej dolnego pola krytycznego H_{c1} jest idealnym diamagnetykiem, który całkowicie wypycha strumień magnetyczny ze swojego wnętrza. Pomiędzy dolnym, a górnym polem krytycznym nadprzewodnik znajduje się w stanie mieszanym – pole magnetyczne jest wypychane z jego wnętrza tylko częściowo. Powyżej górnego pola krytycznego H_{c2} nadprzewodnik przechodzi do stanu rezystywnego [12], [23].

Nadprzewodnikami II rodzaju są metale niob i wanad, niektóre stopy, np. Nb-Ti, Nb-Zr, związki międzymetaliczne, takie jak V₃Ga, Nb₃Sn, Nb₃Al, Nb₃Ga, Nb₃Ge, oraz materiały ceramiczne, takie jak np. Bi-2212, Bi-2223, YBCO i inne np. MgB₂ [12].

Nadprzewodnik przechodzi ze stanu nadprzewodzącego do stanu rezystywnego, po przekroczeniu ściśle określonej wartości prądu stałego. W normie PN-IEC 60050-815:2002 zdefiniowano pojęcie prądu krytycznego I_c , który jest maksymalnym prądem stałym, który może być rozpatrywany, jako płynący przez nadprzewodnik bez rezystancji oraz pojęcie gęstości prądu krytycznego J_c , która jest gęstością prądu elektrycznego przy prądzie krytycznym określona albo dla całego przekroju przewodu (całkowita), albo gdy występuje stabiliza-

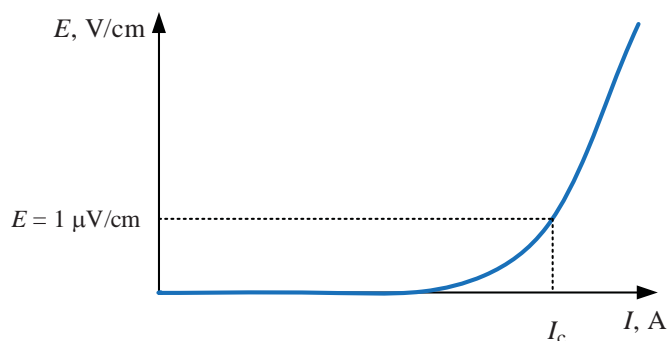
tor, dla niestabilizowanej części przewodu. Zarówno prąd krytyczny I_c , jak i gęstość prądu krytycznego J_c są funkcją natężenia pola magnetycznego i temperatury [97].



Rys. 1.2. Zmiany namagnesowania w funkcji zewnętrznego pola magnetycznego dla: (a) nadprzewodnika I rodzaju i (b) nadprzewodnika II rodzaju

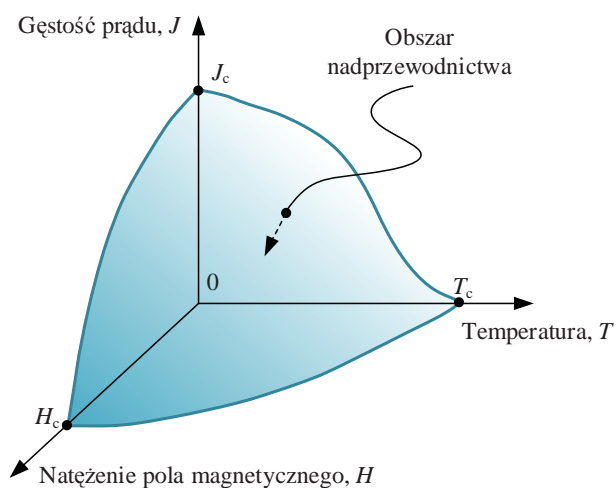
Przepływ prądu w nadprzewodniku o gęstości krytycznej J_c , powoduje indukowanie natężenia pola elektrycznego E_c . Przyjmuje się, że osiągnięto w nadprzewodniku gęstość prądu krytycznego J_c , gdy pole elektryczne w nadprzewodniku osiąga wartość określonego kryterium. Dla nadprzewodników niskotemperaturowych (LTS) stosowane są kryteria polowe 10 $\mu\text{V/m}$ i 100 $\mu\text{V/m}$ [38], [98], [99]. Dla nadprzewodników wysokotemperaturowych (HTS) stosowane są kryteria polowe o większej wartości: 100 $\mu\text{V/m}$ i 500 $\mu\text{V/m}$ [23], [38].

Dla przewodów nadprzewodnikowych wartość prądu krytycznego określana jest w polu magnetycznym własnym, które wytwarzane jest przez prąd płynący przez prostoliniowy odcinek przewodu nadprzewodnikowego. Przewód nadprzewodnikowy jest charakteryzowany przez krzywą prądowo-napięciową (rys. 1.3).



Rys. 1.3. Charakterystyka prądowo-napięciowa nadprzewodnika

Nadprzewodniki znajdują się w stanie nadprzewodzącym, gdy punkt ich pracy wyznaczony przez temperaturę, gęstość prądu oraz natężenie pola magnetycznego leży poniżej charakterystycznej dla każdego z nadprzewodników powierzchni krytycznej (rys. 1.4). Powyżej powierzchni krytycznej materiał nadprzewodnikowy przechodzi do stanu rezystywnego [23]. Skokowa zmiana rezystancji nadprzewodników po przekroczeniu prądu krytycznego, zwana przejściem nadprzewodzącym, wykorzystana jest w konstrukcji nadprzewodnikowych ograniczników prądu.

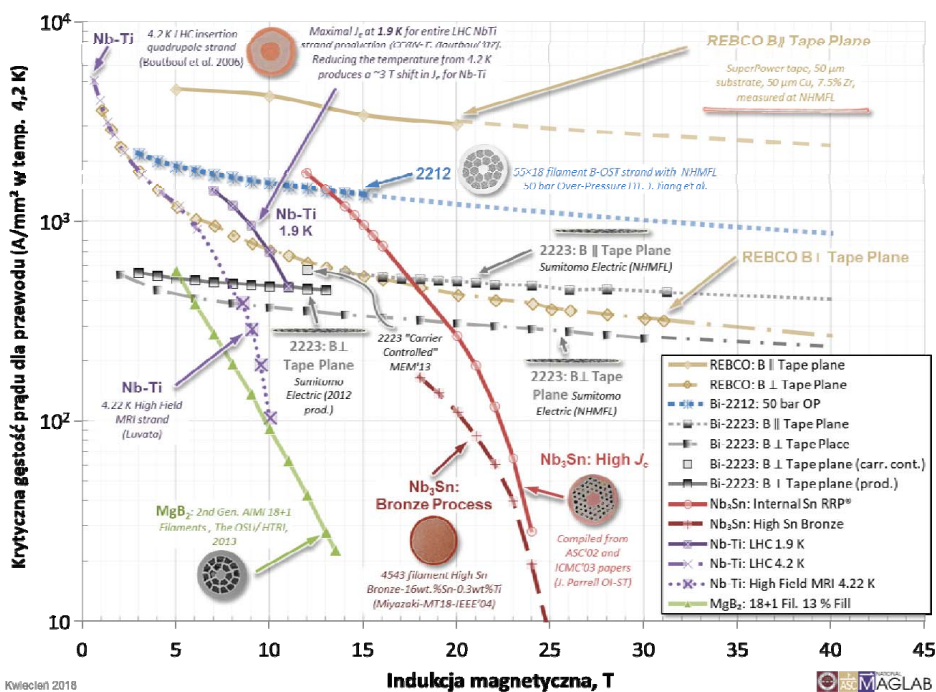


Rys. 1.4. Powierzchnia krytyczna nadprzewodnika

2. TAŚMY NADPRZEWODNIKOWE DRUGIEJ GENERACJI

Obecnie produkowane przewody nadprzewodnikowe wytwarzane są zarówno z nadprzewodników niskotemperaturowych, jak i wysokotemperaturowych. Przewody nadprzewodnikowe różnią się między sobą nie tylko rodzajem nadprzewodnika, ale również budową wewnętrzną i gęstością prądu krytycznego w zewnętrznym polu magnetycznym (rys. 2.1).

Niskotemperaturowe przewody nadprzewodnikowe wytwarzane są od lat sześćdziesiątych ubiegłego wieku. Obecnie produkowane przewody LTS najczęściej wytwarzane są z nadprzewodnika NbTi i Nb₃Sn w postaci włókien umieszczonych w metalowej matrycy. Są używane w elektromagnesach nadprzewodnikowych stosowanych w akceleratorach, czy też w tomografach opartych na rezonansie magnetycznym.



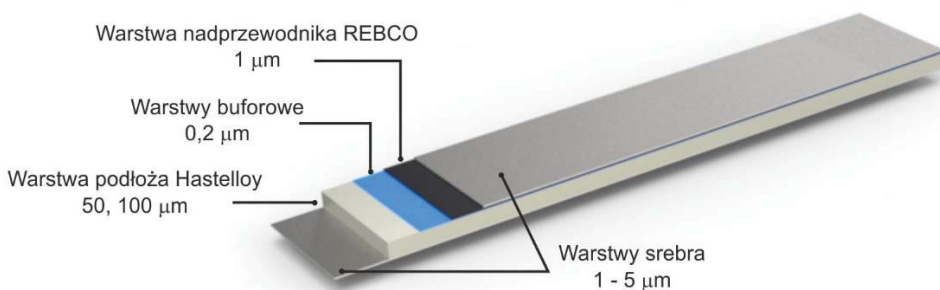
Kwiecień 2018

Rys. 2.1. Gęstość prądów krytycznych w funkcji pola magnetycznego dla przewodów i drutów nadprzewodnikowych [100]

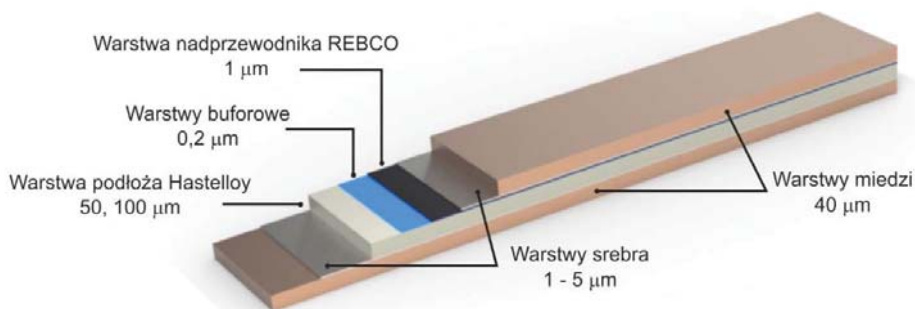
Wysokotemperaturowe przewody nadprzewodnikowe wytwarzane są dwoma technologiami. Pierwsza generacja przewodów nadprzewodnikowych wytwarzana jest z nadprzewodnika Bi-2223. Taśmy HTS 1G mają budowę kompozytową, składają się z włókien nadprzewodnika umieszczonych w metalowej matrycy. Taśmy wytwarzane są w procesie rurowo-proszkowym PIT. W chwili obecnej największym producentem taśm pierwszej generacji jest firma Sumitomo Electric, która oferuje taśmy DI-BSCCO o długości do 1,5 km i prądzie krytycznym do 200 A. Taśmy laminowane są stalą nierdzewną, miedzią lub stopami niklu, dzięki czemu charakteryzują się dużą odpornością na naprężenia mechaniczne [101]. Taśmy tego typu mogą mieć zastosowanie w nadprzewodnikowych ogranicznikach prądu zwarciovego z nasyconym rdzeniem. W ogranicznikach typu rezystancyjnego lub indukcyjnego ze względu na małą wartość rezystywności w stanie rezystywnym nie są obecnie stosowane.

W nadprzewodnikowych ograniczeniach prądu zwarciovego najczęściej stosowane są taśmy nadprzewodnikowe drugiej generacji wykonane w technologii cienkowarstwowej. Taśmy HTS 2G składają się z szeregu warstw, wśród których można wyróżnić: warstwę podłoża, warstwy buforowe, warstwę nadprzewodnika oraz warstwę stabilizatora. Taśmy mogą być pokrywane dodatkowym stabilizatorem miedziowym (np. przewody firmy SuperPower) lub laminowane miedzią, stalą nierdzewną lub mosiądzem (np. przewody firmy American Superconductor).

Taśmy HTS 2G produkowane są przez kilka wytwórni między innymi przez firmę SuperPower wchodzącą w skład Furukawa Electric Group [102], firmę American Superconductor [103], firmę Bruker [104], firmę Theva [105] i firmę SuperOx [106]. W dalszej części rozdziału szczegółowo zostaną przedstawione taśmy HTS drugiej generacji produkowane przez SuperPower, z których wykonano nadprzewodnikowe ograniczniki prądu typu indukcyjnego opisane w dalszych rozdziałach monografii.



Rys. 2.2. Struktura taśmy nadprzewodnikowej drugiej generacji typu SF firmy SuperPower bez stabilizatora miedzanego



Rys. 2.3. Struktura taśmy nadprzewodnikowej drugiej generacji typu SCS firmy SurperPower ze stabilizatorem miedzianym

Strukturę wewnętrzną taśm typu SF (ang. Stabilizer Free) i taśm typu SCS (ang. Surround Copper Stabilizer) firmy SuperPower przedstawiano na rysunku 2.2 i 2.3. Taśmy tego typu są produkowane w pięciu szerokościach 2 mm, 3 mm, 4 mm, 6 mm i 12 mm, z minimalnym gwarantowanym prądem krytyczny I_c odpowiednio 50 A, 75 A, 100 A, 150 A i 300 A. Podłoże taśm wykonane jest z rezystywnego niemagnetycznego stopu Hastelloy C276 (Ni-57%, Mo-6%, Cr-15,50%, Fe-5,50%, W-4,00%, Co-2,50%). Do produkcji taśm HTS 2G stosowane są podłoża o grubościach 30 μm , 50 μm i 100 μm . Od grubości zastosowanego podłoża taśmy HTS zależy wytrzymałość mechaniczna taśmy i jej pojemność cieplna. Taśmy typu SF są specjalnie zaprojektowane do zastosowania w urządzeniach przemiennoprądowych, mają warstwę podłoża wykonaną z niemagnetycznego materiału o dużej rezystywności, dzięki czemu charakteryzują się małymi stratami przy przepływie przemiennego prądu roboczego. Warstwa nadprzewodnika ReBCO (ang. rare-earth barium copper oxide), najczęściej itr lub gadolin, ma grubość 1 μm . Grubość warstwy srebra, od której w głównej mierze zależy rezystancja taśmy w stanie rezystywnym, może być zamówiona w dość szerokim zakresie od 1 μm do 5 μm , standardowa grubość warstwy srebra wynosi 2 μm .

TABELA 2

Parametry taśm HTS 2G typu SF bez stabilizatora miedzianego produkowanych przez SuperPower

	Minimalny prąd krytyczny I_c	Szerokość taśmy	Całkowita grubość taśmy	Grubość podłoża	Grubość warstwy srebra	Minimalna średnica gięcia
SF2050	50 A	2 mm	0,055 mm	50 μm	1 – 5 μm	11 mm
SF3050	75 A	3 mm	0,055 mm	50 μm	1 – 5 μm	11 mm
SF4050	100 A	4 mm	0,055 mm	50 μm	1 – 5 μm	11 mm
SF6050	150 A	6 mm	0,055 mm	50 μm	1 – 5 μm	11 mm
SF12050	300 A	12 mm	0,055 mm	50 μm	1 – 5 μm	11 mm
SF12100	300 A	12 mm	0,105 mm	100 μm	1 – 5 μm	25 mm

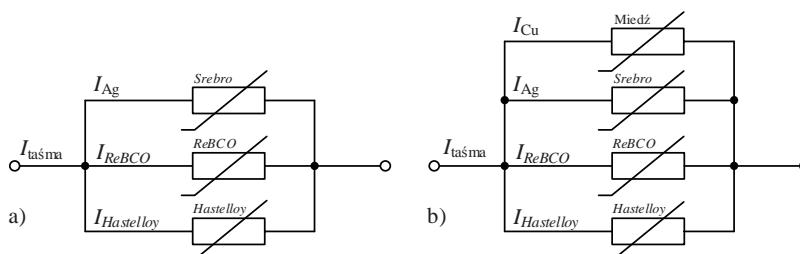
TABELA 3

Parametry taśm HTS 2G typu SCS ze stabilizatorem miedziowym produkowanych przez SuperPower

	Minimalny prąd krytyczny I_c	Szerokość taśmy	Całkowita grubość taśmy	Grubość podłoża Hastelloy	Grubość warstwy srebra	Grubość warstwy stabilizatora miedzanego	Minimalna średnica gięcia
SCS2050	50 A	2 mm	0,1 mm	50 μm	1 – 5 μm	40 μm	11 mm
SCS3050	75 A	3 mm	0,1 mm	50 μm	1 – 5 μm	40 μm	11 mm
SCS4050	100 A	4 mm	0,1 mm	50 μm	1 – 5 μm	40 μm	11 mm
SCS6050	150 A	6 mm	0,1 mm	50 μm	1 – 5 μm	40 μm	11 mm
SCS12050	300 A	12 mm	0,1 mm	50 μm	1 – 5 μm	40 μm	11 mm

2.1. Rezystancja taśm HTS 2G firmy SuperPower

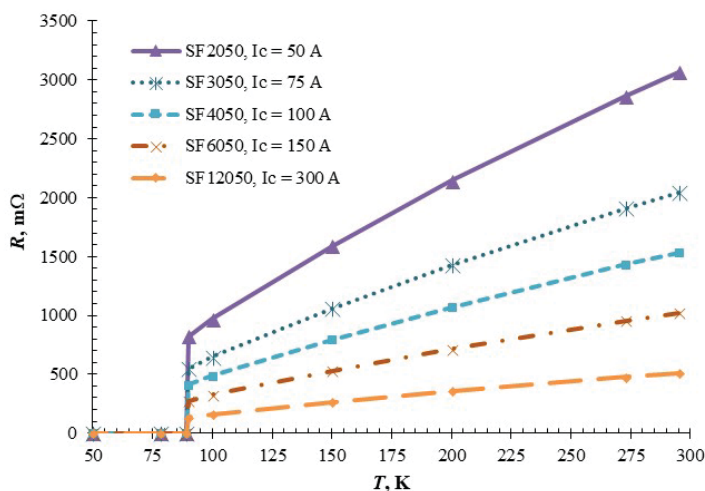
Taśma nadprzewodnikowa typu SF może być zamodelowana jako równoległe połączenie trzech nieliniowych rezystancji (rys. 2.4a), jedną z nich jest rezystancja odpowiadająca nadprzewodnikowi ReBCO, druga z nich odpowiada rezystancji warstwy srebra, trzecią z rezystorów odpowiada rezystancji warstwy podłoża Hastelloy. W przypadku taśmy typu SCS ze stabilizatorem miedziowym dodatkowo występuje rezystor odpowiadający rezystancji stabilizatora miedzanego (rys. 2.4b). Wszystkie rezystory są nieliniowe, ponieważ rezystancja poszczególnych warstw taśmy zmienia się w funkcji temperatury.



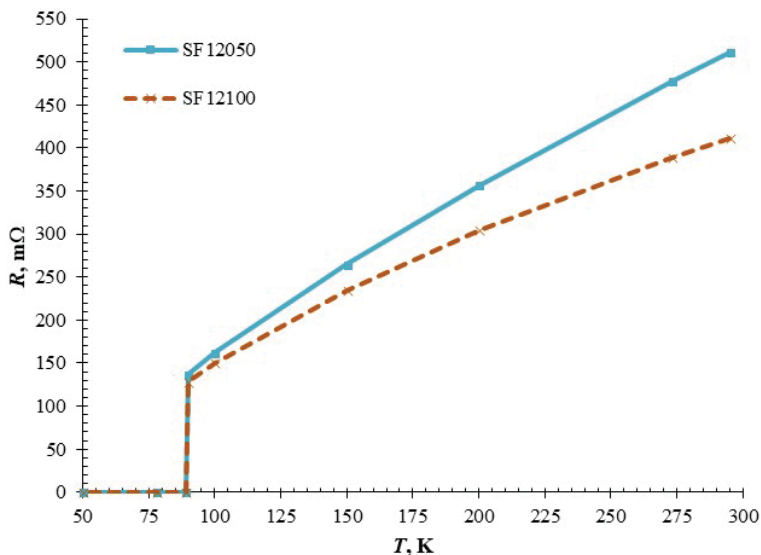
Rys. 2.4. Schemat zastępczy taśmy nadprzewodnikowej:
a) typu SF, b) typu SCS

Na podstawie rezystancji poszczególnych warstw wchodzących w skład taśmy nadprzewodnikowej drugiej generacji wyznaczone zostały rezystancje taśmy nadprzewodnikowej typu SF i SCS w funkcji temperatury (rys. 2.5 – rys. 2.8). Taśmy typu SF z podłożem o grubości 50 μm produkowane są w pięciu szerokościach: 2 mm (taśma SF2050), 3 mm (taśma SF3050), 4 mm (taśma SF4050), 6 mm (taśma SF6050) oraz 12 mm (taśma SF12050). Wraz ze wzrostem szerokości taśmy nadprzewodnikowej rośnie wartość prądu

krytycznego, maleje natomiast wartość rezystancji taśmy w stanie rezystywnym (rys. 2.5). Wzrost wartości rezystancji taśmy nadprzewodnikowej wraz ze wzrostem temperatury jest w głównej mierze wynikiem wzrostu rezystywności srebra wraz ze wzrostem temperatury, ponieważ rezystywność podłoża Hastelloy zmienia się w niewielkim zakresie.

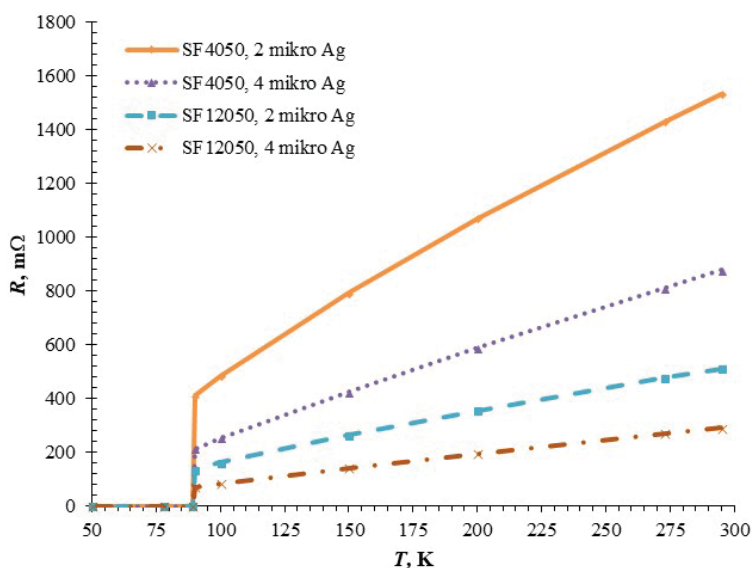


Rys. 2.5. Rezystancja taśm SF firmy SuperPower o długości 1 metra w funkcji temperatury (grubość warstwy srebra – 2 μm)



Rys. 2.6. Rezystancja taśm typu SF firmy SuperPower o długości 1 metra w funkcji temperatury w zależności od grubości podłoża Hastelloy 50 μm i 100 μm (grubość warstwy srebra – 2 μm)

Taśma nadprzewodnikowa o szerokości 12 mm produkowana w dwóch wariantach z podłożem Hastelloy o grubości 50 μm (taśma SF12050) i 100 μm (taśma SF12100). Taśmy różnią się zarówno pojemnością cieplną jak również wartością rezystancji w stanie rezystywnym (rys. 2.6). Wraz ze wzrostem temperatury rośnie rezystancja obu taśm nadprzewodnikowych, ale taśma z podłożem o grubości 50 μm ma większą wartość rezystancji. Taśma o większej pojemności cieplnej SF12100 umożliwia budowę ograniczników prądu zwarciowego o dłuższym czasie ograniczania prądu.

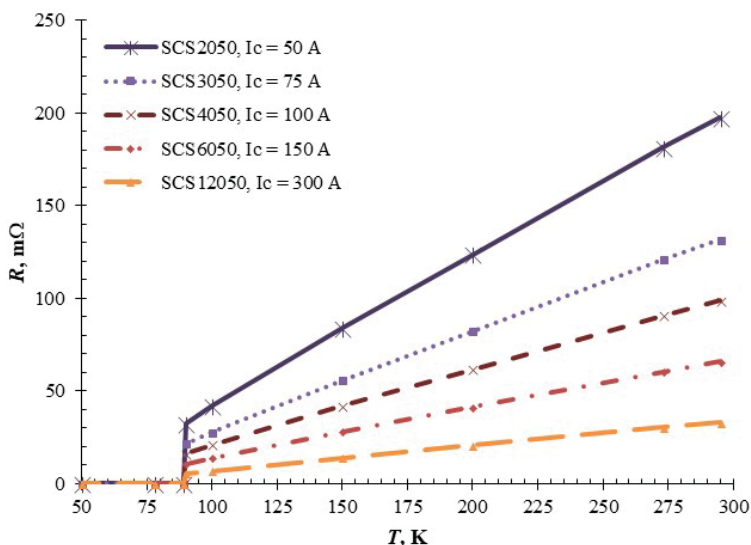


Rys. 2.7. Rezystancja taśm SF4050 i SF12050 firmy SuperPower w funkcji temperatury dla dwóch różnych grubości warstwy srebra 2 μm i 4 μm

Największy wpływ na rezystancję taśmy ma grubość warstwy srebra. Na rysunku 2.7 przedstawiono porównanie zmian rezystancji taśmy nadprzewodnikowej w funkcji temperatury w zależności od grubości warstwy srebra dla dwóch różnych szerokości taśmy nadprzewodnikowej 4 mm i 12 mm. Dwukrotny wzrost grubości warstwy srebra powoduje niemal dwukrotnie mniejszą wartość rezystancji taśmy nadprzewodnikowej w tej samej temperaturze.

Taśma nadprzewodnikowa ze stabilizatorem miedzanym (taśmy typu SCS firmy SuperPower) wytwarzane są w pięciu szerokościach od 2 mm do 12 mm. W taśmach tego typu grubość warstwy podłoża Hastelloy wynosi 50 μm . Na rysunku 2.8 przedstawiono zmiany rezystancji taśmy nadprzewodnikowej ze stabilizatorem miedzanym w funkcji temperatury. Podobnie jak dla taśm bez stabilizatora taśma o większej szerokości ma wyższą wartość prądu krytycznego oraz mniejszą wartość rezystancji w tej samej temperaturze. Taśmy typu

SCS ze stabilizatorem miedzianym mają znacznie mniejszą wartość rezystancji po wyjściu ze stanu nadprzewodzącego. W temperaturze 90 K po przejściu warstwy nadprzewodnika ReBCO do stanu rezystywnego taśma ze stabilizatorem miedzianym ma około 25-krotnie mniejszą wartość rezystancji od taśmy bez stabilizatora. Mniejsza wartość rezystancji w stanie rezystywnym powoduje mniej skuteczne ograniczenie prądu zwarciovego przez ogranicznik rezystancyjny lub indukcyjny wykonany z takiej taśmy.



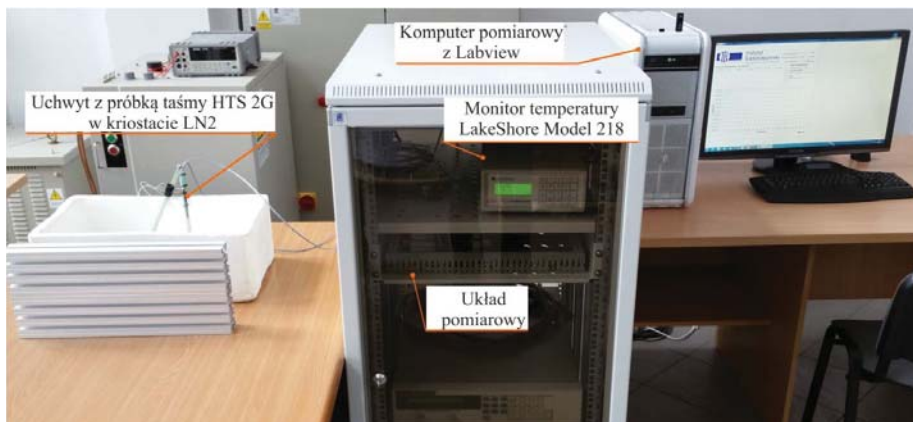
Rys. 2.8. Rezystancja taśm nadprzewodnikowych ze stabilizatorem miedzianym typu SCS firmy SuperPower w funkcji temperatury

2.2. Eksperymentalne wyznaczenie rezystancji taśm HTS 2G w funkcji temperatury

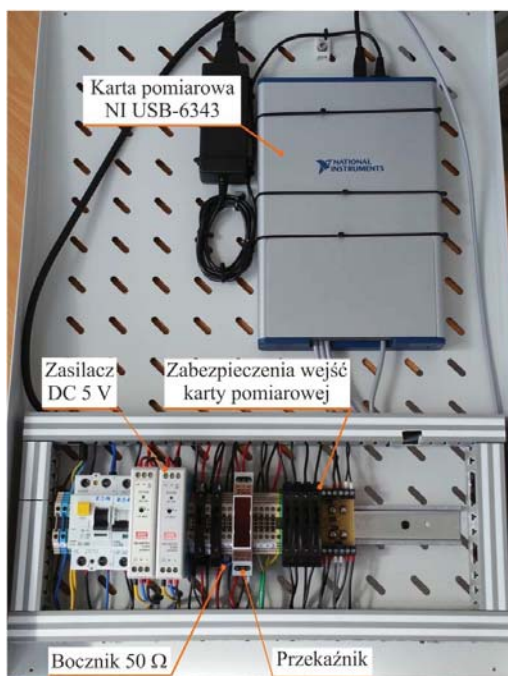
Podczas przepływu prądu zwarciovego przez ogranicznik taśma nadprzewodnikowa przechodzi ze stanu nadprzewodzącego do stanu rezystywnego, podczas którego następuje bardzo szybkie nagrzewanie się taśmy nadprzewodnikowej i wzrost jej rezystancji. Do prawidłowego modelowania nadprzewodnikowych ograniczników konieczne jest wyznaczenie rezystancji taśmy nadprzewodnikowej w zakresie temperatur od 77 K do 300 K.

Do przeprowadzania pomiarów i wyznaczenia charakterystyki $R = f(T)$ taśm HTS 2G został zaprojektowany i wykonany laboratoryjny układ pomiarowy przedstawiony na rysunku 2.9. Układ pomiarowy składa się z komputera pomiarowego z programem „RT IEL” napisanym w środowisku LabView, monitora temperatury LakeShore Model 218 wraz z czujnikiem temperatury LakeShore Cernox

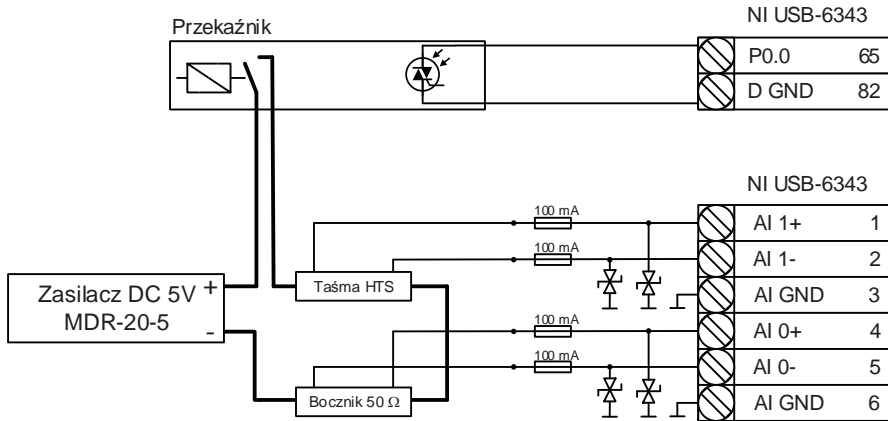
CX-1070-AA-4L-QL, karty pomiarowej NI USB-6343 (rys. 2.10), kriostat z ciekłym azotem i uchwytu z badaną próbką taśmy nadprzewodnikowej (rys. 2.12).



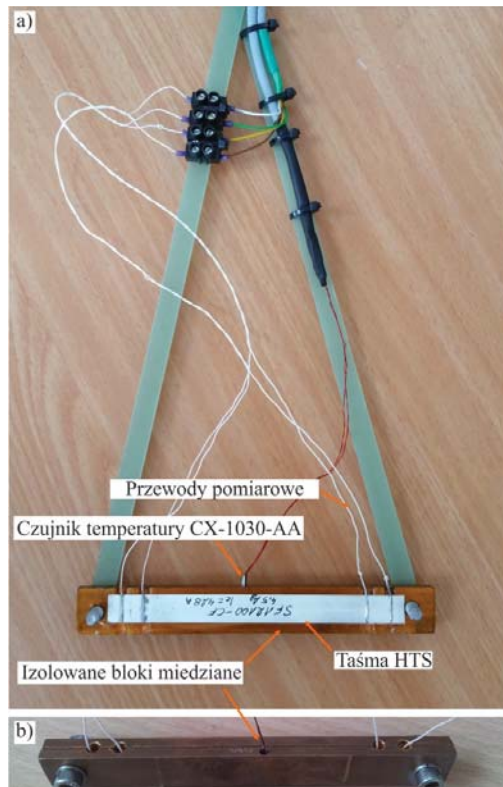
Rys. 2.9. Stanowisko do wyznaczania rezystancji taśmy HTS 2G w funkcji temperatury w zakresie temperatur od 77 K do 300 K



Rys. 2.10. Układ pomiarowy – obwód zasilania, pomiaru napięć i zabezpieczeń



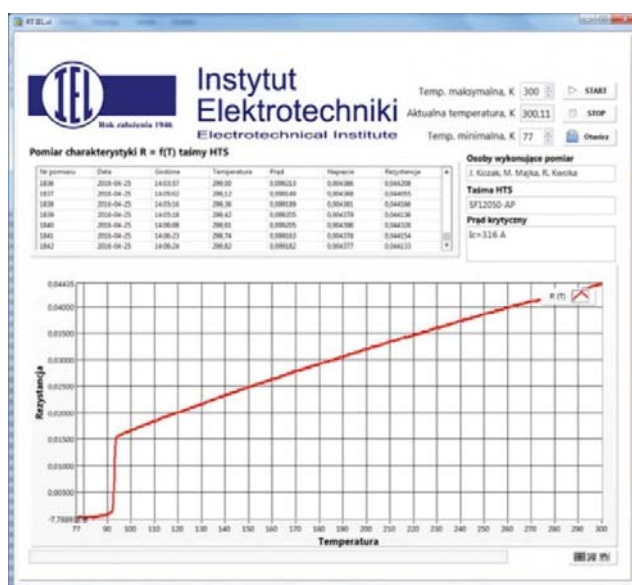
Rys. 2.11. Uproszczony schemat układu pomiarowego do wyznaczania zależności $R = f(T)$ taśm nadprzewodnikowych



Rys. 2.12. Próbką taśmy HTS w uchwycie pomiarowym:

a) uchwyt z próbką taśmy HTS 2G, b) próbka taśmy HTS 2G umieszczona pomiędzy blokami miedzianymi

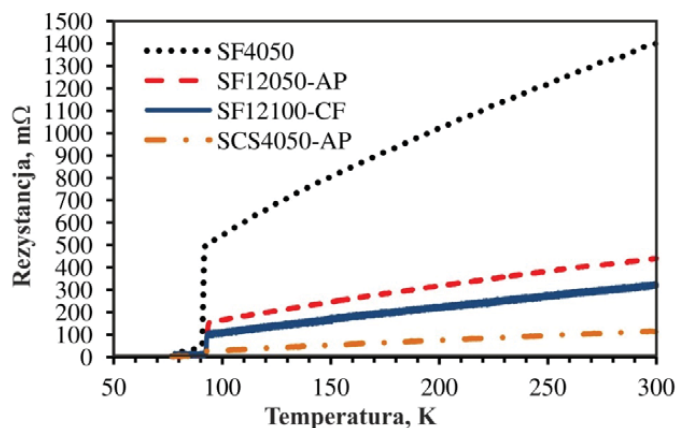
Układ pomiarowy wraz z oprogramowaniem „RT IEL” umożliwia automatyczne wyznaczenie charakterystyki $R = f(T)$ taśm nadprzewodnikowych. Uproszczony schemat układu pomiarowego przedstawiony został na rysunku 2.11. Komunikacja monitora temperatury LakeShore 218 z czujnikiem temperatury realizowana jest przez port GPIB. Do pomiaru prądu użyto bocznika o rezystancji 50Ω . Pomiar rezystancji taśmy nadprzewodnikowej wykonywany jest w czasie 50 ms prądem pomiarowym 100 mA. Krótki czas pomiaru rezystancji oraz prąd pomiarowy o niewielkiej wartości został dobrany eksperymentalnie, dobór tych parametrów zapewnia dokładny pomiar rezystancji taśmy, a przepływ prądu pomiarowego nie podgrzewa badanej próbki.



Rys. 2.13. Program „RT IEL” do automatycznego wyznaczenia zależności $R = f(T)$ dla taśm nadprzewodnikowych

Pomiar rezystancji próbki taśmy nadprzewodnikowej wykonywany jest metodą czteroprzewodową. Do próbki taśmy nadprzewodnikowej przylutowane są dwa przewody prądowe i dwa przewody napięciowe rozstawione w odległości 100 mm od siebie (rys. 2.12). Przewody pomiarowe przylutowane zostały do próbek taśmy nadprzewodnikowej lutownicą na gorące powietrze stopem Sn62Pb36Ag2 w temperaturze 210°C . Taśma nadprzewodnikowa umieszczona jest pomiędzy dwoma izolowanymi miedzianymi płaskownikami, których zadaniem jest wyrównanie temperatury charakterystyki $R = f(T)$ taśmy nadprzewodnikowej podczas przeprowadzania pomiaru rezystancji. Płaskowniki miedziane izolowane są taśmą poliimidową o grubości $50 \mu\text{m}$. Pomiar temperatury odbywa się czujnikiem LakeShore Cernox umieszczonym w otworze wykonanym w jednym z płaskowników miedzianych. Próbka

taśmy wraz z płaskownikami miedzianymi schładzana jest do temperatury 77 K w kriostacie z ciekłym azotem, a następnie powoli ogrzewana do temperatury pokojowej. Podczas ogrzewania próbki mierzona jest rezystancja próbki z jednoczesnym odczytem temperatury z czujnika LakeShore. Wyniki pomiarów dla taśm SF4050 (2 μm srebra), SCS4050 (2 μm srebra), SF12050 (2 μm srebra, 50 μm Hastelloy) i SF12100 (4,5 μm srebra, 100 μm Hastelloy) przedstawia rysunek 2.14.



Rys. 2.14. Eksperymentalnie wyznaczone zależności rezystancji taśm HTS 2G w funkcji temperatury (długość taśmy: 100 cm)

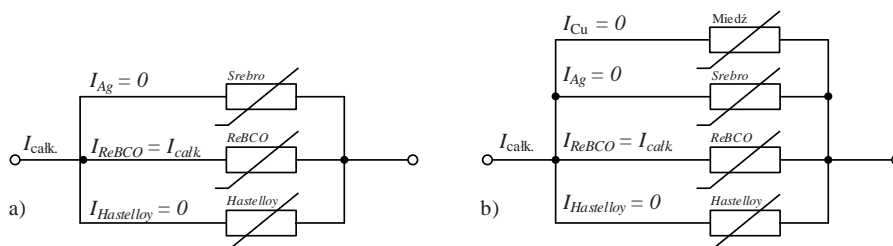
Rezystancja taśmy zmierzona w temperaturze 77 K jest bliska zeru. Na wykresach widoczne jest charakterystyczne przejście nadprzewodnika ze stanu nadprzewodzącego do stanu rezystywnego po ogrzaniu próbki powyżej temperatury krytycznej T_c .

Taśma SF12100 ma około dwukrotnie mniejszą rezystancję od taśmy SF12050 po przekroczeniu temperatury krytycznej T_c , wynika to z ponad dwukrotnie grubszej warstwy srebra. Taśma SF12100 ma również dwukrotnie większą pojemność cieplną, ponieważ ma dwukrotnie grubszą warstwę podłoża Hastelloy w porównaniu do taśmy SF12050. W modelach numerycznych nadprzewodnikowych ograniczników prądu uwzględnia się zarówno charakterystykę $R = f(T)$ taśmy nadprzewodnikowej, która ma wpływ na skuteczność ograniczania prądu zwarciovego przez ogranicznik, jak i pojemność cieplną taśmy nadprzewodnikowej, która wpływa na szybkość nagrzewania się uzwojeń nadprzewodnikowych podczas przepływu prądu zwarciovego. Zależność $R = f(T)$ dla taśm nadprzewodnikowych oraz obliczona pojemność cieplna taśm umożliwiają obliczenie temperatury uzwojeń ogranicznika podczas ograniczania prądu zwarciovego.

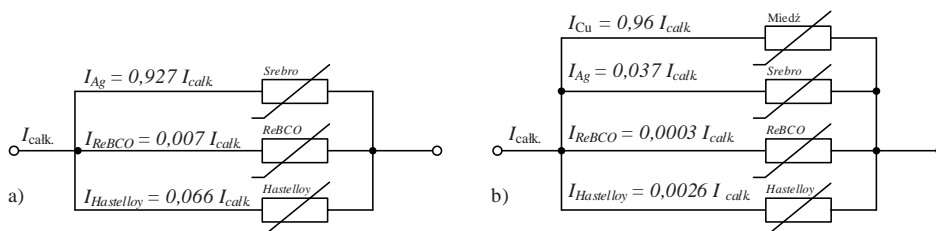
Badania zależności $R = f(T)$ przeprowadzone w Pracowni Technologii Nadprzewodnikowych IEL dla innych rodzajów taśm nadprzewodnikowych można znaleźć w artykułach [37], [41].

2.3. Prąd w warstwach taśm HTS 2G firmy SuperPower

Jeżeli przez taśmę nadprzewodnikową przepływa prąd o wartości mniejszej od krytycznej I_c oraz temperatura taśmy nadprzewodnikowej jest niższa od temperatury krytycznej T_c nadprzewodnika ReBCO prąd płynie w całości przez warstwę nadprzewodnika o zerowej rezystancji. Rozpływ prądu dla tego przypadku obrazują schematy z rysunku 2.15.

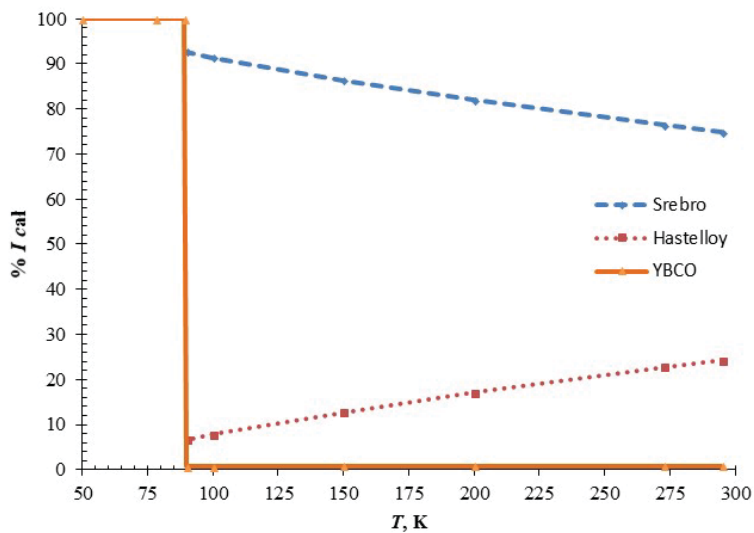


Rys. 2.15. Rozpływ prądu w taśmie HTS 2G w stanie nadprzewodzącym w temperaturze 77 K: a) taśma typu SF, b) taśma typu SCS

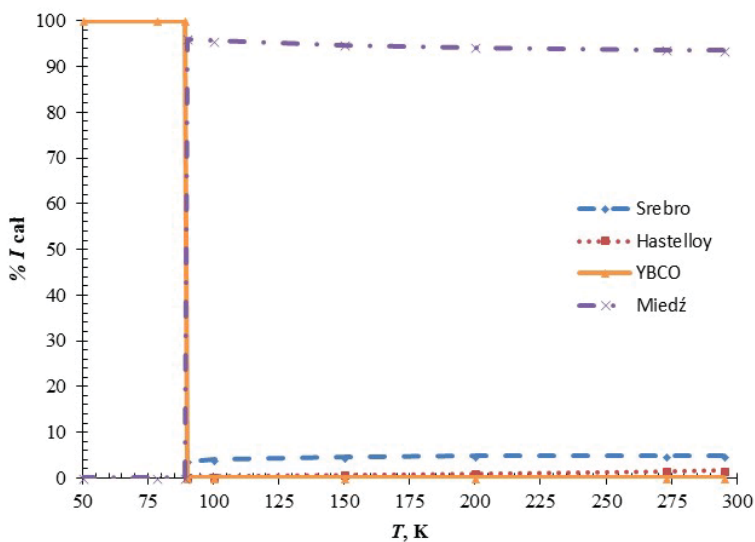


Rys. 2.16. Rozpływ prądu w taśmie HTS 2G w stanie rezystywnym w temperaturze 90 K: a) taśma typu SF, b) taśm typu SCS

Po przejściu warstwy nadprzewodnika do stanu rezystywnego rozpływ prądu w poszczególnych warstwach taśmy HTS 2G zmienia się i zależy od budowy wewnętrznej taśmy nadprzewodnikowej. Procentowy rozpływ prądu w warstwach taśmy nadprzewodnikowej w funkcji temperatury dla taśmy typu SF przedstawiono na rysunku 2.16a, a dla taśmy SCS ze stabilizatorem miedzianym na rysunku 2.16b. W przypadku taśmy nadprzewodnikowej typu SF bez stabilizatora miedzianego w temperaturze 90 K, gdy nadprzewodnik jest w stanie nienadprzewodzącym, 92% prądu płynie przez warstwę srebra, 7% przez podłoże Hastelloy, tylko ułamek procenta przez nadprzewodnik ReBCO. Z kolei dla taśmy nadprzewodnikowej ze stabilizatorem miedzianym w temperaturze 90 K, 96% prądu płynie przez warstwy stabilizatora miedzianego, a jedynie 3,7% prądu płynie przez warstwę srebra, ułamek procenta przez warstwę podłoża i warstwę nadprzewodnika.



Rys. 2.17. Procentowy rozpływ prądu w warstwach taśmy typu SF w funkcji temperatury



Rys. 2.18. Procentowy rozpływ prądu w warstwach taśmy typu SCS w funkcji temperatury

Rozpływ prądu w poszczególnych warstwach taśmy nadprzewodnikowej typu SF zmienia się w funkcji temperatury (rys. 2.17). Wraz ze wzrostem temperatury rośnie wartość prądu w warstwie podłoża Hastelloy, maleje natomiast prąd w warstwie srebra. Zmiana rozpływu prądu w taśmie typu SF jest wynikiem wzrostu rezystywności srebra w funkcji temperatury przy stałej wartości rezystywności stopu Hastelloy w tym zakresie temperatur.

W przypadku taśmy nadprzewodnikowej typu SCS ze stabilizatorem miedzianym, rozpływ prądu w poszczególnych warstwach taśmy nadprzewodnikowej wraz ze wzrostem temperatury zmienia się w niewielkim zakresie (rys. 2.18).

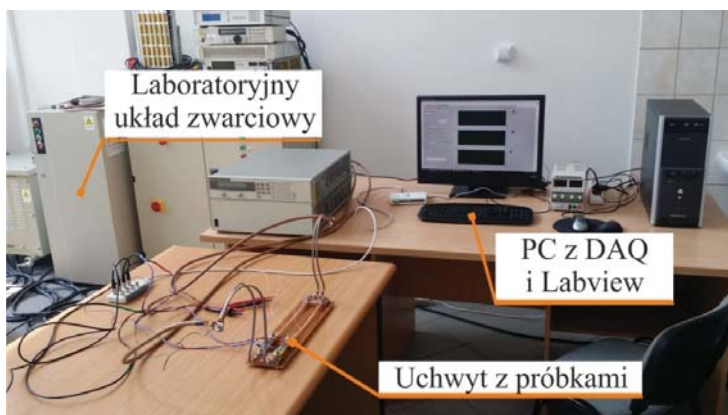
2.4. Badania eksperymentalne taśm HTS 2G w stanach przejściowych

Taśma nadprzewodnikowa dla nadprzewodnikowych ograniczników prądu powinna charakteryzować się dużą wartością prądu krytycznego w stosunku do jej szerokości oraz dużą rezystywnością w stanie rezystywnym. Ponadto przewód nadprzewodnikowy powinien mieć możliwie jednakowe parametry elektryczne na całej długości, tj. stałą wartość prądu krytycznego i rezystancję w stanie rezystywnym. Minimalny prąd krytyczny komercyjnie dostępnych taśm nadprzewodnikowych wynosi około 300 A dla taśmy o szerokości 12 mm w temperaturze 77 K, dlatego nadprzewodnikowe ograniczniki prądów zwarciovych o większych prądach znamionowych wymagają równoległego łączenia taśm nadprzewodnikowych.

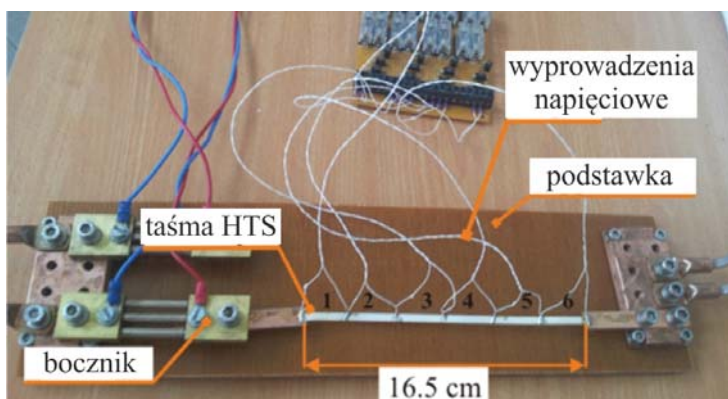
W podrozdziale przedstawiono wyniki badań, których celem było eksperymentalne wyznaczenie różnic w procesie quenchu dla taśmy ze stabilizatorem i bez stabilizatora miedzianego oraz rozpływu prądu w równoległe połączonych taśmach HTS.

Badania eksperymentalne zostały przeprowadzone na kilkudziesięciu próbkach taśmy nadprzewodnikowej drugiej generacji z miedzianym stabilizatorem i bez stabilizatora. W rozdziale przedstawiono najważniejsze wyniki przeprowadzonych badań eksperymentalnych. Testy eksperymentalne zostały przeprowadzone dla pojedynczej taśmy i dla dwóch taśm nadprzewodnikowych połączonych równoległe. Do testów zostały użyte taśmy nadprzewodnikowe typu SF i SCS firmy SuperPower.

Układ pomiarowy (rys. 2.19) składa się z trzech głównych elementów: uchwytu z badanymi taśmami nadprzewodnikowymi, systemu zasilania oraz systemu pomiarowego i akwizycji danych pomiarowych. Układ pomiarowy sterowany jest z komputera pomiarowego wyposażonego w kartę pomiarową i oprogramowanie LabView.



Rys. 2.19. Układ pomiarowy do badania taśm nadprzewodnikowych w stanach przejściowych

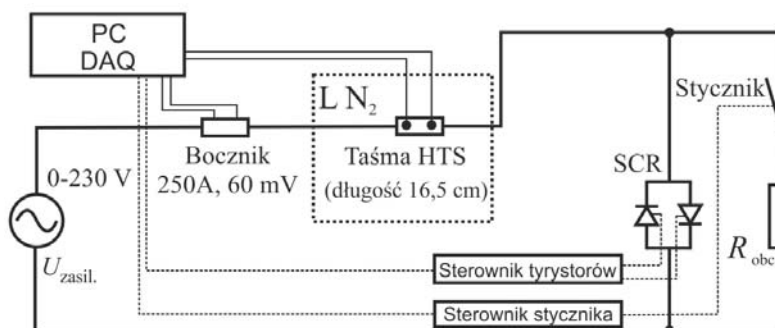


Rys. 2.20. Uchwyt taśm HTS 2G do badań eksperymentalnych taśm w stanach przejściowych

2.4.1. Badania pojedynczej taśmy HTS 2G w stanach przejściowych

Uchwyt do przeprowadzania badań taśmy nadprzewodnikowej w stanach przejściowych przedstawia rysunek 2.20. Do taśmy nadprzewodnikowej o długości 16,5 cm zostały przyłutowane miedziane końcówki oraz siedem wyprowadzeń napięciowych przyłutowanych do taśmy nadprzewodnikowej w odległościach co 2,5 cm. Pomiary napięcia zostały wykonane na każdym segmencie taśmy nadprzewodnikowej. Poszczególne odcinki wraz z numeracją zostały przedstawione na rysunku 2.20. Taśma nadprzewodnikowa z miedzianymi końcówkami została zamontowana do uchwytu pomiarowego. Wyprowadzenia

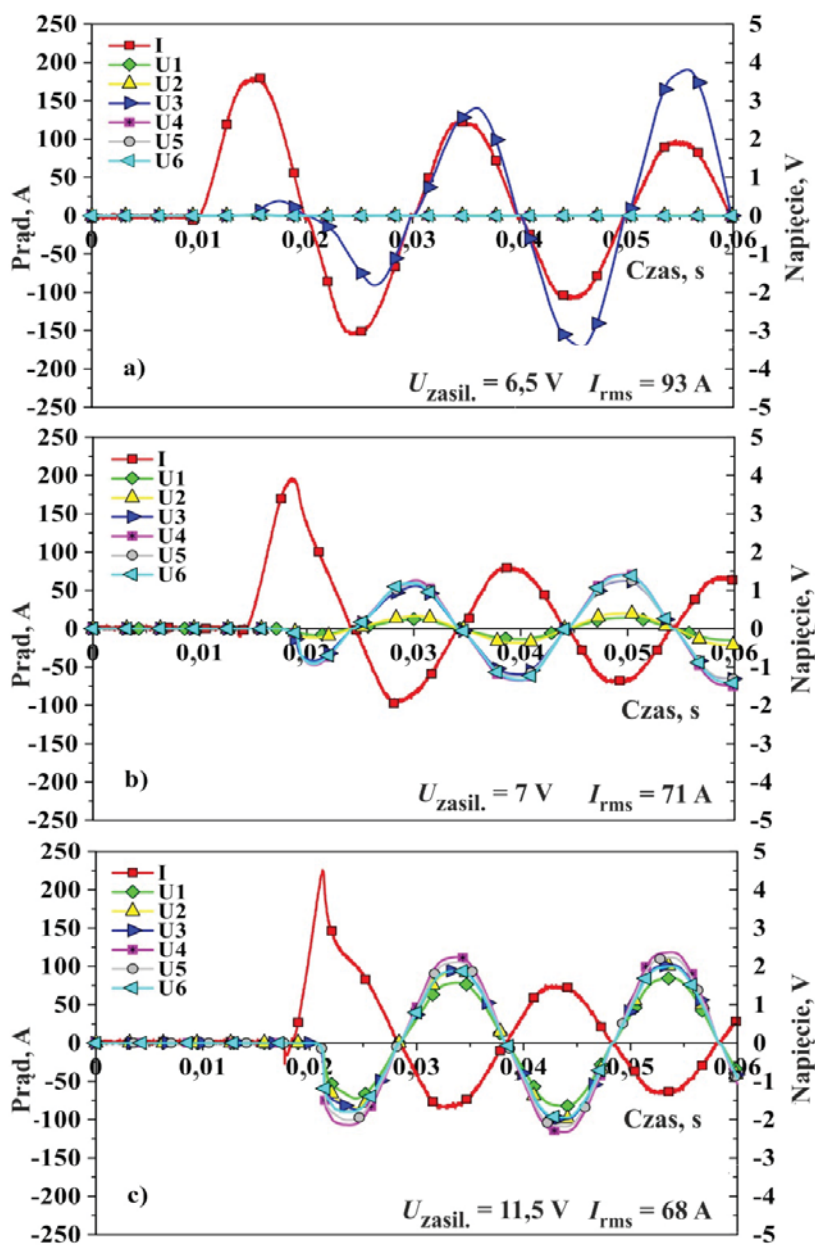
napięciowe zostały podłączone do karty pomiarowej komputera pomiarowego. Do pomiaru prądu w obwodzie został użyty bocznik 250 A 60 mV (rys. 2.21). Pomiarzy zostały przeprowadzone po schłodzeniu taśmy nadprzewodnikowej w kriostacie z ciekłym azotem pod ciśnieniem atmosferycznym. Testy zostały przeprowadzone dla różnych wartości prądu przepływającego przez taśmę nadprzewodnikową. Prąd płynący przez taśmę nadprzewodnikową miał wartość kilkukrotnie przekraczającą prąd krytyczny taśmy nadprzewodnikowej.



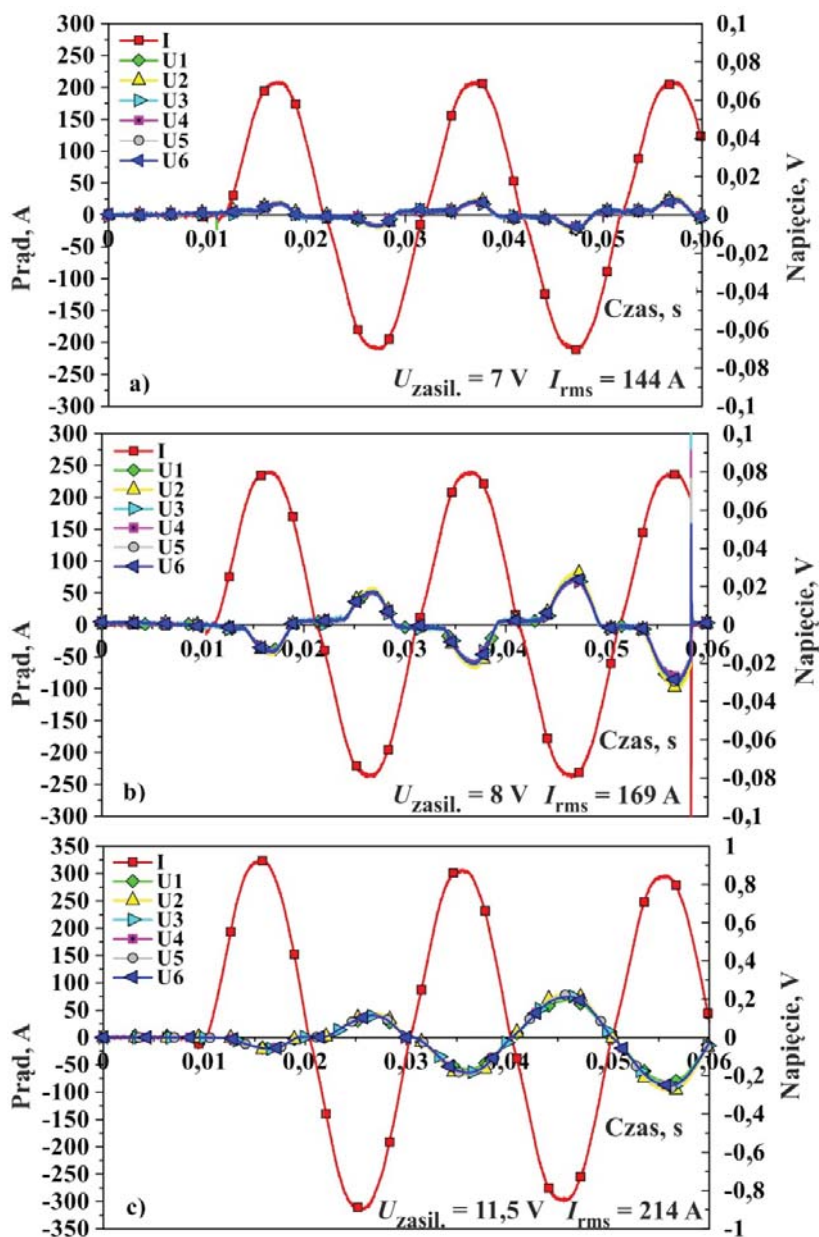
Rys. 2.21. Uproszczony schemat układu do badań eksperymentalnych taśmy HTS w stanach przejściowych

Przebiegi prądu dla trzech wybranych napięć zasilania $U_{zasil.}$ 6,5 V, 7 V i 11,5 V przedstawiono na rysunku 2.22. W przypadku taśmy SF4050 bez stabilizatora niektóre odcinki taśmy nadprzewodnikowej przechodzą do stanu rezystywnego wcześniej niż inne. Przejście ze stanu nadprzewodzenia do stanu rezystywnego (ang. quench) dla tego rodzaju taśmy nie jest jednocześnie na całej długości taśmy. Szczególnie niebezpieczny jest przypadek, gdy szczytowa wartość prądu w pierwszym okresie jest mniejsza od 200 A i quench następuje tylko w jednym segmencie taśmy – odcinek 3, napięcie U_3 (rys. 2.22a). W tym przypadku taśma nadprzewodnikowa silnie nagrzewa się lokalnie na niewielkim odcinku i może ulec termicznemu zniszczeniu. Dla wyższych wartości prądu quench jest bardziej jednorodny. Jeżeli natężenie pola elektrycznego przekracza 46 V/m dla taśmy SF4050 i 2 V/m dla taśmy SCS4050 wszystkie odcinki taśmy nadprzewodnikowej przechodzą do stanu rezystywnego i nagrzewają się równomiernie (rys. 2.22c).

Testy dla taśmy SCS4050 ze stabilizatorem miedzianym przedstawiono na rysunku 2.23. Dla wzrastających wartości prądu (rys. 2.23a – rys. 2.23c) na poszczególnych segmentach taśmy nadprzewodnikowej zarejestrowano jednakowe przebiegi napięcia, a zatem taśma ta równomiernie przechodzi do stanu rezystywnego i równomiernie nagrzewa się na całej długości.



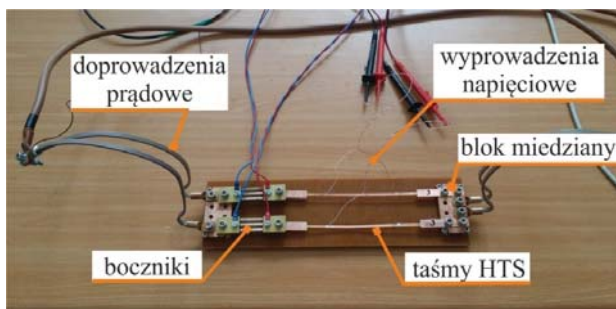
Rys. 2.22. Przebiegi prądu i napięcie na poszczególnych odcinkach taśmy SF4050 bez stabilizatora miedzianego



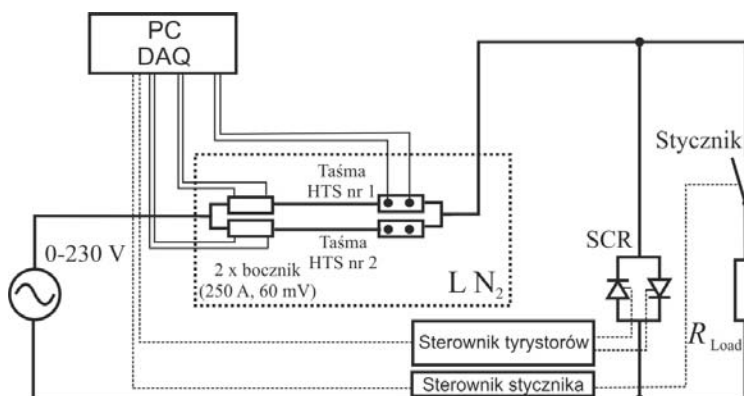
Rys. 2.23. Przebiegi prądu i napięć na poszczególnych odcinkach taśmy SCS ze stabilizatorem miedzianym

2.4.2. Badania równoległe połączonych taśm HTS 2G w stanach przejściowych

Do testów dwóch równoległe połączonych taśm nadprzewodnikowych wykonano uchwyt przedstawiony na rysunku 2.24. Składa się on z podstawy, do której przykręcono dwa miedziane bloki. Do testów użyto dwóch odcinków taśmy HTS o długości 16,5 cm. Do końców taśmy HTS przylutowano miedziane końcówki, które z kolei zostały przykręcone śrubami do boczników z jednej strony i do miedzianych bloków z drugiej strony. Do testowanych taśm HTS przylutowano dwa wyprowadzenia napięciowe w odległości 10 cm pomiędzy nimi. Do pomiaru prądu płynącego w poszczególnych taśmach nadprzewodnikowych wykorzystano dwa boczники 250 A 60 mV. Przed testami oba boczники zostały skalibrowane w ciekłym azocie. Zmierzona rezystancja boczników w temperaturze ciekłego azotu wynosiła odpowiednio $222 \mu\Omega$ i $223 \mu\Omega$. Uproszczony schemat układu pomiarowego do badania równoległego połączenia taśm HTS 2G przedstawiono na rysunku 2.25.

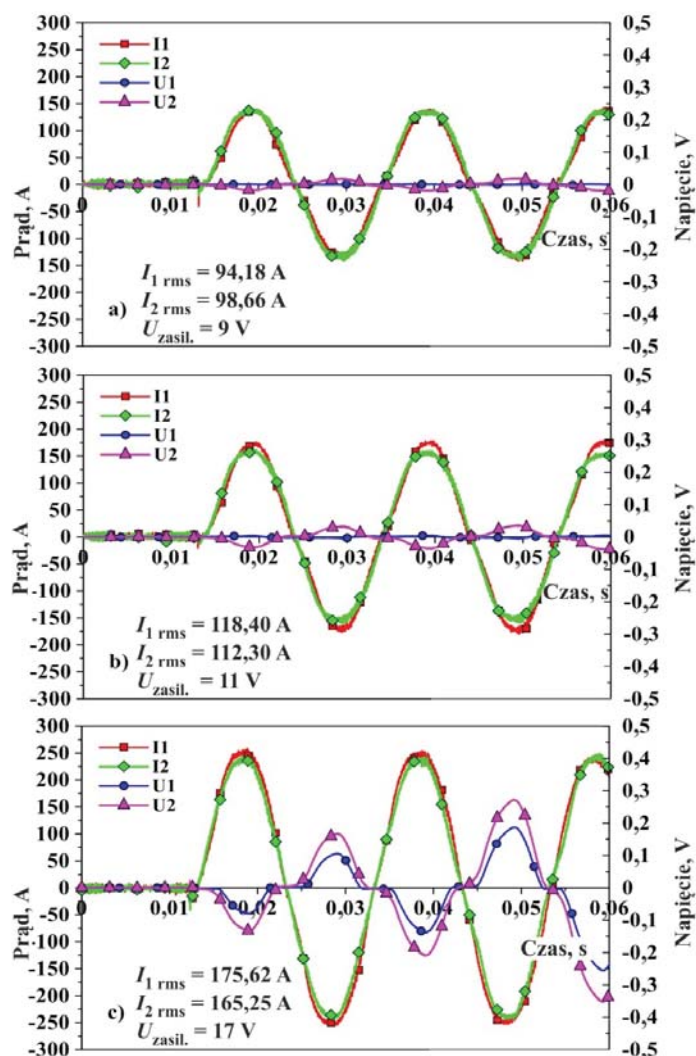


Rys. 2.24. Uchwyt do badań eksperymentalnych równoległe połączonych taśm nadprzewodnikowych drugiej generacji

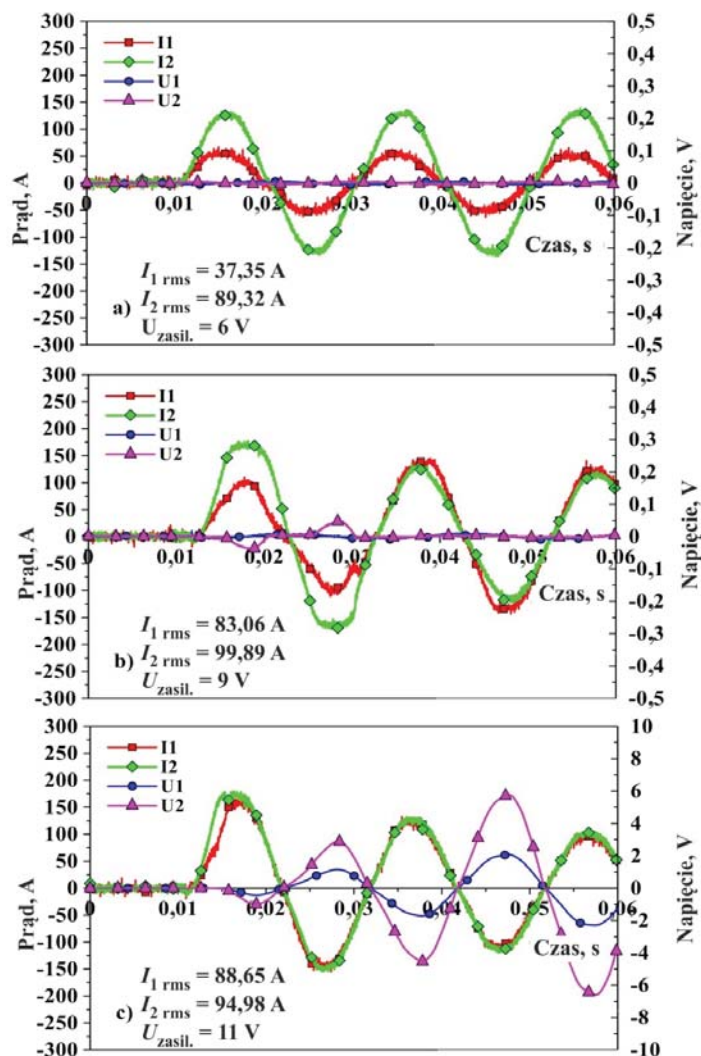


Rys. 2.25. Uproszczony schemat układu pomiarowego do badania równoległego połączenia taśm HTS 2G w stanach przejściowych

Podczas przygotowywania próbek taśmy HTS zastosowano tę samą metodę lutowania, zastosowano przewody miedziane o tej samej długości i ten sam moment dokręcający śrub. Uchwyt podczas testów był chłodzony w kąpeli ciekłego azotu. Testy przeprowadzono dla różnych wartości napięcia zasilającego oraz prądów płynących przez taśmę nadprzewodnikową. Z przeprowadzonych badań dla kilkudziesięciu próbek taśmy nadprzewodnikowej ze stabilizatorem miedzianym wynika, że rozpył prądów w równoległe połączonych taśmach SCS4050 jest równomierny (rys. 2.26).



Rys. 2.26. Przebiegi prądów i napięć dla dwóch równoległe połączonych taśm SCS4050 ze stabilizatorem miedzianym

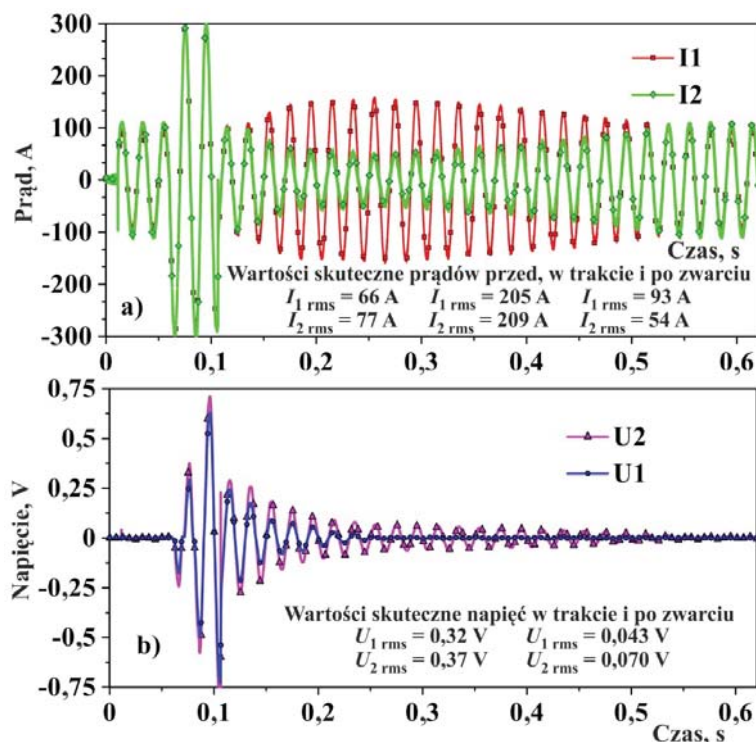


Rys. 2.27. Przebiegi prądów i napięć dla dwóch równolegle połączonych taśm SF4050 bez stabilizatora miedzianego

W przypadku dwóch równolegle połączonych taśm SF4050 bez stabilizatora miedzianego dla wszystkich badanych próbek zarejestrowany podział prądu pomiędzy taśmami był nierównomierny (rys. 2.27). Jeżeli prąd płynący przez taśmę nr 2 jest niewiele większy od prądu krytycznego (rys. 2.27a), to przez taśmę nr 1 płynie blisko 3 krotnie mniejszy prąd niż przez taśmę nr 2. Nierównomierny rozplływ prądów pomiędzy taśmami mógł być spowodowany różnicami w rezystancji połączeń skręcanych lub połączeń lutowanych

taśm nadprzewodnikowych. Dla większych wartości prądu (rys. 2.27b) taśma HTS nr 2 przechodzi do stanu rezystywnego wcześniej niż taśma nr 1. Dla prądów dwukrotnie większych od prądu krytycznego I_c rozptyw prądów wyrównuje się (rys. 2.27c), a rejestrowane napięcie na odcinku taśmy nr 2 jest kilkukrotnie większe niż na odcinku taśmy nr 1 o tej samej długości (rys. 2.24).

W stanie reaktywacji z przepływem prądu obciążenia (rys. 2.28) możemy zaobserwować zmianę rozptywu prądu pomiędzy dwoma równoległo połączonymi taśmami SCS4050. Taśma nadprzewodnikowa przy przepływie prądu 70 A wychładza się i wraca do stanu nadprzewodzenia po około 0,5 s.



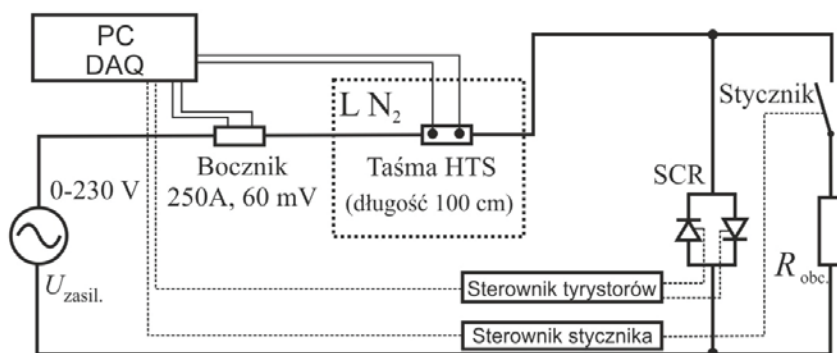
Rys. 2.28. Stan reaktywacji taśmy nadprzewodnikowej SCS4050 o długości 1 metra z przepływem prądu obciążenia

Głównym celem przeprowadzonych badań eksperymentalnych taśm nadprzewodnikowych było badanie taśm nadprzewodnikowych w stanie przejściowym oraz zbadanie rozptywu prądu pomiędzy dwoma taśmami nadprzewodnikowymi połączonymi równoległo. Przeprowadzono kilkadziesiąt testów dla taśm nadprzewodnikowych drugiej generacji ze stabilizatorem miedziowym i bez stabili-

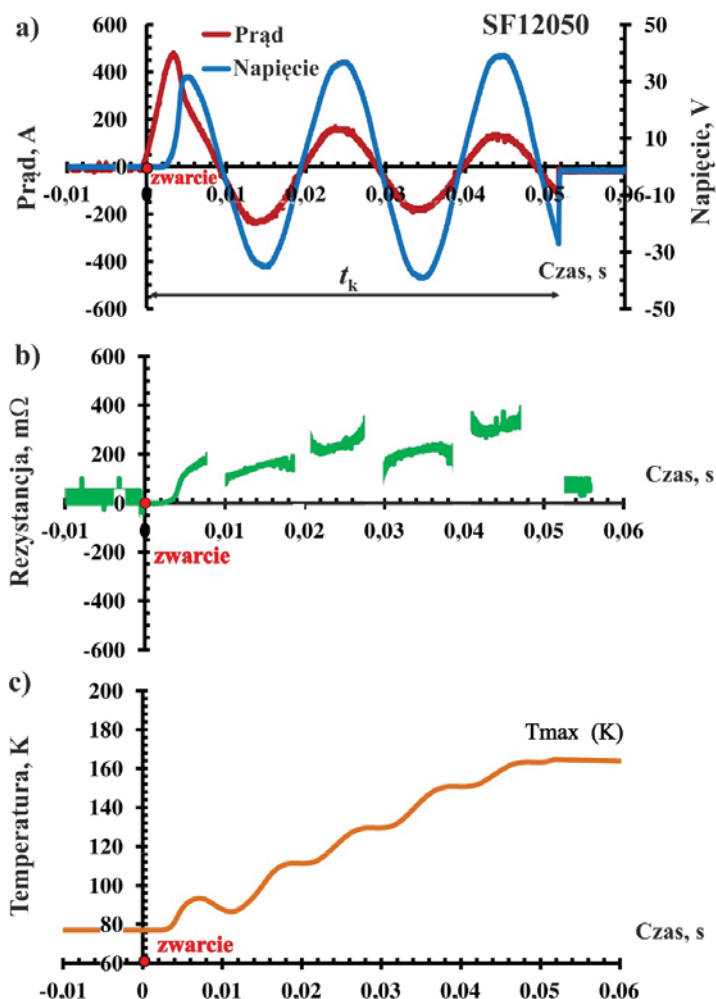
zatora. Podczas badań eksperymentalnych zarejestrowano różnice w rozplywie prądów równolegle połączonych taśm wynikające z różnicy prądu krytycznego taśmy nadprzewodnikowej i rezystancji połączeń miedzianych do których zamontowano taśmę. Zarówno quench dla pojedynczej taśmy SCS4050, jak i podział prądów dla taśm ze stabilizatorem miedzianym połączonych równolegle jest bardziej jednorodny niż dla taśm bez stabilizatora.

2.5. Dobór taśm nadprzewodnikowych do nadprzewodnikowych ograniczników prądu

Obliczenia dopuszczalnych parametrów dla taśm nadprzewodnikowych zostały przeprowadzone w modelach numerycznych dla taśm firmy SuperPower ze stabilizatorem miedzianym oraz dla taśmy bez stabilizatora. Badania eksperymentalne zostały przeprowadzone w laboratoryjnym układzie pomiarowym, którego schemat zamieszczono na rysunku 2.29. Układ pomiarowy składał się z taśmy nadprzewodnikowej o długości 1 metra, systemu zasilania oraz układu pomiaru napięć. Układ pomiarowy umożliwiał zmianę napięcia zasilającego $U_{zasil.}$ oraz automatyczne włączenie i wyłączenie prądu zwarciego w zadanym czasie. Układ zasilający był kontrolowany z komputera pomiarowego wyposażonego w kartę pomiarową i oprogramowanie LabView, układ został też wyposażony w układ detekcji przejścia napięcia zasilającego przez zero oraz układ regulacji czasu trwania zwarcia. Testy zostały przeprowadzone dla różnych wartości napięć zasilających i prądów zwarciovych płynących w badanym układzie.



Rys. 2.29. Schemat laboratoryjnego układu pomiarowego do badania taśmy nadprzewodnikowej w stanach przejściowych



Rys. 2.30. Przebiegi prądu i napięcia, zmiany rezystancji i temperatury dla taśmy typu SF12050 bez stabilizatora miedzanego

Typowe przebiegi prądu, napięcia, zmian rezystancji i temperatury dla testowanej taśmy nadprzewodnikowej SF12050 o długości 1 metra przedstawiono na rysunku 2.30. Jeżeli prąd zwarciový płynący przez taśmę nadprzewodnikową przekroczy prąd krytyczny I_c następuje bardzo szybki wzrost jej rezystancji (rys. 2.30b) i temperatury (rys. 2.30c). Już po pierwszych 2 milisekundach od chwili powstania zwarcia średnia temperatura taśmy nadprze-

wodnikowej przekracza temperaturę krytyczną nadprzewodnika powodując, że cały prąd zwarciový płynie przez warstwę stabilizatora i podłoża, ułożone równolegle do warstwy nadprzewodnika ReBCO, powodując ich silne nagrzewanie (rys. 2.30d). Wzrost temperatury taśmy następuje aż do momentu wyłączenia prądu zwarciový. W czasie przepływu prądu zwarciový, następuje nagrzewanie adiabatyczne przewodu nadprzewodnikowego, ponieważ przepływ ciepła do cieczy chłodzącej jest niewielki. W chwili wyłączenia zwarcia taśma nadprzewodnikowa osiąga temperaturę maksymalną T_{\max} . Temperatura maksymalna wzrasta wraz ze wzrostem napięcia zasilającego. W zależności od rodzaju taśmy, jej rezystancji i pojemności cieplnej taśma nadprzewodnikowa przy tej samej wartości napięcia nagrzewa się w różny sposób.

Moc cieplna generowana w przewodzie podczas zwarcia jest pochłaniana przez przewód nadprzewodnikowy, co powoduje wzrost jego temperatury (rys. 2.30c). Zależność ta opisana jest przez równanie bilansu energetycznego:

$$P_e(t) = slc_p(T) \frac{dT}{dt} + P_c(T) \quad (1)$$

gdzie P_e – chwilowa wartość mocy elektrycznej, P_c – moc odprowadzana do cieczy chłodzącej, s – pole przekroju poprzecznego taśmy nadprzewodnikowej, l – długość taśmy nadprzewodnikowej, c_p – średnia wartość ciepła właściwego, T – temperatura taśmy nadprzewodnikowej.

Wyznaczony z równania (1) iloraz:

$$\frac{U}{l} = \sqrt{\frac{1}{t_k} \int_{T_p}^{T_{\max}} c_p(T) \rho(T) dT} \quad (2)$$

określa skuteczną wartość napięcia, które po przyłożeniu do taśmy nadprzewodnikowej o długości l powoduje jej nagrzewanie od temperatury początkowej T_p do temperatury maksymalnej, w czasie trwania zwarcia t_k , c_p i ρ są odpowiednio średnią wartością ciepła właściwego oraz średnią wartością rezystywności dla taśmy nadprzewodnikowej.

Dopuszczalny graniczny stosunek napięcia na jednostkę długości taśmy nadprzewodnikowej U/l (równanie 2) zależy od wartości ciepła właściwego i rezystywności materiałów wchodzących w skład taśmy nadprzewodnikowej oraz czasu trwania zwarcia t_k .

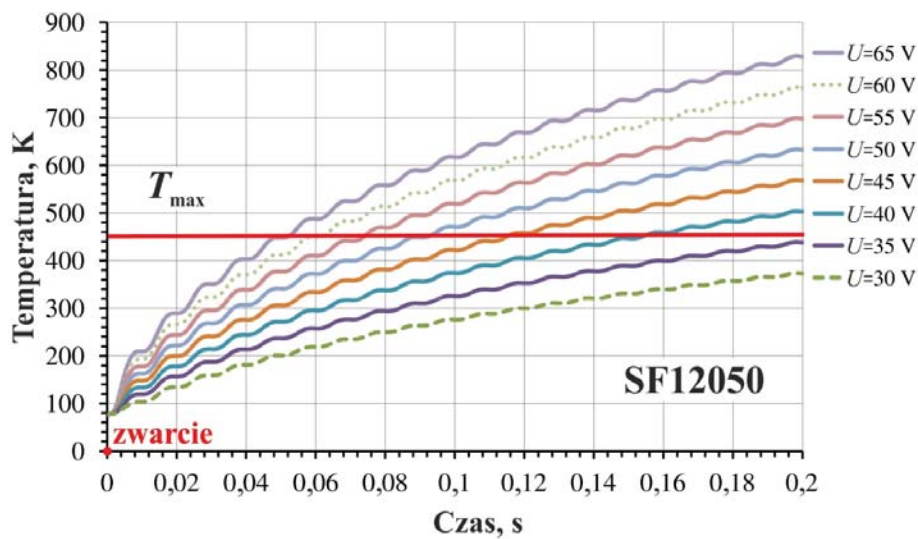
Duże wartości napięcia przypadające na jednostkę długości U/l mogą być stosowane w taśmach z podłożem i stabilizatorem o dużej rezystywności

lub przy skróceniu czasu trwania zwarcia t_k . Korzystna jest również duża wartość temperatury maksymalnej T_{\max} , która jest jednak ograniczona przez degradację przewodu w podwyższonych temperaturach. Przyjmuje się, że dla taśm HTS 2G produkowanych przez firmę SuperPower temperatura maksymalna T_{\max} nie powinna przekroczyć 400 – 450 K w zależności od temperatury topnienia lutu użytego do łączenia taśm.

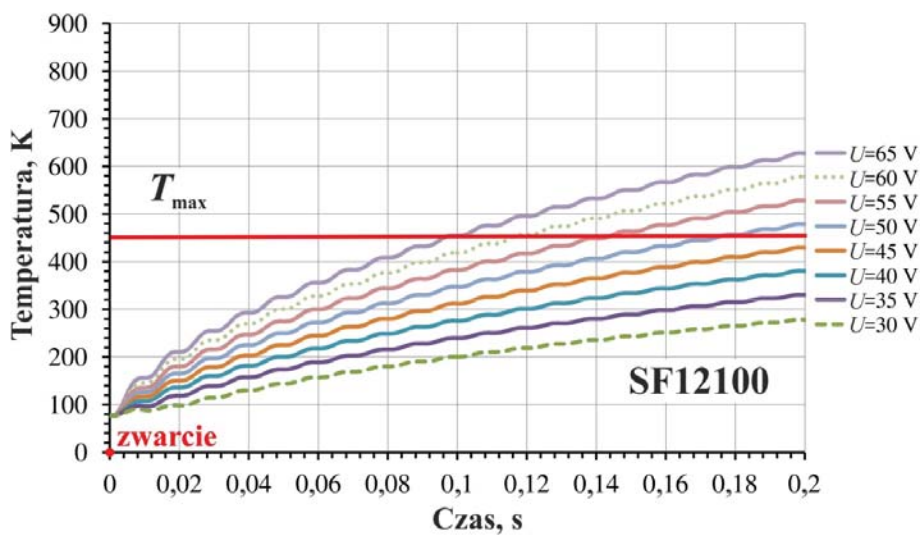
Układ eksperymentalny z rysunku 2.29 został odwzorowany w modelu numerycznym opracowanym w programie Cedrat Flux. Zależności rezystancji taśm HTS od prądu i temperatury zdefiniowane zostały w wieloparametrowej procedurze *Physical Parameter*. Obliczenia elektromagnetyczne prowadzone były w obwodowym module *Transient Magnetic*. Dodatkowo, w każdym kroku obliczeniowym obliczana jest średnia temperatura taśmy HTS i zmieniana rezystancja tej taśmy w obwodzie w zależności od prądu i temperatury. W modelu uwzględniono przepływ ciepła do ciekłego azotu, zmiany ciepła właściwego oraz rezystywności materiałów w funkcji temperatury. Opracowane zostały cztery modele numeryczne dla taśm: SF12050, SF12100, SF4050 i SCS4050.

W modelu numerycznym uzyskano zmiany temperatury poszczególnych taśm nadprzewodnikowych dla różnych wartości skutecznych napięcia zasilającego (rys. 2.31 – 2.34). Charakterystyki przedstawione na rysunkach 2.31 – 2.34 pozwalają określić temperaturę do jakiej zostanie nagrzana taśma nadprzewodnikowa o długości 1 m w chwili wyłączenia zwarcia dla określonej wartości napięcia przypadającego na 1 m taśmy. Wzrost wartości napięcia przypadający na jednostkę długości taśmy nadprzewodnikowej powoduje wzrost prądu w taśmie nadprzewodnikowej, a w następstwie wzrost temperatury końcowej T_{\max} przewodu nadprzewodnikowego. Dopuszczalne graniczne wartości napięcia przypadające na 1 m taśmy nadprzewodnikowej SF dla kilku wybranych czasów trwania zwarcia, przy założeniu temperatury maksymalnej $T_{\max} = 200$ K, 300 K i 450 K, zostały zamieszczone w tabelach 4 – 6.

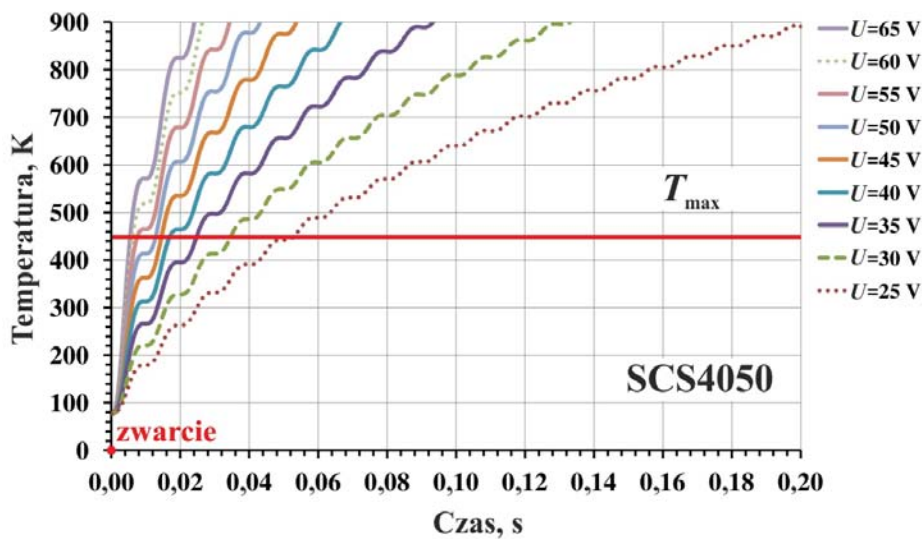
Wydłużenie czasu zwarcia przy zachowaniu tej samej wartości napięcia na jednostkę długości taśmy nadprzewodnikowej powoduje zwiększenie temperatury końcowej taśmy nadprzewodnikowej. Aby nie przekroczyć temperatury maksymalnej przewodu nadprzewodnikowego wydłużając czas zwarcia należy zmniejszyć napięcie przypadające na jednostkę długości taśmy. Przykładowo do wykonania ogranicznika rezystancyjnego wykonanego z taśmy SF12050 na napięcie 8,6 kV (napięcie fazowe) powinniśmy zastosować co najmniej 132 m taśmy z szeregowo włączonym wyłącznikiem o czasie zadziałania 50 ms. Jeżeli zastosujemy wyłącznik o dłuższym czasie zadziałania, np. 100 ms, to długość taśmy nadprzewodnikowej musi zostać zwiększona do 192 metrów.



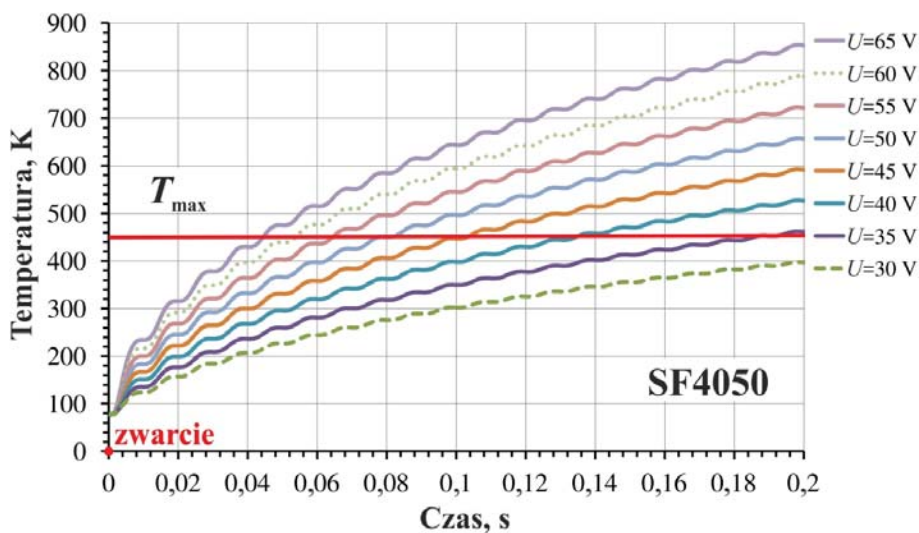
Rys. 2.31. Wzrost temperatury taśmy SF12050 podczas przepływu prądu zwarcio-
wego dla napięcia zasilającego od 30 V do 65 V



Rys. 2.32. Wzrost temperatury taśmy SF12100 podczas przepływu prądu zwarcio-
wego dla napięcia zasilającego od 30 V do 65 V



Rys. 2.33. Wzrost temperatury taśmy SF4050 podczas przepływu prądu zwarciegogo dla napięcia zasilającego od 30 V do 65 V



Rys. 2.34. Wzrost temperatury taśmy SCS4050 podczas przepływu prądu zwarciegogo dla napięcia zasilającego od 30 V do 65 V

TABELA 4Maksymalne napięcie na 1 metr taśmy HTS dla temperatury $T_{\max} = 200$ K

Czas trwania zwarcia	SCS4050	SF4050	SF12050	SF12100
50 ms	-	25 V	30 V	40 V
80 ms	-	-	27 V	33 V
100 ms	-	-	-	30 V

TABELA 5Maksymalne napięcie na 1 metr taśmy HTS dla temperatury $T_{\max} = 300$ K

Czas trwania zwarcia	SCS4050	SF4050	SF12050	SF12100
50 ms	-	40 V	45 V	60 V
80 ms	-	32 V	36 V	47 V
100 ms	-	30 V	32 V	42 V

TABELA 6Maksymalne napięcie na 1 metr taśmy HTS dla temperatury $T_{\max} = 450$ K

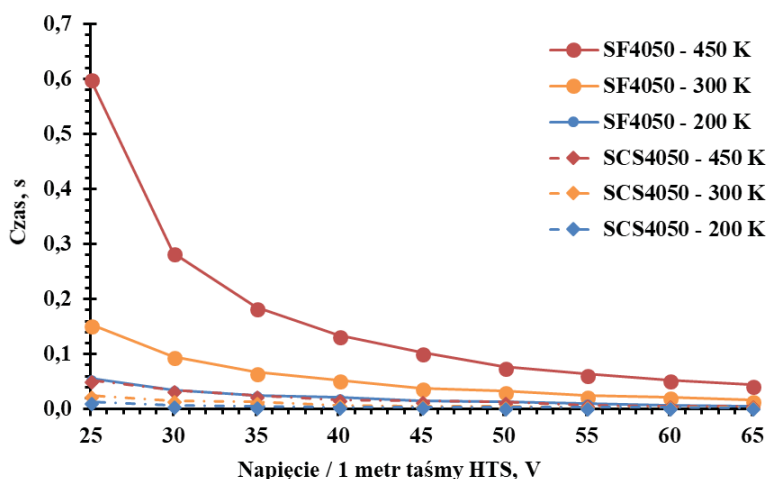
Czas trwania zwarcia	SCS4050	SF4050	SF12050	SF12100
50 ms	25 V	60 V	65 V	> 65 V
80 ms	-	50 V	52 V	> 65 V
100 ms	-	45 V	47 V	65 V

Na rysunkach 2.35 – 2.37 przedstawione zostały czasy nagrzewania taśm HTS od początkowej temperatury roboczej $T_p = 77$ K do wybranych temperatur 200 K, 300 K i 450 K. Na rysunku 2.35 przedstawione zostały czasy nagrzewania taśm SF4050 i SCS4050 o tej samej szerokości 4 mm, ale różnej budowie wewnętrznej. Taśma typu SCS4050 pomimo większej pojemności cieplnej od taśmy SF4050 nagrzewa się znacznie szybciej i osiąga wyższą temperaturę maksymalną od taśmy SF4050 w chwili wyłączenia zwarcia (rys. 2.34). Taśmy ze stabilizatorem miedzianym SCS ze względu na małą wartość rezystancji (rys. 2.14) w niewielkim stopniu ograniczają prąd zwarciový oraz nagrzewają się do znacznie wyższych temperatur niż taśmy typu SF.

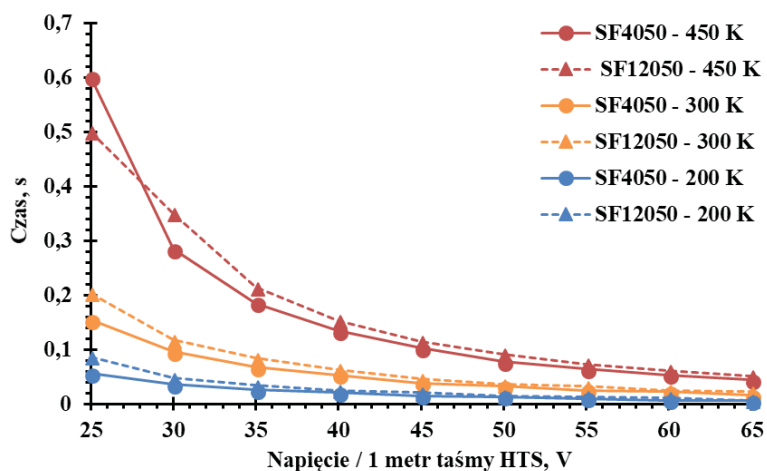
Na rysunku 2.36 pokazane zostały czasy nagrzewania taśm SF4050 i SF12050. Są to taśmy tej samej grubości i takiej samej strukturze wewnętrznej. Taśmy różnią się szerokością, taśma SF4050 jest 3 razy węższa niż SF12050 i ma 3 razy mniejszy prąd krytyczny. Charakterystyki nagrzewania taśm SF4050 i SF12050 są bardzo zbliżone.

Na rysunku 2.37 pokazane zostały czasy nagrzewania taśm HTS SF12100 i SF12050. Są to taśmy tej samej szerokości i tym samym prądzie krytycznym. Taśmy różnią się grubością podłoża Hastelloy. Taśma SF12100 jest blisko 2 razy grubsza niż SF12050 i ma dzięki temu znacznie większą pojemność cieplną. Grubsza taśma SF12100 nagrzewa się wolniej od taśmy SF12050.

Charakterystyki nagrzewania taśm pozwalają na określenie temperatury do jakiej zostaną nagrzane uzwojenia ogranicznika rezystancyjnego chłodzonego ciekłym azotem podczas przepływu prądu zwarcowego.

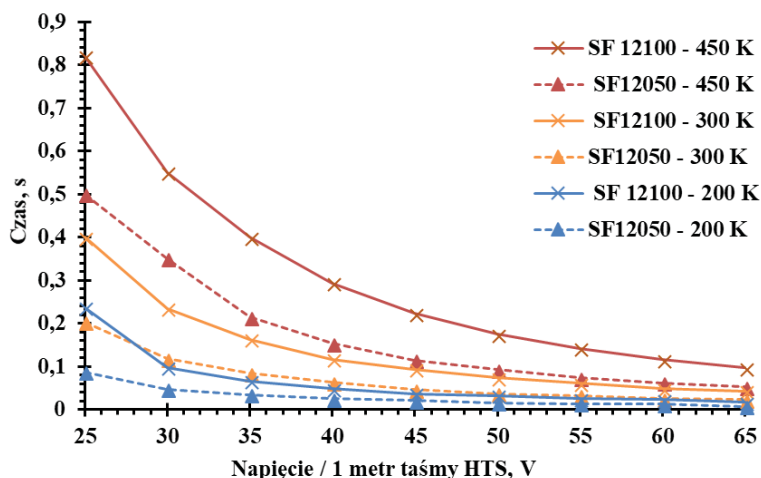


Rys. 2.35. Czas nagrzewania taśm SF4050 i SCS4050 od temperatury początkowej 77 K do wybranej temperatury końcowej: 200 K, 300 K i 450 K w funkcji napięcia na taśmach.



Rys. 2.36. Czas nagrzewania taśm SF4050 i SF12050 od temperatury początkowej 77 K do temperatury końcowej: 200 K, 300 K i 450 K w funkcji napięcia na taśmach

Taśmy typu SCS ze stabilizatorem miedzianym w niewielkim stopniu ograniczają prąd zwarciový z powodu małej wartości rezystancji taśmy w stanie rezystywnym. Lepsze właściwości w ograniczaniu prądu zwarciovego wykazują taśmy typu SF bez stabilizatora miedzianego o kilkukrotnie większej rezystancji w stanie rezystywnym od taśm typu SCS.



Rys. 2.37. Czas nagrzewania taśm SF4050 i SF12050 od temperatury początkowej 77 K do temperatury końcowej 200 K, 300 K i 450 K w funkcji napięcia na taśmach

Szybkość nagrzewania taśmy nadprzewodnikowej tego samego typu i tej samej grubości jest zbliżona (taśmy typu SF12050 i SF4050). Szybkość nagrzewania taśm tego samego typu SF12050 i SF12100 o różnej grubości podłoża Hastelloy jest różna. Taśma o grubszym podłożu nagrzewa się znacznie wolniej. Taśma ze stabilizatorem miedzianym SCS4050 nagrzewa się najszybciej. Z uwagę na podobną cenę badanych taśm, taśma SF12100 zdecydowanie przewyższa pozostałe inne badane taśmy w zastosowaniach do budowy nadprzewodnikowych ograniczników prądu.

2.6. Połączenia lutowane taśm HTS 2G

Każde uzwojenie nadprzewodnikowe wymaga wykonania co najmniej dwóch połączeń taśmy nadprzewodnikowej z miedzianymi doprowadzeniami prądowymi – na początku i na końcu uzwojenia. Bardzo często zachodzi również konieczność łączenia taśm nadprzewodnikowych między sobą, taśmy nadprzewodnikowe drugiej generacji (taśmy HTS 2G) produkowane są najczęściej

w odcinkach o długości kilkuset metrów, więc do wykonania uzwojeń nadprzewodnikowych często konieczne jest wykonanie połączeń pomiędzy kilkoma taśmami nadprzewodnikowymi w celu uzyskania odcinka taśmy o długości wystarczającej do wykonania uzwojenia.

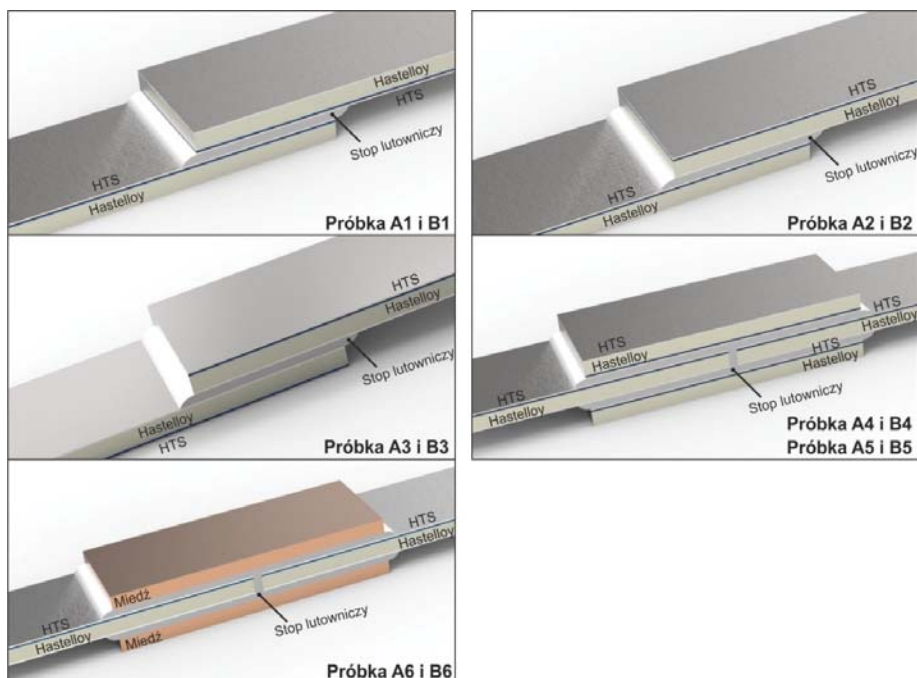
Opracowanie technologii połączeń o małej rezystancji i o odpowiedniej wytrzymałości mechanicznej umożliwia zmniejszenie strat na rezystancji połączeń, co ma bezpośredni wpływ na powstające straty w układzie chłodzenia oraz zwiększenie ich niezawodności działania. Termiczne uszkodzenia uzwojeń występują najczęściej w miejscu wadliwego połączenia taśmy HTS z przepustami prądowymi, które doprowadzają prąd ze źródła zasilania pracującego w temperaturze pokojowej do urządzenia nadprzewodnikowego umieszczonego w kriostacie w temperaturze kriogenicznej. W miejscu lutowanego połączenia taśm nadprzewodnikowych zawsze występują straty wynikające z rezystancji połączenia, które mogą spowodować lokalne podgrzanie nadprzewodnika i wyjście ze stanu nadprzewodnictwa, co z kolei prowadzi do wydzielenia dużej energii w tym miejscu i trwałe uszkodzenie taśmy nadprzewodnikowej. Prawdopodobieństwo termicznego uszkodzenia uzwojenia nadprzewodnikowego z połączeniami lutowanymi taśm HTS wielokrotnie wzrasta w urządzeniach takich jak ograniczniki prądu zwarciovego, ponieważ w czasie ograniczania prądu przez uzwojenie płynie prąd zwarciovowy o wartości wielokrotnie przekraczającej wartość krytyczną.



Rys. 2.38. Stacja lutownicza do wykonywania połączeń taśm HTS
(Pracownia Technologii Nadprzewodnikowych IEL w Lublinie) [52]

Każdy z producentów zaleca maksymalną temperaturę podczas lutowania swoich taśm, dopuszczalny czas lutowania oraz minimalną zakładkę w przypadku łączenia dwóch odcinków taśmy. W przypadku taśm nadprzewodnikowych pierwszej generacji (HTS 1G) lutowanie typowym stopem lutowniczym Pb60Sn40 standardową lutownicą z regulatorem temperatury pozwala na wykonanie odpowiedniego połączenia. Wykonanie połączenia taśm drugiej generacji (HTS 2G) wymaga zastosowania specjalnie zaprojektowanych stacji lutow-

niczych przeznaczonych do tego celu (rys. 2.38). Sposób wykonania połączeń taśm nadprzewodnikowych stosowany w Pracowni Technologii Nadprzewodnikowych został przedstawiony w artykule [52].

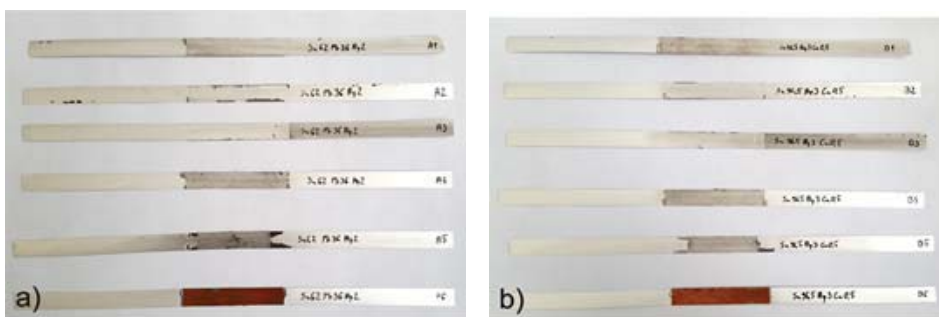


Rys. 2.39. Sposoby wykonania połączeń lutowanych taśm ReBCO – modele CAD

Badania połączeń taśm HTS 2G wykonano dla kilku rodzajów połączeń (rys. 2.39). Połączenie na zakładkę (próbka A1 i B1) wymaga odwrócenia taśmy warstwami nadprzewodnika ku sobie, co zmniejsza rezystancję połączenia, ponieważ prąd z warstwy nadprzewodnika jednej taśmy przepływa poprzez warstwy srebra do warstwy nadprzewodnika drugiej taśmy nadprzewodnikowej. Gdy odwrócenie taśmy nadprzewodnikowej jest niemożliwe podczas nawijania uzwojenia można zastosować połączenie na zakładkę bez odwracania taśmy nadprzewodnikowej (próbka A2 i B2) w której warstwa nadprzewodnika jednej taśmy przylega do warstwy podłoża o dużej rezystywności. W połączeniu na zakładkę w próbkach A3 i B3 warstwy podłoża przylegają do siebie, więc prąd płynący przez takie połączenie płynie przez dwie warstwy podłoża. Połączenia na zakładkę są wrażliwe na uszkodzenia mechaniczne, podczas nawijania uzwojenia taśma nadprzewodnikowa odrywa się w miejscu styku łączonych taśm. W praktyce najlepiej sprawdza się połączenie z dwoma mostkami wyko-

nanymi z taśmy nadprzewodnikowej przylutowanej z dwóch stron połączenia (próbki A4, A5, A6, B4, B5 i B6) szczególnie podczas łączenia taśm w procesie ich izolowania oraz podczas nawijania uzwojeń. Tego typu połączenie z dwoma mostkami można zginać w obie strony, bez obawy o uszkodzenie połączenia. W połączeniu z dwoma mostkami, próbka A6 i B6 do wykonania połączenia zamiast mostków z taśmy HTS 2G zastosowano miedziane mostki wykonane z blachy miedzianej o grubości 0,18 mm.

Do wykonania połączeń lutowanych można wykorzystać stopy lutownicze o różnym składzie chemicznym. Badanie rezystancji połączenia lutowanego wykonano dla dwóch stopów Sn62Pb36Ag2 o temperaturze topnienia 179°C oraz Sn96,5Ag3Cu0,5 o temperaturze topnienia 217°C. Do próbek A1-A6 użyto pasty lutowniczej Sn62Pb36Ag2, natomiast do próbek B1-B6 pasty lutowniczej Sn96,5Ag3Cu0,5. W celu wykonania pomiaru rezystancji samego połączenia HTS-Cu wykonano próbki połączenia dwóch taśm mostkami miedzianymi po obu stronach taśm.



Rys. 2.40. Badane połączenia taśm ReBCO:

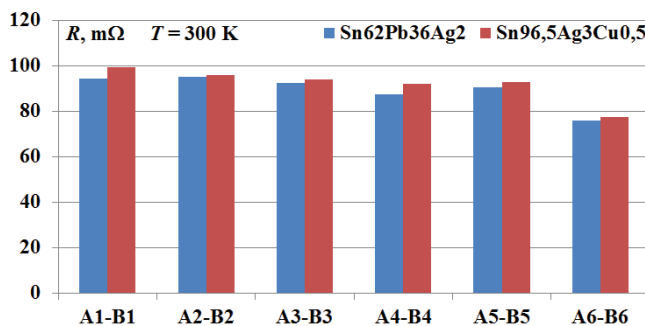
a) próbki A1-A6 połączenia wykonane stopem Sn62Pb36Ag2, b) próbki B1-B6 połączenia wykonane stopem Sn96,5Ag3Cu0,5

2.6.1. Pomiary rezystancji połączeń lutowanych taśm ReBCO mikroomierzem Megger DLRO-10X

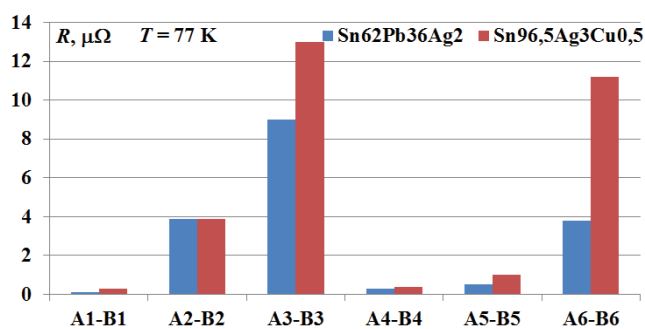
Pomiar rezystancji połączeń wykonywano mikroomierzem Megger DLRO-10X i w laboratoryjnym układzie pomiarowym zaprojektowanym i wykonanym w Pracowni Technologii Nadprzewodnikowych IEL w Lublinie. Mikroomierze Megger DLRO-10X umożliwia pomiar rezystancji prądem pomiarowym do 10 A, natomiast układ laboratoryjny w zakresie od 10 do 440 A. Pomiary rezystancji połączeń wykonywano w temperaturze pokojowej i po schłodzeniu próbki do temperatury 77 K w kriostacie z ciekłym azotem.



Rys. 2.41. Pomiary rezystancji połączeń miarkomierzem Megger DLRO-10X: a) w temperaturze pokojowej 300 K, b) w temperaturze 77 K



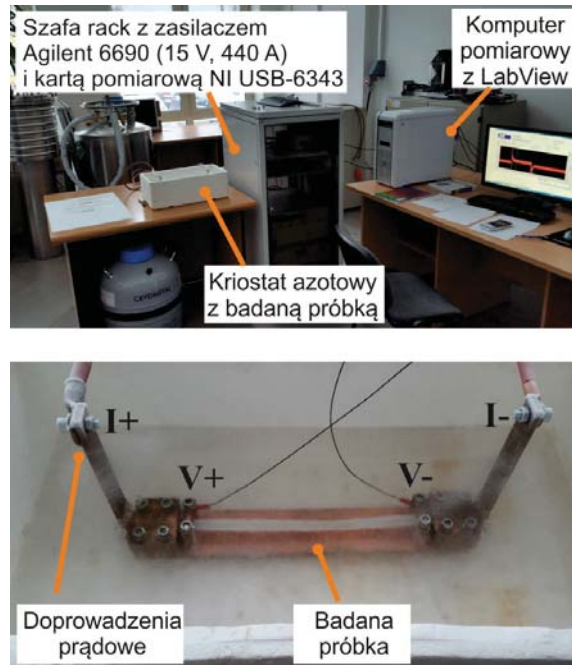
Rys. 2.42. Rezystancja badanych próbek w temperaturze pokojowej 300 K (pomiary wykonane miarkomierzem Megger DLRO-10X)



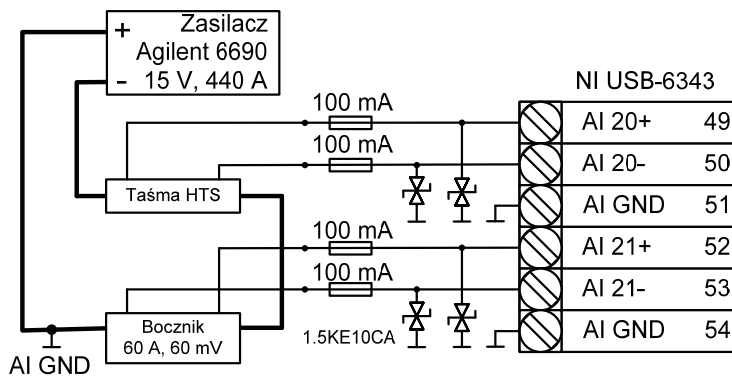
Rys. 2.43. Rezystancja badanych próbek w temperaturze 77 K (pomiary wykonane miarkomierzem Megger DLRO-10X)

2.6.2. Pomiary rezystancji połączeń lutowanych taśm ReBCO prądem pomiarowym 100, 150 i 200 A

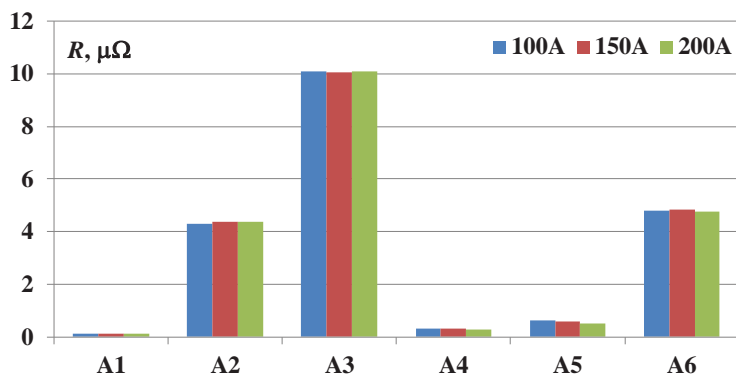
Wykonany laboratoryjny układ pomiarowy umożliwia pomiar rezystancji połączeń lutowanych taśm nadprzewodnikowych metodą pośrednią czteroprzewodową ze zmianą kierunku przepływu prądu. Schemat układu pomiarowego został przedstawiony na rysunku 2.45. Układ pomiarowy składa się z zasilacza Agilent 6690 (15 V, 440 A), bocznika pomiarowego 60 A, 60 mV do pomiaru prądu płynącego w obwodzie pomiarowym, karty pomiarowej NI USB-6343 oraz układu ochrony karty pomiarowej przed uszkodzeniem wejść karty. Każde z wejść analogowych karty pomiarowej NI USB-6343 zostało zabezpieczone bezpiecznikiem o prądzie zadziałania 100 mA oraz diodą zabezpieczającą dwukierunkową 1.5KE10CA, która zapobiega pojawieniu się mierzonego napięcia $U > 10$ V na wejściu względem masy karty. Układ pomiarowy sterowany jest z komputera pomiarowego z programem rejestrujący dane pomiarowe napisanym w LabView. Czas trwania pomiaru wynosił 300 ms. Pomiary wykonano dla trzech wartości prądu pomiarowego 100, 150 i 200 A. Pomiar wykonywany jest z użyciem czterech oddzielnych przewodów, dwóch przewodów prądowych doprowadzających prąd do badanego złącza i dwóch napięciowych do pomiaru napięcia na złączu lutowanym. Każdy pomiar rezystancji złącza lutowanego wykonywany był w dwóch przeciwnych kierunkach przepływu prądu. Pomiar jest wykonywany dla prądu płynącego w umownym kierunku „zgodnym”, następnie drugi pomiar dla „przeciwnego” kierunku przepływu prądu. Badanie prądem dwukierunkowym eliminuje błędy wynikające z obecności w mierzonym obiekcie wewnętrznych napięć i sił elektrotermicznych. Przy pomiarze prądem dwukierunkowym mierzona rezystancją ma wartość średnią rezystancji z dwóch pomiarów, przy prądach płynących w przeciwnych kierunkach. Każda występująca w układzie siła elektromotoryczna jest dodawana do pierwszego pomiaru i odejmowana od drugiego. W czteroprzewodowej metodzie pomiaru rezystancji ze zmianą kierunku przepływu prądu wynik pozbawiony jest więc błędu spowodowanego występowaniem sił elektromotorycznych.



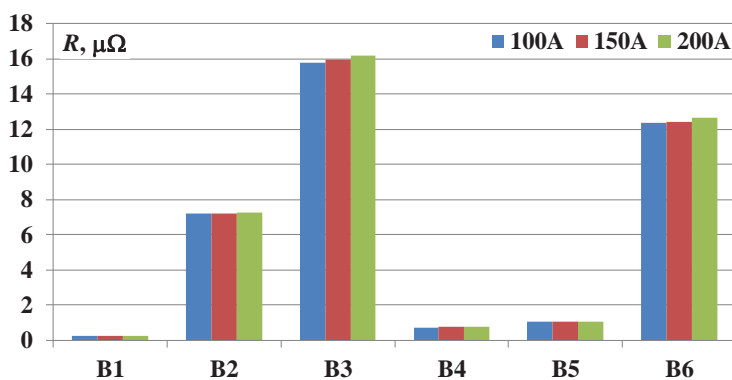
Rys. 2.44. Pomiary rezystancji połączeń lutowanych prądem pomiarowym 100 A, 150 A i 200 A w temperaturze 77 K



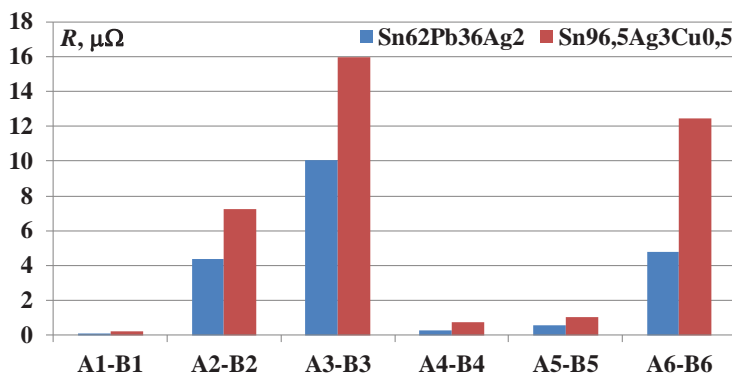
Rys. 2.45. Schemat układu pomiarowego do wyznaczania rezystancji połączeń lutowanych taśm nadprzewodnikowych



Rys. 2.46. Rezystancje próbek A1-A6 z połączeniem wykonanych stopem Sn62Pb36Ag2 w temperaturze 77 K



Rys. 2.47. Rezystancje próbek B1-B6 z połączeniem lutowanym wykonanym stopem Sn96,5Ag3Cu0,5 w temperaturze 77 K



Rys. 2.48. Porównanie średnich wartości rezystancji połączeń złączy lutowanych dla dwóch różnych past lutowniczych w temperaturze 77 K

Pomiary rezystancji złącz przeprowadzono dla 5 różnych sposobów połączeń taśm. Połączenia taśm wykonywano dwoma różnymi pastami lutowniczymi: seria A lutowana była pastą lutowniczą Sn62Pb36Ag2, natomiast seria B pastą Sn96,5Ag3Cu0,5. Przeprowadzone analizy wyników eksperymentalnych wykazały, że w każdym badanym przypadku połączenia lutowane wykonane pastą lutowniczą Sn62Pb36Ag2 (próbki A) mają mniejszą rezystancję od połączeń pastą lutowniczą Sn96,5 Ag3Cu0,5 (próbki B). Najmniejszą rezystancję ma połączenie na zakładkę A1, lecz wymaga odwrócenia taśmy nadprzewodnikowej. Połączenie typu mostek A4 ma porównywalnie małą rezystancję do połączenia na zakładkę A1 i nie wymaga odwrócenia taśmy nadprzewodnikowej. Połączenie to wymaga wykonania dwóch dodatkowych odcinków taśm przylutowanych po obu stronach połączenia. Do wykonywania połączeń taśmy HTS z miedzianym doprowadzeniem prądowym (połączenia A6 i B6) należy również zastosować pastę lutowniczą Sn62Pb36Ag2. Rezystancja połączenia lutowanego pastą lutowniczą Sn62Pb36Ag2 jest dwukrotnie mniejsza od rezystancji połączenia wykonanego pastą lutowniczą Sn96,5 Ag3Cu0,5. Największą wartość rezystancji uzyskano dla połączeń typu A3 i B3 (warstwami podłoża Hastelloy do siebie).

3. CHŁODZENIE NADPRZEWODNIKOWYCH OGRANICZNIKÓW PRĄDÓW ZWARCIOWYCH W KĄPIELI CIEKŁEGO AZOTU

Wszystkie obecnie stosowane nadprzewodniki pracują w temperaturach kriogenicznych od 1,9 K do 80 K. Do uzyskania temperatur kriogenicznych konieczne jest zastosowanie kriochłodziarek lub cieczy kriogenicznych [4], [15], [84], [87]. Elementy nadprzewodnikowe ogranicznika prądu wymagają chłodzenia kriogenicznego we wszystkich stanach jego pracy. Przed pierwszym zadziałaniem ogranicznika należy schłodzić elementy nadprzewodnikowe ogranicznika do temperatury niższej od ich temperatury krytycznej. W stanie wyczekiwania prąd znamionowy płynący przez ogranicznik prawie nie generuje ciepła, ponieważ płynie przez nadprzewodnik znajdujący się w stanie nadprzewodzącym. Ciepło powstające w elementach nadprzewodnikowych ogranicznika i przepustach prądowych odprowadzane jest w całości przez układ chłodzenia. Podczas przepływu prądu zwarciovego ogranicznik przechodzi do stanu rezystywnego. Prąd zwarciovym płynący przez taśmę nadprzewodnikową w stanie rezystywnym powoduje generowanie olbrzymiej ilości ciepła, a ilość ciepła pochłaniana przez układ chłodzenia jest ograniczona. W stanie reaktywacji ograniczniki, po wyłączeniu

zwarcia przez wyłącznik należy schłodzić w ciągu kilku sekund element nadprzewodnikowy ogranicznika poniżej jego temperatury krytycznej, w której odzyskuje on właściwości nadprzewodzące. W stanie reaktywacji ogranicznika można wyróżnić dwa przypadki. Jeden, gdy prąd zwarciovy jest wyłączony po określonym czasie zwarcia, a ogranicznik jest ponownie chłodzony do temperatury pracy oraz drugi przypadek, gdy przez element nadprzewodnikowy przepływa prąd po ustąpieniu zwarcia, co powoduje dodatkowe generowanie ciepła w elemencie nadprzewodnikowym w stanie rezystywnym, które musi być odprowadzone przez powierzchnię ogranicznika do cieczy kriogenicznej.

Najprostszą techniką chłodzenia ograniczników jest zanurzenie ich w kriostacie zawierającym ciecz kriogeniczną pod ciśnieniem atmosferycznym. Do chłodzenia ograniczników mogą być użyte ciecze kriogeniczne, których temperatura wrzenia jest mniejsza od temperatury krytycznej materiału nadprzewodnikowego z którego wykonano elementy nadprzewodnikowe ograniczników.

Przenoszenie ciepła w temperaturach kriogenicznych może zachodzić na drodze przewodnictwa cieplnego, w procesach konwekcyjnych oraz przez promieniowanie [42], [73], [84]. Promieniowanie przy chłodzeniu w temperaturach kriogenicznych praktycznie nie odgrywa roli i może być pominięte [42]. Ilość ciepła przenoszona w procesie przewodnictwa cieplnego może być wyznaczona z równania:

$$\left(\frac{\dot{Q}}{S_{\text{ch}}} \right)_y = -k_c \frac{\partial T}{\partial y} \quad (3)$$

gdzie \dot{Q} jest strumieniem ciepła przepływającym w kierunku y przez powierzchnię S_{ch} , a $\frac{\partial T}{\partial y}$ jest gradientem temperatury w kierunku y , k_c jest współ-

czynnikiem przewodnictwa cieplnego. Równanie (3) może być również stosowane dla obliczenia ciepła przenoszonego na drodze przewodnictwa z ogranej powierzchni ciała stałego do czynnika chłodzącego. W takim przypadku kierunek y jest prostopadły do powierzchni chłodzonej, $\frac{\partial T}{\partial y}$ jest gradientem

temperatury prostopadłym do powierzchni wytworzonym w warstwie płynu przylegającej do tej powierzchni, a k_c jest współczynnikiem przewodnictwa cieplnego płynu chłodzącego. Wyznaczone w ten sposób ciepło zwykle nie jest całkowitą ilością ciepła przepływającego z powierzchni chłodzonej do czynnika chłodzącego. Najczęściej obok przewodnictwa występuje oddawanie ciepła wskutek ruchów konwekcyjnych płynu obmywającego powierzchnię chłodzoną. W tym przypadku dla obliczenia całkowitej ilości ciepła oddawanego przez powierzchnię chłodzoną do czynnika chłodzącego stosuje się równanie:

$$\frac{\dot{Q}}{S_{\text{ch}}} = h(T - T_0) \quad (4)$$

gdzie T jest temperaturą powierzchni chłodzonej, a h jest współczynnikiem konwekcji cieplnej. W przypadku ciała chłodzonego o dużych wymiarach, zanurzonego w kąpeli płynu chłodzącego, T_0 jest temperaturą płynu daleko od chłodzonej powierzchni, gdzie temperaturę tę można w przybliżeniu uważać jako stałą [46].

Przepływy konwekcyjne mogą być swobodne lub wymuszone. Swobodne są wtedy, gdy wywołują je zjawiska występujące w samym płynie chłodzącym. Główną przyczyną takich przepływów są różnice temperatur występujące w płynie, wywołujące różnicę w gęstości płynu, wskutek czego powstają siły wyporności. Przy małych różnicach temperatur siły te są niewielkie i nie mogą pokonać przeciwdziałających im sił lepkości i sił grawitacji. Przy większych różnicach temperatur siły wyporności przeważają i partie cieplejszego płynu o mniejszej gęstości unoszą się ku górze wywołując zjawisko konwekcji swobodnej. Konwekcja ta jest najbardziej intensywna w pobliżu powierzchni chłodzonej, gdzie różnice temperatur są największe, szczególnie intensywna konwekcja występuje w przypadku powierzchni skierowanych pionowo [42], [46].

Zarówno przy konwekcji swobodnej jak i wymuszonej przepływ może być uwarstwiony (laminarny) lub burzliwy (turbulentny). Przy stosunkowo małych szybkościach przepływu ma on charakter uwarstwiony: cząsteczki płynu poruszają się w kierunku przyływu po torach równoległych; wprowadzone z zewnątrz do przepływu zakłócenie w ruchu szybko zanika. Wskutek zjawiska lepkości prędkość płynu na styku jest równa zeru. Przy oddalaniu się od tej powierzchni prędkość szybko rośnie osiągając w pewnej odległości wartość w przybliżeniu ustaloną. Rozpoczyna się tu główny nurt przepływu. Część przepływu rozciągającą się od powierzchni chłodzonej do miejsca, w którym szybkość cząstek płynu osiąga 99% szybkości ustalonej nazywa się przyścienną warstwą prędkościową. Istnieje również przyścienna warstwa temperaturowa, w której temperatura szybko maleje przy oddalaniu się od powierzchni chłodzonej osiągając w pewnej od niej odległości wartość ustaloną [42], [46].

Przy dużych szybkościach przepływ ma charakter burzliwy. Struktura przepływu staje się niestabilna, występują chaotyczne, przypadkowe zmiany cząstek płynu, następuje zupełna destrukcja przepływu uwarstwowionego. Zniszczona zostaje również warstwa przyścienna. Jednakże i przy tym przepływie wskutek lepkości nie występuje poślizg cząstek płynu stykających się z powierzchnią chłodzoną. W bezpośrednim sąsiedztwie powierzchni cienka warstwa płynu ma małą prędkość i przepływ pozostaje laminarny. Obszar ten nazywa się podwarstwą laminarną. Przepływ burzliwy ma charakter ściśle wirowy [42], [46].

Zarówno przy przepływie uwarstwionym jak i burzliwym warstewka płynu stykająca się z powierzchnią chłodzoną jest nieruchoma, oddawanie ciepła przez powierzchnię odbywa się więc tylko na drodze przewodnictwa cieplnego. Ponieważ przy przepływie burzliwym następuje zniszczenie warstwy przyściennej, w której występują duże różnice temperatur, przy przepływie tym występują znacznie lepsze warunki chłodzenia niż przy przepływie uwarstwionym. Przy średnich prędkościach przepływu ma on charakter przejściowy i jest w niektórych obszarach uwarstwiony, w innych burzliwy.

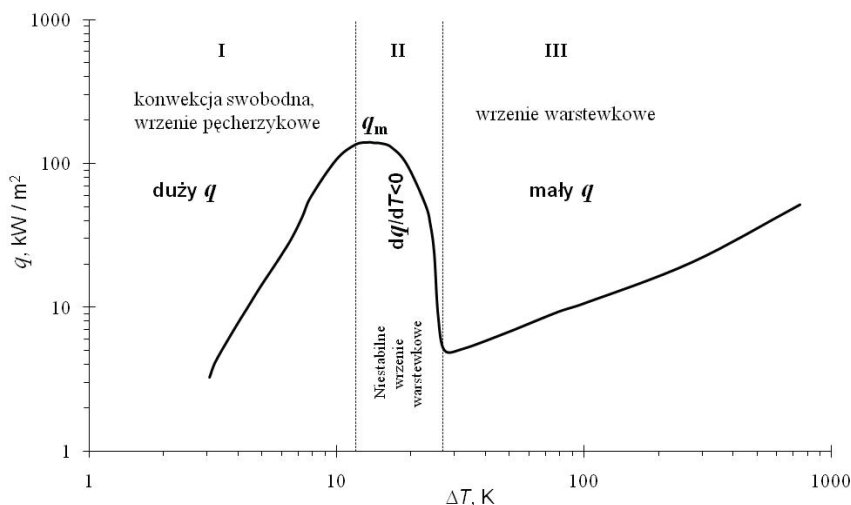
Najczęściej używaną cieczą kriogeniczną do chłodzenia elementów nadprzewodnikowych ograniczników prądu jest ciekły azot, którego temperatura wrzenia pod ciśnieniem atmosferycznym ($\sim 0,1$ MPa) wynosi 77,395 K (tab. 7). Ponieważ gęstość prądu krytycznego materiałów nadprzewodnikowych rośnie wraz ze spadkiem temperatury, opracowano metody zmniejszenia temperatury wrzenia ciekłego azotu poprzez zmianę jego ciśnienia [88]. Poprzez zmniejszenie ciśnienia ciekłego azotu, jego punkt wrzenia może być obniżony do około 63 K. Poniżej tej temperatury ciekły azot przechodzi do fazy stałej. Jedną z metod uzyskania niższej temperatury ciekłego azotu jest użycie pompy próżniowej do odpompowania par azotu z zamkniętego kriostatu, w którym znajdują się ciekły azot i pary azotu. Odpompowanie azotu w stanie gazowym pozwala obniżyć temperaturę wrzenia ciekłego azotu poniżej 77 K [46].

TABELA 7

Właściwości azotu [73]

Parametr	Wartość
Temperatura wrzenia pod ciśnieniem normalnym, K	77,395
Ciśnienie krytyczne, MPa	3,39
Gęstość krytyczna, g/cm ³	0,31096
Temperatura punktu potrójnego, K	63,156
Ciśnienie w punkcie potrójnym, kPa	12,53
Ciepło utajone parowania, J/g	197
Stosunek objętości gazu przy standardowym ciśnieniu i temperaturze do objętości cieczy w temperaturze wrzenia	640

Ilość przenieszonego ciepła z elementu chłodzonego do cieczy kriogenicznej jest zależna od różnicy temperatur pomiędzy powierzchnią chłodzoną i temperaturą cieczy kriogenicznej [38], [70]. Na rysunku 3.1 przedstawiono przebieg gęstości strumienia ciepła oddawanego z powierzchni ciała zanurzonego w ciekłym azocie w funkcji różnicy temperatur powierzchni chłodzonej i masy azotu $\Delta T = T - T_0$ przy stopniowym zwiększaniu nagrzania ciała.



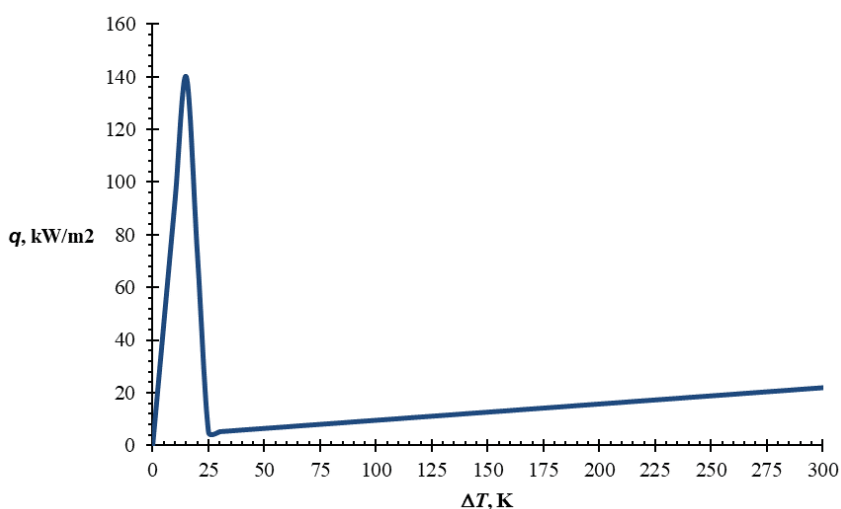
Rys. 3.1. Gęstość strumienia ciepła q przepływająca pomiędzy powierzchnią metalową a ciekłym azotem w funkcji różnicy temperatury ΔT pomiędzy powierzchnią a ciekłym azotem [46]

Przy nieznacznym nagrzaniu ciała występuje oddawanie ciepła przez przewodzenie: różnica temperatur ΔT jest wtedy minimalna. Przy wzroście nagrzania powstaje konwekcja swobodna: nagrzane przy powierzchni ciała warstwy ciekłego azotu unoszą się ku górze i oddają ciepło na powierzchni cieczy przez parowanie. Dla większej różnicy temperatur następuje tzw. wrzenie pęcherzykowe. W mikroskopijnych zagłębieniach na powierzchni ogrzewanego ciała powstają pęcherzyki pary. Pęcherzyki stopniowo zwiększają swoją objętość i odrywają się od powierzchni, ale nie docierają do powierzchni cieczy, ponieważ ulegają kondensacji wewnątrz masy azotu. Przy dalszym zwiększaniu nagrzewania na powierzchni tworzy się coraz więcej pęcherzyków, stają się one coraz większe i odrywając się od powierzchni chłodzonej docierają już do powierzchni cieczy. Wrzenie pęcherzykowe osiąga swój szczyt: z powierzchni chłodzonej odpywa strumień ciepła o największej gęstości, nazywanym strumieniem maksymalnym q_m . W tej fazie pęcherzyki pary na powierzchni są już tak liczne i tak duże, że zaczynają łączyć się z sobą [42], [46].

Nieznaczne przekroczenie nagrzewania ciała powoduje powstanie na powierzchni warstewki pary azotu i wskutek tego znaczne pogorszenie odprowadzania ciepła. Procesy występujące w przedziałach II i III noszą nazwę wrzenia warstewkowego. Wrzenie to w przedziale II jest niestabilne. Warstwa pary na powierzchni ulega ciągłym fluktuacjom: powstaje i zanika wskutek przerywania jej przez pęcherzyki pary wydostające się z powierzchni. Najczęściej

po osiągnięciu punktu q_m następuje przeskok do punktu na krzywej w przedziale III z jednoczesnym gwałtownym wzrostem temperatury chłodzonej powierzchni. W przedziale III wrzenie warstewkowe jest już stabilne. Tu pęcherzyki pary tworzą się na zewnętrznej powierzchni warstwy pary otaczającej chłodzoną powierzchnię, wobec czego powierzchnia ta nie ma już wpływu na proces chłodzenia [42], [46].

Wartości gęstości strumienia ciepła q przepływającego pomiędzy powierzchnią metalową a ciekłym azotem w funkcji różnicy temperatury ΔT (pomiędzy powierzchnią chłodzoną a ciekłym azotem) znacznie różnią się w zależności od szybkości nagrzewania się powierzchni chłodzonej [8], w związku z tym w modelach numerycznych przedstawionych w dalszej części pracy przyjęto uproszczoną zależność $q(\Delta T)$ przedstawioną na rysunku 3.2.

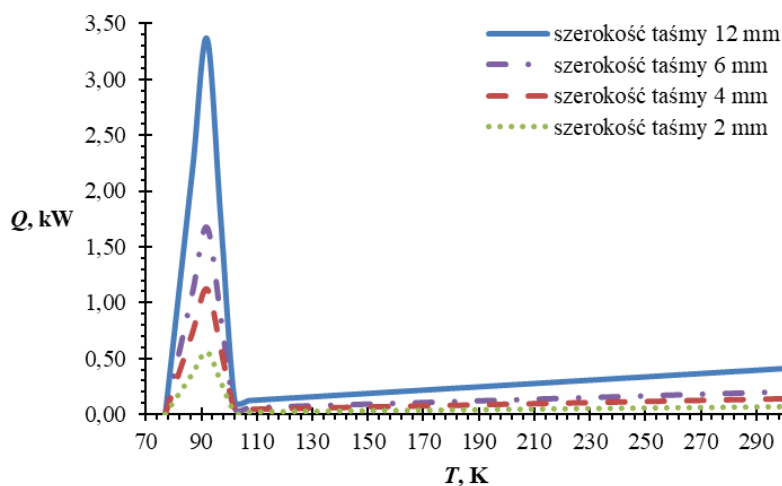


Rys. 3.2. Uproszczona zależność gęstości strumienia ciepła q przepływająca pomiędzy chłodzoną powierzchnią a ciekłym azotem w funkcji różnicy temperatur pomiędzy ciekłym azotem a chłodzoną powierzchnią [46]

Podczas zwarcia w obwodzie z ogranicznikiem prądu wykonanym z taśmy HTS 2G w krótkim czasie następuje bardzo duży wzrost temperatury elementów ogranicznika, czego wynikiem jest osiągnięcie przez nie temperatury nawet ponad 300 K. Duży wzrost temperatury elementów ogranicznika zanurzonego w kąpieli ciekłego azotu jest przyczyną wystąpienia dużej różnicy temperatur pomiędzy powierzchnią chłodzonego elementu ogranicznika, a otaczającym go ciekłym azotem, co powoduje niemal natychmiastowe wytworzenie cienkiej warstwy izolacyjnej par azotu na powierzchni elementu chłodzonego

ogranicznika i wystąpieniem wrzenia warstewkowego. Przenoszenie ciepła do cieczy chłodzącej jest wtedy bardzo ograniczone, czego rezultatem jest mała zdolność chłodzenia elementu nadprzewodnikowego zarówno podczas przepływu prądu zwarciovego jak i po jego wyłączeniu (stan reaktywacji ogranicznika).

W zależności od różnicy temperatur ΔT gęstość strumienia ciepła ma różne wartości. Przykładowo, szybki wzrost temperatury elementu nadprzewodnikowego ogranicznika podczas przepływu prądu zwarciovego powoduje wzrost różnicy temperatur ΔT w przybliżeniu od 100 do 200 K, następuje wrzenie warstewkowe ciekłego azotu, czego rezultatem jest niewielka wartość gęstości strumienia ciepła wynosząca od 13 do 26 kW/m². Jeżeli chłodzony element ogranicznika zostanie schłodzony, to wartość gęstości strumienia ciepła spada nawet do około 6 kW/m² dla $\Delta T \sim 35$ K. Największe wartości gęstości strumienia ciepła występuje przy ΔT około 15 K, kiedy q ma największą wartość około 140 kW/m².



Rys. 3.3. Strumień ciepła Q przekazywany z powierzchni taśmy nadprzewodnikowej o długości 1 m do ciekłego azotu w funkcji temperatury taśmy nadprzewodnikowej

Strumień ciepła przekazywany z powierzchni taśmy nadprzewodnikowej, o długości 1 metra i czterech różnych szerokościach 2 mm, 4 mm, 6 mm i 12 mm, do ciekłego azotu w funkcji temperatury powierzchni taśmy nadprzewodnikowej przedstawiono na rysunku 3.3. Strumień ciepła został wyznaczony przy założeniu, że ciepło odprowadzane jest z obu stron taśmy nadprzewodnikowej.

Strumienia ciepła przekazywany z powierzchni taśmy nadprzewodnikowej do azotu rośnie osiągając maksymalną wartość dla temperatury taśmy $T \approx 92$ K.

Dla większych wartości temperatury powierzchni chłodzonej strumień ciepła osiąga znacznie mniejsze wartości. Ma to bardzo duże znaczenie dla taśmy HTS 2G dla której temperatura krytyczna T_c warstwy nadprzewodnikowej wynosi 90 K, oznacza że po przekroczeniu temperatury krytycznej następuje nagłe pogorszenie warunków chłodzenia, a proces nagrzewania się taśmy jest w przybliżeniu adiabatyczny. Obliczone maksymalne wartości strumienia ciepła wynoszą: 3,36 kW dla taśmy o szerokości 12 mm, 1,68 kW dla taśmy 6 mm, 1,12 kW dla taśmy 4 mm i 0,56 kW dla taśmy 2 mm (rys. 3.3).

4. ZASADA DZIAŁANIA NADPRZEWODNIKOWYCH OGRANICZNIKÓW PRĄDU

Zwarcie jest to przypadkowe lub celowe połączenie przewodzące pomiędzy dwoma lub więcej niż dwoma elementami obwodu sprowadzające różnicę napięć między tymi elementami do zera lub w pobliżu zera. Połączenie to może nastąpić przez łuk elektryczny lub przedmiot o małej impedancji. Prąd płynący bezpośrednio do punktu zwarcia nazywa się prądem zwarciovym. Cechą charakterystyczną obwodów zwarciovych jest znaczne zmniejszenie rezystancji obwodu w czasie zwarcia w porównaniu z rezystancją obwodu w warunkach roboczych, wobec czego przy zwarciach międzyprzewodowych, a w przypadku uziemionego punktu zerowego również przy zwarciach doziemnych, występuje przynajmniej w części obwodu elektrycznego natężenie prądu wielokrotnie większe od natężenia prądu obciążeniowego. Jeżeli zwarcie nastąpi po stronie wtórnej transformatora średniej mocy, zasilanego z układu elektroenergetyczny o bardzo dużej mocy, to prąd zwarciovym płynący przez transformator może być kilkanaście razy większy od jego prądu znamionowego.

Zwarcia powstają na skutek przepięć atmosferycznych, błędnych operacji w stacjach elektroenergetycznych, mechanicznych uszkodzeń kabli, słupów, izolatorów, zawilgocenia lub zniszczenia izolacji itp. Prąd zwarciovym płynący w obwodzie zwarciovym może spowodować cieplne i dynamiczne szkodliwe skutki w pracy urządzeń elektroenergetycznych. Ze względu na niebezpieczeństwo związane z występowaniem zbyt dużego natężenia prądu podczas zwarcia staramy się ograniczyć czas jego trwania przez stosowanie odpowiednich urządzeń zabezpieczających, które powodują przerwanie obwodu zwarciovego.

Duże prądy mimo krótkiego czasu płynięcia powoduje gwałtowne nagrzewanie urządzeń sieciowych i mogą spowodować ich zniszczenie. Przy przepływie dużych prądów zwarciovych powstają również duże siły dynamiczne, które

mogą uszkodzić izolatory wsporcze szyn, mogą być przyczyną rozerwania uzwojeń transformatorów czy przekładników prądowych [6], [26], [40], [53].

Dla prądu zmiennego jednofazowego o przebiegu:

$$i = \sqrt{2} I \sin \omega t \quad (5)$$

płynącego przez dwa równoległe przewody o długości l , umieszczone w odległości a od siebie, siła elektrodynamiczna w dowolnej części obwodu zmienia się według zależności:

$$F = \frac{\mu_0 \cdot l}{2\pi \cdot a} I^2 \sin^2 \omega t = \frac{\mu_0 \cdot l}{2\pi \cdot a} I^2 (1 - \cos 2\omega t) \quad (6)$$

przy czym: I – skuteczna wartość prądu.

Jak wynika ze wzoru (6), siła F da się przedstawić w postaci sumy dwóch składowych, jednej o stałej wartości:

$$F' = \frac{\mu_0 \cdot l}{2\pi \cdot a} I^2 \quad (7)$$

i drugiej zmieniającej się kosinusoidalnie z częstotliwością dwukrotnie większą niż częstotliwość prądu:

$$F'' = \frac{\mu_0 \cdot l}{2\pi \cdot a} I^2 \cos 2\omega t \quad (8)$$

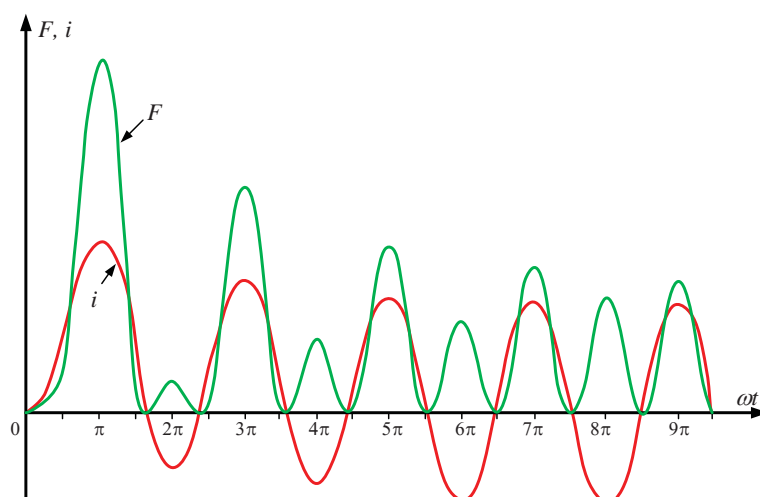
Siły elektrodynamiczne w obwodzie jednofazowym wzrastają z kwadratem prądu, a więc mogą osiągać niebezpieczne wartości podczas zwarć w obwodzie, gdy wartość natężenia prądu jest kilkanaście, a nawet kilkadziesiąt razy większa od prądu roboczego danej części obwodu. Dalszy wzrost siły elektrodynamicznej jest wywołany obecnością składowej nieokresowej prądu zwarcowego.

Przebieg siły F z uwzględnieniem składowej nieokresowej prądu zwarcowego można wyznaczyć z zależności:

$$F = 2 \frac{\mu_0 \cdot l}{2\pi \cdot a} I''^2 \left[\frac{1}{2} + \exp\left(-\frac{2t}{T_a}\right) - 2 \exp\left(-\frac{t}{T_a}\right) \cos \omega t + \frac{1}{2} \cos 2\omega t \right] \quad (9)$$

przy czym: I'' – początkowa wartość (skuteczna) składowej okresowej prądu zwarcio-
ciowego, T_a – stała czasowa obwodu zwarcio-
ciowego zależna od stosunku X_{zw}/R_{zw}
obwodu zwarcio-
ciowego.

Siła F zawiera w stanie nieustalonym obok składowej nieokresowej dwie
składowe okresowe: jedną zanikającą wykładniczo według stałej czasowej T_a
o częstotliwości zgodnej co do wartości z częstotliwością prądu i drugą o pod-
wójnej częstotliwości. Przebieg prądu zwarcio-
ciowego oraz odpowiadający mu
przebieg siły elektrodynamicznej w obwodzie jednofazowym przedstawiono na
rysunku 4.1 [40].



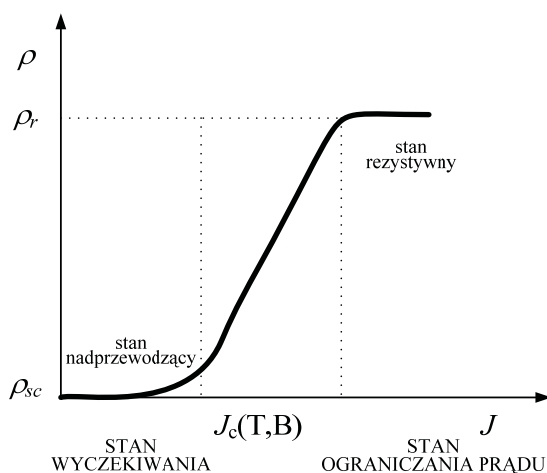
Rys. 4.1. Przebieg prądu zwarcio-
ciowego i odpowiadającej mu siły elektrodynamicznej

Biorąc pod uwagę niebezpieczne dla pracy urządzeń sieciowych skutki
zwarć, dąży się przede wszystkim do zminimalizowania czasów ich trwania.
Wykrywanie zwarć zajmuje się elektroenergetyczna automatyka zabezpiecze-
niowa. Zwarcia w instalacjach małej mocy niskiego i średniego napięcia mogą
być wyłączone przez odpowiednio dobrane bezpieczniki, dla urządzeń dużej
mocy i wysokich napięć zwarcia wykrywane są przez zabezpieczenia, a uszko-
dzone elementy wyłączane są przez wyłączniki. Skutki przepływu prądu zwarcio-
ciowego mogą zostać zmniejszone poprzez odpowiednie kształtowanie sieci, stoso-
wanie szybkich urządzeń do odłączania obwodów zwartych lub wprowadzanie
dodatkowych impedancji w obwód zwarcio-
ciowy [6], [26], [39], [53], [72], [89].

Głównym zadaniem nadprzewodnikowego ogranicznika prądu jest ogra-
niczenie prądu zwarcio-
ciowego w zabezpieczanym obwodzie do bezpiecznego
poziomu i uniknięcie niestabilności sieci elektroenergetycznej. Siły elektrodyna-
miczne występujące podczas przepływu prądu zwarcio-
ciowego mogą uszkodzić

urządzenia sieciowe takie jak transformatory, generatory czy szyny zbiorcze w stacjach elektroenergetycznych w ciągu kilku milisekund od chwili powstania zwarcia. Każda taka awaria sieci elektroenergetycznej pociąga za sobą kosztowne i czasochłonne naprawy, dlatego ważne jest, aby praca sieci była zabezpieczona niezawodnym systemem ochrony. Szybki wzrost rezystancji nadprzewodników po przekroczeniu prądu krytycznego I_c umożliwia budowę niezawodnych nadprzewodnikowych ograniczników prądu zwarciego. Ogranicznik nadprzewodnikowy reaguje bardzo szybko na zaistniałe zwarcie, ograniczając już pierwszy, najbardziej niebezpieczny prąd udarowy, chroniąc w ten sposób urządzenia sieci elektroenergetycznej przed dynamicznymi skutkami przepływu prądu zwarciego.

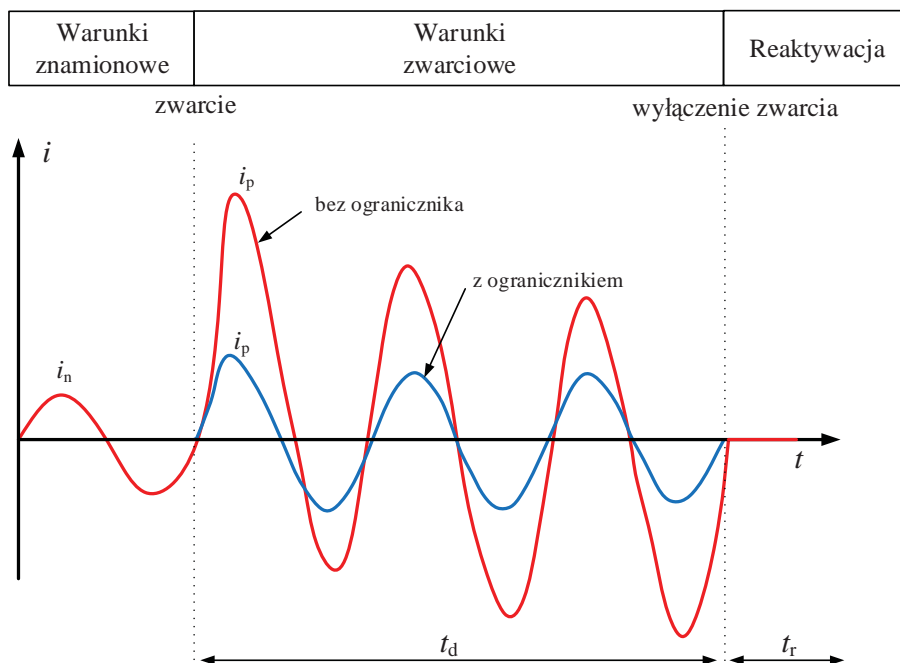
Nadprzewodnikowe ograniczniki prądu wprowadzają dodatkową impedancję w obwód prądu zwarciego. Impedancja ta ma wartość zależną od prądu, jest bardzo mała dla prądu znamionowego i o dużej wartości podczas ograniczania prądu zwarciego.



Rys. 4.2. Rezystywność nadprzewodnika w funkcji gęstości prądu w stałej temperaturze i w polu magnetycznym własnym

W nadprzewodnikowych ogranicznikach prądu wykorzystano zmianę rezystywności materiału nadprzewodnikowego po przekroczeniu gęstości prądu krytycznego. Na rysunku 4.2 przedstawiono uproszczoną zależność rezystywności materiału nadprzewodnikowego od gęstości prądu w stałej temperaturze i w polu magnetycznym własnym. Widoczna jest bardzo mała, prawie zerowa rezystywność ρ_{sc} poniżej gęstości prądu krytycznego J_c , bardzo stromy przyrost rezystywności w pobliżu J_c oraz znaczna rezystywność ρ_r powyżej J_c . Zachodzą

więc odwracalne, sterowane prądem (gęstością prądu) zmiany rezystywności materiału nadprzewodnikowego o kilka rzędów wielkości w przypadku HTS [23], [38], [85], [46].



Rys. 4.3. Idea działania nadprzewodnikowego ogranicznika prądu

Ideę pracy nadprzewodnikowego ogranicznika prądu ilustrują przebiegi prądu w obwodzie, w którym włączony jest szeregowo element nadprzewodnikowy (rys. 4.3). W chwili wystąpienia zwarcia w obwodzie elektroenergetycznym, następuje gwałtowny wzrost prądu. Po przekroczeniu prądu krytycznego nadprzewodnik przechodzi do stanu rezystywnego, a w obwodzie pojawia się rezystancja ograniczająca prąd. Ograniczenie prądu następuje w czasie krótszym od czasu trwania $\frac{1}{4}$ okresu przebiegu prądu zwarciovego i zależy od parametrów elementu nadprzewodnikowego. Ograniczony prąd zwarciove, który nie stanowi już tak dużego zagrożenia dla obwodu elektroenergetycznego, może być wyłączony po kilku okresach od chwili powstania zwarcia, przez konwencjonalny wyłącznik dobrany jednak na znacznie mniejszą wartość prądu [23].

Nadprzewodnikowe ograniczniki prądu powinny charakteryzować się następującymi cechami:

- minimalną impedancją podczas znamionowych warunków pracy systemu,
- dużą impedancją podczas zwarcia,
- minimalnymi stratami podczas znamionowej pracy systemu,

- szybkim powrotem po ustąpieniu zwarcia do stanu początkowego,
- wysoką niezawodnością i małymi kosztami utrzymania [23].

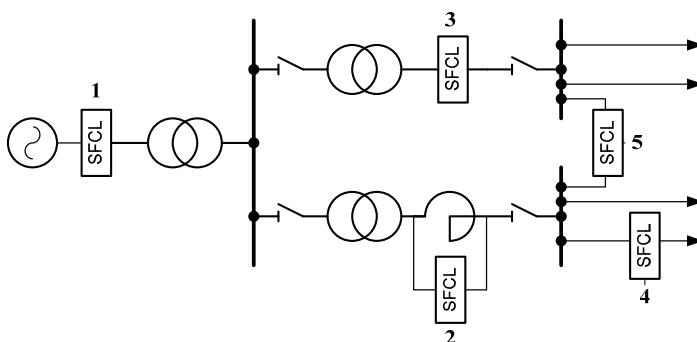
Można wyróżnić trzy stany pracy nadprzewodnikowych ograniczników prądu (rys. 4.3):

- stan wyczekiwania,
- stan ograniczania prądu,
- stan reaktywacji.

W stanie wyczekiwania ogranicznik może znajdować się dowolnie długo, jego impedancja powinna być wtedy bliska zeru, a straty na chłodzenie elementów nadprzewodnikowych powinny być zminimalizowane. Czas pracy w stanie ograniczania prądu jest limitowany maksymalną temperaturą elementów nadprzewodnikowych, do jakiej można dopuścić bez ich uszkodzenia. Czas trwania stanu reaktywacji zależy głównie od temperatury, do jakiej nagrany zostanie nadprzewodnik w stanie ograniczania prądu oraz zastosowanego sposobu chłodzenia.

Na rysunku 4.4 przedstawione zostały możliwe lokalizacje SFCL w systemie energetycznym [5], [7], [11], [17], [18], [43], [62], [63], [71], [94], [95]:

- 1 – w polu zasilającym,
- 2 – jako boczny dławik,
- 3 – po stronie wtórnej transformatora,
- 4 – w polu sprzęgłowym,
- 5 – w polach odpiływowych.



Rys. 4.4. Przykładowe lokalizacje SFCL w systemie elektroenergetycznym

5. WYBRANE PROJEKTY SFCL NA ŚWIECIE

Badania nadprzewodnikowych ograniczników prądu opartych na nadprzewodnikach wysokotemperaturowych prowadzone są od końca lat osiemdziesiątych ubiegłego wieku i doprowadziły do opracowania wielu różnych

konstrukcji [27]. Obecnie najbardziej popularne są nadprzewodnikowe ograniczniki prądu typu rezystancyjnego [1], [2], [29], [44], [45], [54], [75], [3], [14], [21], [74] bezrdzeniowe ograniczniki indukcyjne [58], [60], [61], [66], [79]–[82] [28] oraz ograniczniki z nasyconym rdzeniem [64], [92]. Nadprzewodnikowe ograniczniki prądu powinny być niezawodne i bezobsługowe, impedancja ograniczników podczas normalnej pracy dla prądu znamionowego powinna być bliska zeru i możliwe duża podczas ograniczania prądu zwarciovego.

TABELA 8

Wybrane nadprzewodnikowe ograniczniki prądu zwarciovego zbudowane w ostatnich kilku latach

Institut badawczy/Firma	Rok / Kraj	Parametry	Typ ogranicznika	Nadprzewodnik
Zenergy Power	2010 / USA	15 kV, 1200 A	nasycony rdzeń	taśma YBCO
RSE	2012 / Włochy	9 kV, 1000 A	rezystancyjny	taśma YBCO
KEPRI	2011 / Korea	22,9 kV, 3000 A	rezystancyjny	taśma YBCO
Nexans	2011 / Niemcy	12 kV, 800 A	rezystancyjny	taśma YBCO
Nexans	2013 / Niemcy	10 kV, 2400 A	rezystancyjny	taśma YBCO
Nexans	2013 / EU	24 kV, 1000 A	rezystancyjny	taśma YBCO
Applied Materials	2013 / USA	15 kV, 1000 A	rezystancyjny	taśma YBCO
Nexans	2015 / Niemcy	12 kV, 1600 A	rezystancyjny	taśma YBCO
IEL	2016 / Polska	15 kV, 140 A	indukcyjny	taśma YBCO
Siemens	2016 / Niemcy	12 kV, 815 A	rezystancyjny	taśma YBCO
Applied Materials	2016 / USA	115 kV, 550 A	rezystancyjny	taśma YBCO
SuperOx	2016 / Rosja	3,3 kV, 5000 A	rezystancyjny	taśma YBCO
ASG Power	2017 / UK	36 kV, 800 A	rezystancyjny	taśma YBCO
IEL	2017 / Polska	6 kV, 140 A	rezystancyjny	taśma YBCO

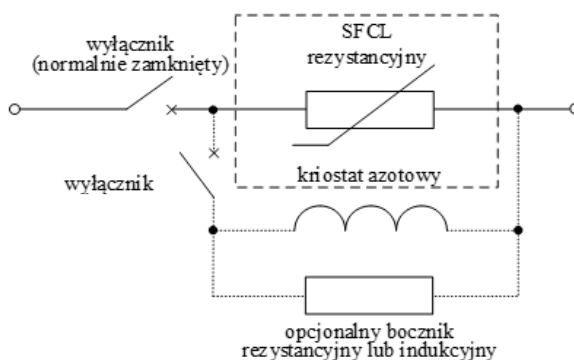
W ostatnich latach powstało wiele projektów nadprzewodnikowych ograniczników prądu (tab. 8). Do niedawna do wykonania nadprzewodnikowych ograniczników prądu używano taśm nadprzewodnikowych pierwszej generacji Bi-2223 lub cylindrów Bi-2223 [78], [83], w ostatnich latach ograniczniki wykonywane są z cienkowarstwowych taśm nadprzewodnikowych drugiej generacji z nadprzewodnikiem YBCO. W ogranicznikach typu rezystancyjnego prąd ograniczany jest przez rezystancję elementów nadprzewodnikowych wykonanych w postaci uzwojeń bezindukcyjnych, prostych odcinków taśm nadprzewodnikowych YBCO, spirali nadprzewodnikowych wykonanych z cylindrów Bi-2223.

Ograniczniki rezystancyjne mogą być podzielone na dwie grupy: na ograniczniki, w których prąd zwarciovego ograniczony jest przez uzwojenia wykonane z taśm nadprzewodnikowych, w których uzwojenia przechodzą do stanu rezystancyjnego po wystąpieniu zwarcia w zabezpieczonym obwodzie oraz ograniczniki, w których wykorzystuje się element nadprzewodnikowy jako szybki przełącznik, a prąd zwarciovego ograniczony jest przez równolegle połączony dławik lub rezystor.

5.1. Rezystancyjne nadprzewodnikowe ograniczniki prądu

Nadprzewodnikowe ograniczniki prądu typu rezystancyjnego mają najprostszą konstrukcję, element nadprzewodnikowy jest szeregowo włączony w chroniony obwód [1], [2], [8], [11], [19], [29], [44], [54], [55], [66], [88]. Przez ograniczniki rezystancyjny płynie zarówno znamionowy prąd obciążenia jak i prąd zwarciový. Po przekroczeniu prądu krytycznego taśmy nadprzewodnikowej z której wykonano ogranicznik następuje niemal natychmiastowo przejście nadprzewodnika ze stanu nadprzewodzącego do stanu rezystywnego. Schemat zastępczy ogranicznika typu rezystancyjnego przedstawia rysunek 5.1. Podczas ograniczania prądu zwarciový ogranicznik bardzo szybko nagrzewa się, dlatego powinien współpracować z szeregowo włączonym wyłącznikiem prądu, który rozłączy zabezpieczany obwód zanim przekroczona zostanie dopuszczalna temperatura maksymalna ogranicznika.

Ograniczniki rezystancyjne wymagają dwóch przepustów prądowych które łączą element nadprzewodnikowy umieszczony w kriostacie z zaciskami umieszczonymi w temperaturze pokojowej.



Rys. 5.1. Schemat rezystancyjnego ogranicznika prądu

Nadprzewodnikowe ograniczniki prądu typu rezystancyjnego charakteryzują się szybkim czasem zadziałania, wprowadzają dużą rezystancję do zabezpieczanego obwodu, mają stosunkowo małe wymiary, mogą ograniczać prąd zwarciový zarówno w obwodach prądu zmiennego jak i stałego, po wyłączeniu zwarcia samoczynnie wracają do stanu nadprzewodzącego. Ogranicznik rezystancyjny powinien wrócić do stanu nadprzewodzenia w ciągu kilku sekund od chwili wyłączenia zwarcia. Nadprzewodnikowe ograniczniki prądu typu rezystancyjnego wymagają dwóch chłodzonych przepustów prądowych, w których występują stałe straty mocy. Ogranicznik rezystancyjny wymaga również zasto-

sowania szeregowo połączonego wyłącznika prądu oraz bocznika rezystancyjnego lub indukcyjnego, aby ewentualne uszkodzenie ogranicznika nie spowodowało przerwy w obwodzie chronionym.

W ostatnio opracowanych ogranicznikach rezystancyjnych elementem ograniczającym prąd jest element nadprzewodnikowy wykonany z taśmy HTS 2G o odpowiedniej długości nawiniętej bifilarnie lub modułu nadprzewodnikowego wykonanego z wielu prostoliniowych odcinków taśmy nadprzewodnikowej II generacji połączonych szeregowo.



Rys. 5.2. Rezystancyjny ogranicznik prądu zwarciovego 24 kV, 1000 A [9], [19], [66]

Firma SuperPower opracowywała nadprzewodnikowy ogranicznik prądu typu rezystancyjnego na napięcie 138 kV. W ograniczniku zastosowano równoległe odcinki taśmy nadprzewodnikowej drugiej generacji połączone z bocznikami indukcyjnymi. Przetestowano dwa jednoczęściowe moduły ogranicznika o napięciu od 100 do 400 V z prądem znamionowym 1,2 kA [27], [102].



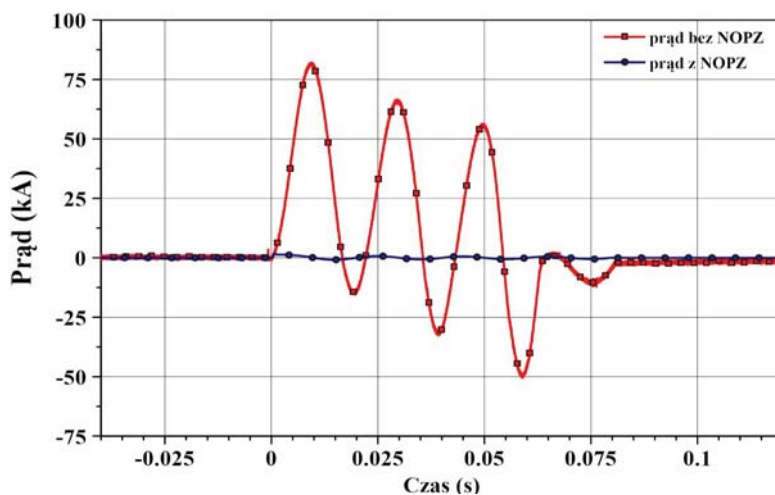
Rys. 5.3. Prototyp ogranicznika rezystancyjnego firmy SuperPower chłodzonego w kąpieli ciekłego azotu

W 2017 roku w ramach projektu NCBiR Gekon polskie konsorcjum w składzie Instytut Elektrotechniki, Przedsiębiorstwo Badawczo-Wdrożeniowe Frako-Term sp. z o.o. i Uniwersytet Zielonogórski wykonało projekt rezystancyjnego ogranicznika prądu zwarciovego dla sieci o napięciu 6 kV i prąd zna-

mionowy 140 A z możliwością przeciążenia do 420 A. Prototyp został przetestowany w Laboratorium Badawczym Aparatury Rozdzielczej Instytutu Elektrotechniki oraz próbnie zainstalowany w rozdzielni GS2 110 kV / 6 kV na terenie Instytutu Elektrotechniki w Warszawie. Ogranicznik rezystancyjny jest chłodzony kontaktowo za pomocą jednostopniowej kriołodziarki (rys. 5.4). Ogranicznik skutecznie ograniczył szczytową wartość prądu zwarciovego z 81 kA do 2 kA (rys. 5.5).



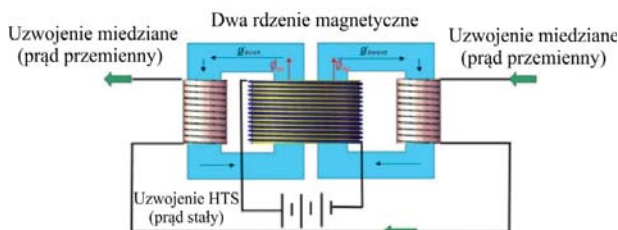
Rys. 5.4. Prototyp ogranicznika rezystancyjnego chłodzonego kontaktowo
(konsorcjum: Instytut Elektrotechniki, Uniwersytet Zielonogórski, Frako-Term sp. z o.o.)



Rys. 5.5. Przebiegi prądu bez ogranicznika i z ogranicznikiem dla rezystancyjnego ogranicznika chłodzonego kriołodziarką (konsorcjum IEL, UZ i Frako-Term sp. z o.o.)

5.2. Nadprzewodnikowe ograniczniki prądu z nasyconym rdzeniem

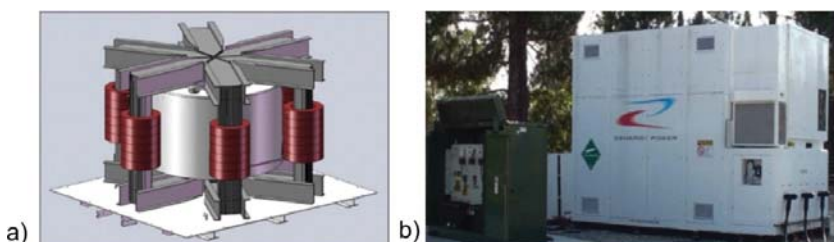
Zasadę działania nadprzewodnikowego ogranicznika prądu z nasyconym rdzeniem przedstawia rysunek 5.6 [16], [20], [25], [57], [90], [93]. Ogranicznik z nasyconym rdzeniem wykorzystuje dwa rdzenie magnetyczne na jedną fazę. Ogranicznik z nasyconym rdzeniem wykorzystuje nieliniową charakterystykę magnesowania rdzenia do zmiany impedancji ogranicznika oraz uzwojenie nadprzewodnikowe zasilane prądem stałym do podmagnesowania rdzenia. Podczas pracy przy prądzie znamionowym nasycony rdzeń powoduje, że ogranicznik ma małą impedancję. Podczas zwarcia wzrost prądu w uzwojeniu konwencjonalnym ogranicznika powoduje wyjście rdzenia z nasycenia i wzrost impedancji ogranicznika. W ograniczniku z nasyconym rdzeniem uzwojenie nadprzewodnikowe nie przechodzi do stanu rezystywnego.



Rys. 5.6. Zasada działania ogranicznika z nasyconym rdzeniem [56]

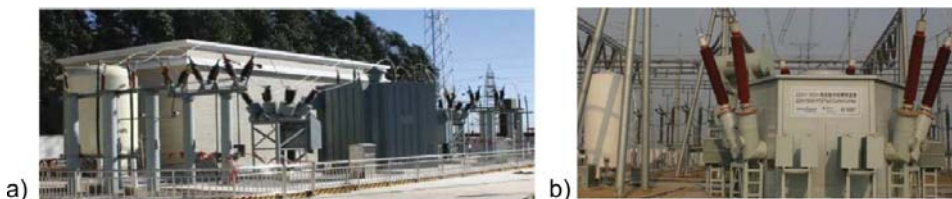
Największą zaletą tego typu ogranicznika jest prosta budowa i bezpieczny tryb pracy. Zwarcia o długim czasie zwarcia są ograniczane, a przejście do stanu wyczekiwania ogranicznika jest niemal natychmiastowe, co pozwala ograniczyć wiele następujących po sobie zwarć w krótkim czasie. Ograniczniki tego typu nie wymagają kriogenicznych przepustów prądowych, wymagają dużych i ciężki rdzeni magnetycznych, mają bardzo duże gabaryty. Ograniczniki z nasyconym rdzeniem rozwijane są m.in. przez firmę Zenergy Power w USA (rys. 5.7) oraz chińskie instytuty badawcze (rys. 5.8).

Największą zaletą tego typu ogranicznika jest prosta budowa i bezpieczny tryb pracy. Zwarcia o długim czasie zwarcia są ograniczane, a przejście do stanu wyczekiwania ogranicznika jest niemal natychmiastowe, co pozwala ograniczyć wiele następujących po sobie zwarć w krótkim czasie. Ograniczniki tego typu nie wymagają kriogenicznych przepustów prądowych, wymagają dużych i ciężki rdzeni magnetycznych, mają bardzo duże gabaryty. Ograniczniki z nasyconym rdzeniem rozwijane są m.in. przez firmę Zenergy Power w USA (rys. 5.7) oraz chińskie instytuty badawcze (rys. 5.8).



Rys. 5.7. Prototyp ogranicznika firmy Zenergy:

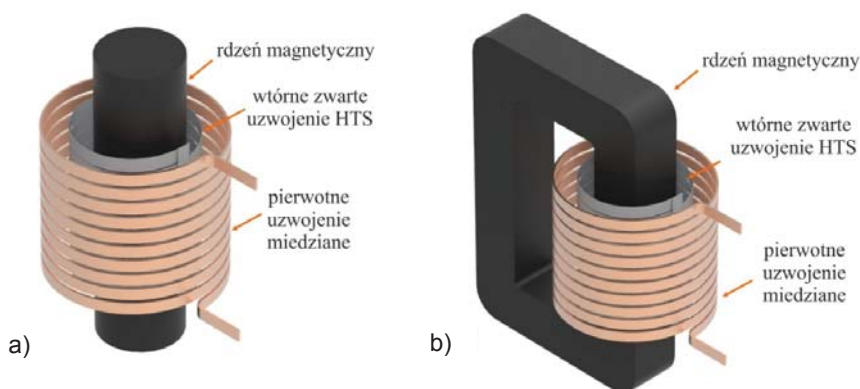
a) projekt koncepcyjny, b) ogranicznik 15 kV 1200 A zainstalowany w stacji SCE Shandin Substation w San Bernardino, USA [27], [57]



Rys. 5.8. Chińskie prototypy ograniczników zainstalowane w Kunming i Tianjin
a) 35 kV 90 MVA, b) 220 kV 300 MVA [20], [25]

5.3. Nadprzewodnikowe ograniczniki prądu typu indukcyjnego z ekranowanym rdzeniem

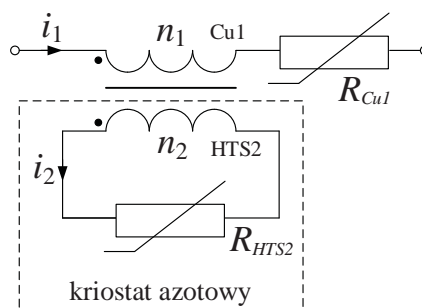
Ogranicznik z ekranowanym rdzeniem składa się z dwóch uzwojeń: nadprzewodnikowego i miedzianego umieszczonego współśrodkowo na rdzeniu magnetycznym (rys. 5.9). Podczas pracy w warunkach znamionowych rdzeń jest ekranowany, ponieważ strumień od uzwojenia pierwotnego jest kompensowany przez strumień od zwartego nadprzewodnikowego uzwojenia wtórnego. Podczas zwarcia wzrasta prąd indukowany w zwartym wtórnym uzwojeniu nadprzewodnikowym. Prąd indukowany w uzwojeniu wtórnym przekracza prąd krytyczny nadprzewodnika i uzwojenie nadprzewodnikowe przechodzi do stanu rezystywnego. Rezystancja uzwojenia wtórnego powoduje zmniejszenie kompensacji strumienia od uzwojenia pierwotnego. Po wyłączeniu zwarcia ogranicznik musi powrócić do stanu nadprzewodzącego przy prądzie znamionowym. W pierwszych ogranicznikach tego typu stosowano pierścienie Bi-2212, później zastąpiono je uzwojeniami z taśmą HTS 2G [23], [27], [67], [68], [56].



Rys. 5.9. Ograniczniki prądu typu indukcyjnego z rdzeniem magnetycznym otwartym (a) i zamkniętym (b)

Na rysunku 5.10 przedstawiono uproszczony schemat zastępczy nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu indukcyjnego z rdzeniem magnetycznym.

Rys. 5.10. Schemat zastępczy ogranicznika indukcyjnego z rdzeniem magnetycznym



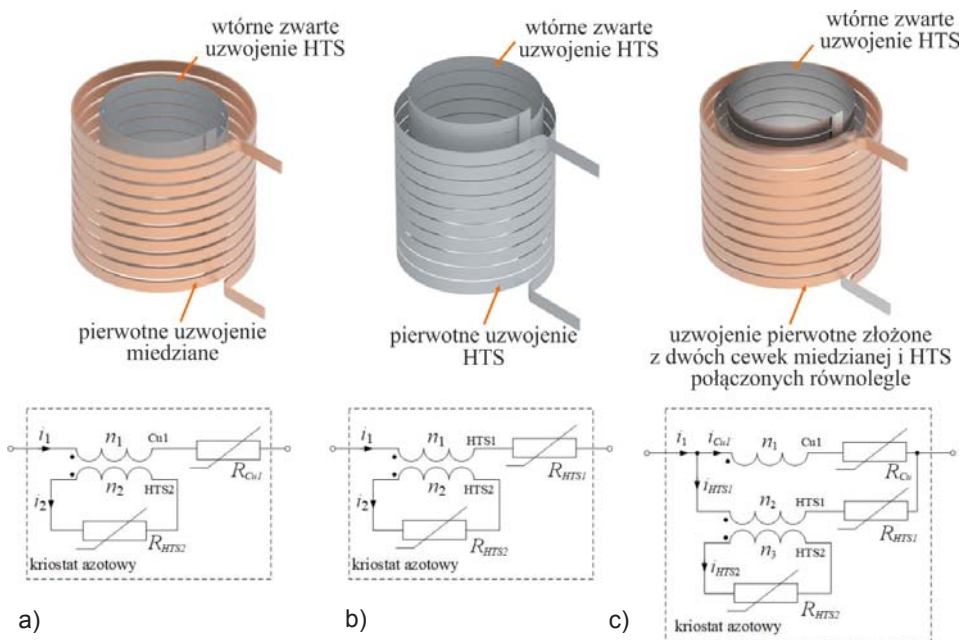
Ograniczniki prądu typu indukcyjnego z ekranowanym rdzeniem mają duże wymiary i masę. Uzwojenie nadprzewodnikowe musi być umieszczone w niemetalicznym kriostacie. Zastosowanie kriostatu do chłodzenia uzwojenia nadprzewodnikowego powoduje wytworzenie dużej szczeliny pomiędzy miedzianym uzwojeniem pierwotnym i wtórnym nadprzewodnikowym, w konsekwencji występowanie dużego strumienia rozproszenia i spadek napięcia na ograniczniku przy prądzie znamionowym.

Modele fizyczne nadprzewodnikowych ograniczników prądu typu indukcyjnego z rdzeniem magnetycznym były wykonywane głównie dla sieci niskiego napięcia. W ogranicznikach indukcyjnych można stosować rdzeń magnetyczny otwarty lub zamknięty, jednak zastosowanie rdzenia magnetycznego w ograniczniku o dużej mocy wiąże się z dużymi gabarytami i masą rdzenia magnetycznego, z przeprowadzonych symulacji wynika, że rdzeń magnetyczny dla ogranicznika typu indukcyjnego o parametrach znamionowych 6,9 kV / 1,15 kA powinien posiadać rdzeń magnetyczny o średnicy 1 metra [24].

5.4. Bezrdzeniowe nadprzewodnikowe ograniczniki prądu typu indukcyjnego

W Pracowni Technologii Nadprzewodnikowych Instytutu Elektrotechniki od blisko 10 lat prowadzone są badania nad opracowaniem bezrdzeniowego ogranicznika prądu typu indukcyjnego [22], [24], [30]–[36], [47]–[51]. Obecnie prace nad podobną konstrukcją prowadzone są głównie w niemieckim Karlsruhe Institute of Technology [58]–[61], [79]–[82]. Prowadzone badania doprowadziły do opracowania szeregu różnych konstrukcji ograniczników. Pierwotne uzwojenie włączone szeregowo w obwód chroniony może być wykonane z przewodu miedzianego (rys. 5.11a), z taśmy nadprzewodnikowej (rys. 5.11b) lub dwóch cewek miedzianej i nadprzewodnikowej połączonych równolegle (rys. 5.11c i 5.12). Każda z tych konstrukcji charakteryzuje się innymi cechami. Jeżeli pierwotne uzwojenie ogranicznika wykonane jest z prze-

wodu miedzianego, podczas przepływu prądu znamionowego występują stałe straty energii w uzwojeniu pierwotnym. Jeżeli uzwojenie pierwotne wykonane jest z taśmy nadprzewodnikowej straty energii w uzwojeniu pierwotnym prawie nie występują, ograniczone są do strat zmiennoprądowych w taśmach nadprzewodnikowych (rys. 5.11a i rys. 5.11c). Uzwojenie wtórne ogranicznika we wszystkich konstrukcjach wykonane jest z taśmy nadprzewodnikowej i stanowi zwarte zwoje.



Rys. 5.11. Bezrdzeniowe ograniczniki prądu typu indukcyjnego:

a) z miedzianym uzwojeniem pierwotnym, b) z nadprzewodnikowym uzwojeniem pierwotnym, c) trójzwojowy nadprzewodnikowy ogranicznik prądu

W ograniczniku z miedzianym uzwojeniem pierwotnym podczas ograniczania prądu do stanu rezystywnego przechodzi wtórne uzwojenie nadprzewodnikowe. Ewentualne uszkodzenie termiczne uzwojenia nadprzewodnikowego nie powoduje otwarcia zabezpieczanego obwodu, ponieważ w zabezpieczanym obwodzie nadal znajduje się szeregowo włączone miedziane uzwojenie pierwotne.

Przepływ prądu zwarciovego przez ogranicznik w którym oba uzwojenia wykonane są z taśmy nadprzewodnikowej powoduje przejście do stanu rezystywnego obu uzwojeń. W przypadku termicznego uszkodzenia uzwojenia

pierwotnego ogranicznika następuje trwała przerwa w zabezpieczanym obwodzie. Problem ten został rozwiązany w ograniczniku trójuzwojeniowym, w którym uzwojenie pierwotne złożone jest z dwóch cewek miedzianej i nadprzewodnikowej połączonych równoległe. W przypadku uszkodzenia pierwotnego uzwojenia HTS obwód nadal pozostaje zamknięty. Umieszczenie wszystkich uzwojeń ogranicznika w kriostacie azotowym pozwala na zmniejszenie szczeliny powietrznej pomiędzy uzwojeniem pierwotnym i wtórnym ogranicznika, zmniejszenie strumienia rozproszenia, dzięki czemu napięcie na ograniczniku przy przepływie prądu znamionowego zostaje zminimalizowane. Umieszczenie uzwojeń w jednym kriostacie pozwala na wyeliminowanie jednej z największych wad ogranicznika indukcyjnego z ekranowanym rdzeniem.

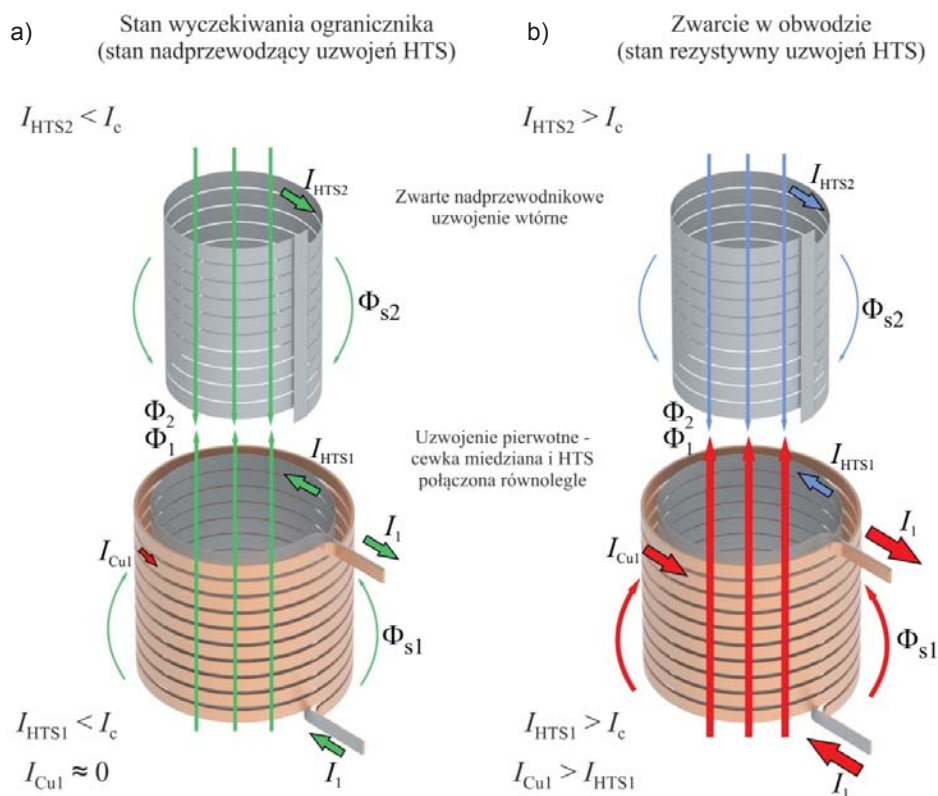


Rys. 5.12. Trójuzwojeniowy bezrdzeniowy nadprzewodnikowy ogranicznik prądu typu indukcyjnego

Ze względu na konieczność zapewnienia elementom nadprzewodnikowym temperatury pracy niższej od temperatury krytycznej uzwojenia nadprzewodnikowe umieszczone są w kriostacie azotowym wypełnionym ciekłym azotem. Jeżeli uzwojenie pierwotne wykonane jest z przewodu miedzianego może być ono również chłodzone w kriostacie azotowym. Chłodzenie pierwotnego uzwojenia miedzianego w kąpielii ciekłego azotu pozwala na znaczne zmniejszenie przekroju poprzecznego przewodu miedzianego przy zachowaniu tego samego prądu znamionowego, zapewnia również lepsze sprzężenie magnetyczne pomiędzy uzwojeniami pierwotnym i wtórnym. Tak wykonana konstrukcja ogranicznika indukcyjnego pozwala na istotne zredukowanie masy

i rozmiarów uzwojenia miedzianego, ponieważ rezystywność miedzi jest około 7,6 razy mniejsza w temperaturze 77,4 K w stosunku do rezystywności w temperaturze pokojowej.

W nadprzewodnikowych ogranicznikach prądu typu indukcyjnego wykorzystywane jest przejście uzwojenia nadprzewodnikowego ze stanu nadprzewodzącego do stanu rezystywnego, gdy prąd indukowany we wtórnym zwartym uzwojeniu nadprzewodnikowym przekroczy wartość krytyczną. Zasada działania trójuzwojeniowego bezrdzeniowego ogranicznika prądu typu indukcyjnego została przedstawiona na rysunku 5.13. Wszystkie uzwojenia ogranicznika są umieszczone współśrodkowo, na rysunku uzwojenie wtórne nadprzewodnikowe zostało wysunięte do góry w celu zwiększenia czytelności.



Rys. 5.13. Zasada działania trójuzwojeniowego nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu indukcyjnego: a) stan wyczekiwania ogranicznika, b) ograniczanie prądu zwarciovego w chronionym obwodzie

W normalnych warunkach pracy trójuzwojeniowego ogranicznika uzwojenia nadprzewodnikowe znajduje się w stanie nadprzewodzącym. Podział prądu znamionowego pomiędzy cewkami uzwojenia pierwotnego uzależniony jest od impedancji cewek oraz od stopnia sprzężenia magnetycznego cewek uzwojenia pierwotnego ze zwartym nadprzewodnikowym uzwojeniem wtórnym. Jeżeli cewka HTS ma zbliżona indukcyjność do cewki miedzianej uzwojenia pierwotnego prąd znamionowy płynie przez cewkę HTS. Zmienny w czasie strumień magnetyczny wytworzony przez prąd płynący przez uzwojenie pierwotne ogranicznika indukuje we wtórnym zwartym uzwojeniu nadprzewodnikowym prąd, który wytwarza strumień magnetyczny przeciwnie skierowane do strumienia magnetycznego uzwojenia pierwotnego, całkowicie go znosząc, co objawia się niską impedancją układu. Napięcie na ograniczniku w stanie wyczekiwania jest wynikiem spadku napięcia na rezystancji uzwojenia pierwotnego (głównie rezystancja przepustów prądowych i połączeń lutowanych) oraz spadku napięcia na reaktancji rozproszenia.

Z chwilą wystąpienia zwarcia w obwodzie chronionym, prądy w uzwojeniu pierwotnym i wtórnym nadprzewodnikowym gwałtownie rosną. Po przekroczeniu wartości krytycznej we wtórnym uzwojeniu nadprzewodnikowym, gwałtownie rośnie jego rezystancja, a jego przepływ maleje. Strumień magnetyczny wytwarzany przez uzwojenie pierwotne nie jest kompensowany w pełni przez przeciwnie skierowany strumień uzwojenia wtórnego i ogranicznik dla obwodu chronionego zachowuje się jak dławik o dużej indukcyjności. Gwałtowny wzrost indukcyjności ogranicznika ogranicza prąd zwarcia. Wartość napięcia na ograniczniku zależy głównie od jego wymiarów, parametrów nadprzewodnikowego uzwojenia wtórnego.

W przypadku ograniczników prądu, w których uzwojenie pierwotne składa się z dwóch cewek: nadprzewodnikowej i miedzianej, połączonych równolegle prąd znamionowy płynie głównie przez cewkę nadprzewodnikową o bardzo małej rezystancji w porównaniu do cewki miedzianej.

Po przekroczeniu prądu krytycznego w cewce nadprzewodnikowej uzwojenia pierwotnego przechodzi ono również do stanu rezystywnego. Wzrost rezystancji cewki nadprzewodnikowej uzwojenia nadprzewodnikowego powoduje zmianę rozpyłu prądu, ograniczony prąd zwarcia płynie głównie przez miedzianą cewkę uzwojenia pierwotnego ogranicznika. W stanie ograniczania prądu, po przejściu cewki nadprzewodnikowej uzwojenia pierwotnego do stanu rezystywnego prąd zwarcia przepływa również przez uzwojenie miedziane. Wraz ze wzrostem temperatury cewek uzwojenia pierwotnego rozpył prądu zwarcia pomiędzy cewką nadprzewodnikową i cewką miedzianą ulega zmianie.

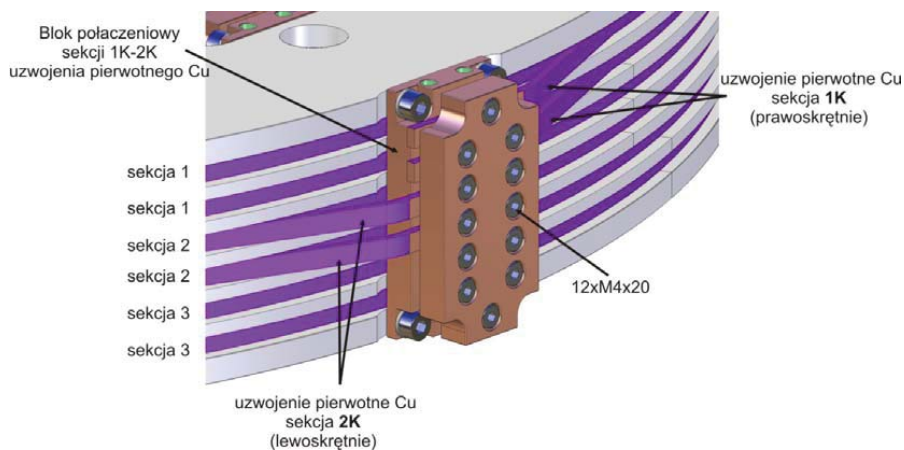
6. NADPRZEWODNIKOWY OGRANICZNIK PRĄDU ZWARCIOWEGO 6,9 KV / 600 A

W rozdziale przedstawiano trójzwojeniowy bezrdzeniowy nadprzewodnikowy ogranicznik prądu zwarciovego na napięciu 6,9 kV i prąd znamionowy 600 A. Ogranicznik został zaprojektowany i wykonany w Pracowni Technologii Nadprzewodnikowej Instytutu Elektrotechniki. W kolejnych podrozdziałach opisano model fizyczny i numeryczny ogranicznika, przedstawiono poszczególne etapy wykonania ogranicznika, wyniki pomiarów parametrów elektrycznych ogranicznika oraz wyniki przeprowadzonego testu zwarciovego [31], [32], [35].

6.1. Model fizyczny ogranicznika prądu 6,9 kV / 600 A

6.1.1. Pierwotne uzwojenie miedziane ogranicznika

Pierwotne uzwojenie miedziane ogranicznika nawinięte jest na karkasie zewnętrznym i składa się z 3 sekcji (rys. 6.1). Każda sekcja składa się z dwóch cewek krążkowych po 12 zwojów połączonych równoległe. Sekcje 1 i 3 (zewnętrzne) nawinięte są w jednym kierunku natomiast sekcja 2 (środkowa) w kierunku do nich przeciwnym umożliwiając łatwe ich połączenia w szereg w dwóch dodatkowych blokach połączeniowych umieszczonych jeden od wewnętrznej strony drugi od strony zewnętrznej.

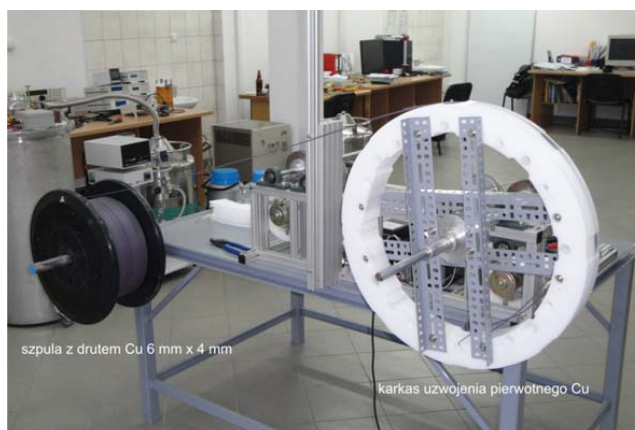


Rys. 6.1. Połączenie sekcji miedzianego uzwojenia pierwotnego modułu ogranicznika

Karkas pierwotnego uzwojenia miedzianego składa się z ośmiu identycznych elementów wykonanych z materiału TECAFORM-AH (POM-C) (rys. 6.2a). Elementy te są ze sobą połączone, a następnie skręcone śrubami ze stali nierdzewnej. Całość karkasu stanowi zwartą i sztywną konstrukcję. Uzwojenia miedziane ogranicznika nawinięte zostały na nawijarce z płynną regulacją obrotów (rys. 6.3). W karkasie jest sześć rowków, w których zostały nawinięte po 12 zwojów drutu miedzianego w podwójnej izolacji o przekroju prostokątnym 6 mm x 3 mm.



Rys. 6.2. Element karkasu uzwojenia pierwotnego (a), zmontowany karkas uzwojenia pierwotnego miedzianego jednego modułu ogranicznika (b)



Rys. 6.3. Nawijanie uzwojenia pierwotnego miedzianego ogranicznika prądu

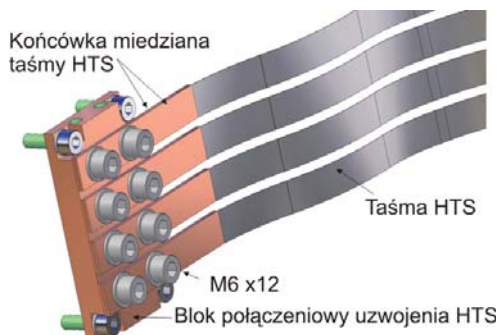
Uzwojenia nawijane były z naciągami. Po nawinięciu sześciu cewek na karkas modułu poszczególne cewki zostały połączone ze sobą za pomocą miedzianych bloków połączeniowych przykręconych w odpowiednich miejscach karkasu (rys. 6.4).



Rys. 6.4. Pierwotne uzwojenia miedziane ogranicznika 6,9 kV / 600 A złożone z czterech modułów po zamontowaniu miedzianych bloków połączeniowych

6.1.2. Uzwojenie nadprzewodnikowe ogranicznika

Uzwojenia nadprzewodnikowe są nawinięte taśmą HTS drugiej generacji SF12050, izolacja międzyzwojowa została wykonana taśmą poliimidową o grubości 0,05 mm. Do końców uzwojeń są przylutowane po obu stronach taśmy HTS końcówki miedziane wykonane z blachy o grubości 1 mm i szerokości 12 mm zakończone dwoma otworami. Końcówki miedziane są przykręcone do bloku połączeniowego uzwojenia HTS dwoma śrubami M6 z podkładką sprężynową.



Rys. 6.5. Sposób zamocowania końcówek taśm nadprzewodnikowych do bloku połączeniowego

Uzwojenie pierwotne nadprzewodnikowe znajduje się na karkasie wewnętrznym. Uzwojenie to jest (w celu zwiększenia prądu krytycznego uzwojenia) połączeniem równoległym czterech identycznych sekcji z taśmy nadprzewodnikowej po 10 zwojów każda.

Uzwojenie wtórne nadprzewodnikowe znajduje się również na karkasie wewnętrznym. Uzwojenie to jest połączeniem równoległym czterech identycznych sekcji z taśmy nadprzewodnikowej po 10 zwojów każda w celu zwiększenia prądu krytycznego uzwojenia.

TABELA 9

Parametry taśmy polimidowej użytej do izolowania uzwojeń nadprzewodnikowych

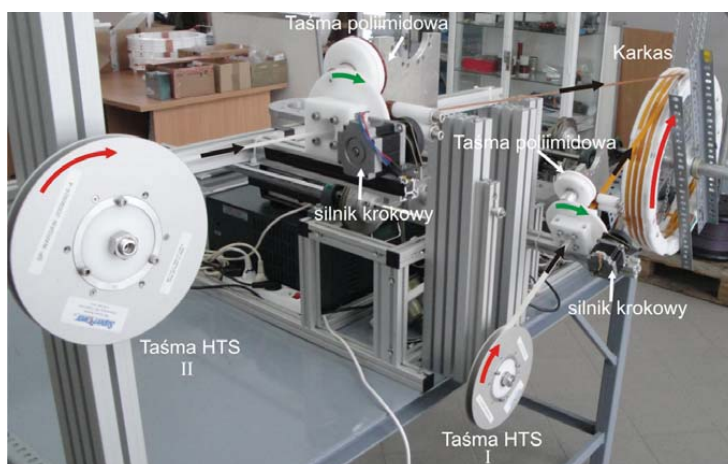
Parametr	Wartość
Standardowe kolory	przezroczysty brązowy
Nośnik	poliimid
Grubość nośnika	0,025 mm +/- 10%
Rodzaj kleju	silikon
Grubość całkowita	wartość średnia 0,060 mm (min. 0,054 mm)
Chwytność	wartość średnia 3,0 N / 10 mm
Siła odrywająca od płyty	(min. 2,4 N/ 10 mm)
Siła zrywająca	33 N / 10 mm
Wydłużenie przy zerwaniu	20%
Napięcie przebicia	5500 V _{eff}
Klasa cieplna	180°C / H
Nie podtrzymuje palenia	UL510
Stopień elektrolitycznej odporności korozyjnej	1

Uzwojenia nadprzewodnikowe nawinięte zostały na karkasie składającym się z ośmiu identycznych elementów wykonanych obróbką skrawaniem CNC z materiału TECAFORM-AH (POM-C). Elementy te po ustawieniu i skręceniu śrubami tworzą okrągły karkas dla uzwojeń nadprzewodnikowych. W trakcie nawijania dwie izolowane taśmy nadprzewodnikowe były nawijane jednocześnie w jednym rowku. Obie taśmy podczas nawijania izolowane były taśmą polimidową o szerokości 4,5 mm z klejem z zakładką o szerokości 1 mm na specjalnie przygotowanej do tego celu nawijarce wyposażonej dodatkowo w dwa zsynchronizowane zespoły służące do owijania (rys. 6.7). W nawijarce użyto trzy silniki krokowe zasilane przez sterowniki silników krokowych i sterowane z generatora. Dwa silniki służyły do napędu owijarek, trzeci zaś do napędu karkasu, na który nawijana jest taśma nadprzewodnikowa. Synchronizacja działania trzech silników pozwalała na nawijanie uzwojenia z jednoczesnym owijaniem taśmy ze stałą zakładką, dla całego zakresu prędkości obrotowych silników. Owijanie taśmy nadprzewodnikowej wykonywane było dla prędkości obrotowej tarczy (na której zamocowana

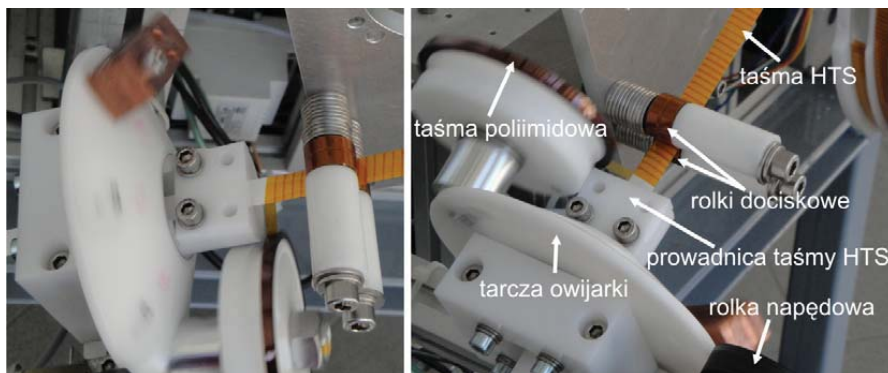
jest rolka z taśmą poliimidową) około 2 obrotów na sekundę co pozwala izolować 1 m taśmy nadprzewodnikowej w czasie około 2 min. Taki sposób izolowania zapewnia odpowiednią izolację pomiędzy pierwotnym i wtórnym uzwojeniem nadprzewodnikowym. Dla zastosowanej taśmy poliimidowej o grubości nośnika 25 μm napięcie przebicia wynosi 5,5 kV. Podstawowe parametry taśmy poliimidowej użytej do izolowania uzwojeń zamieszczono w tabeli 9.



Rys. 6.6. Karkasy uzwojeń nadprzewodnikowych czterech modułów wykonane z TECAFORM-AH (POM-C)



Rys. 6.7. Nawijanie uzwojeń nadprzewodnikowych (pierwotnego i wtórnego) z jednoczesnym owijaniem taśmy HTS izolacyjną taśmą poliimidową



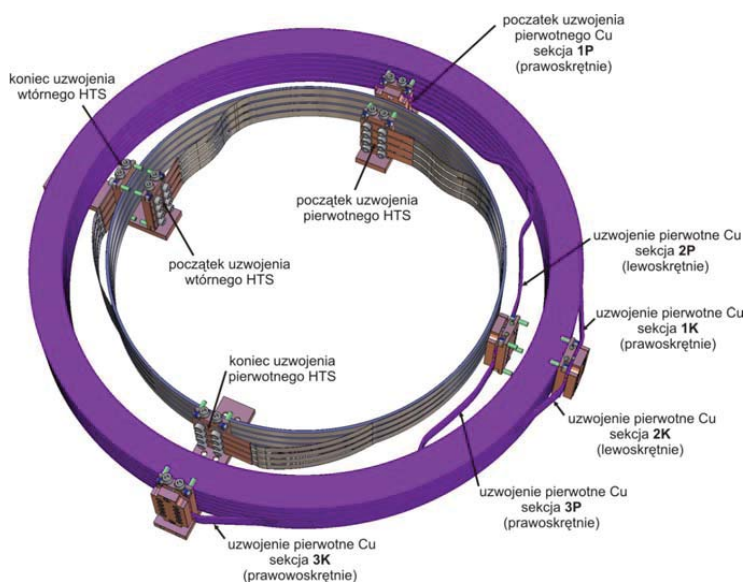
Rys. 6.8. Izolowanie taśmy HTS przez owijanie taśmą poliimidową z zakładką 1 mm



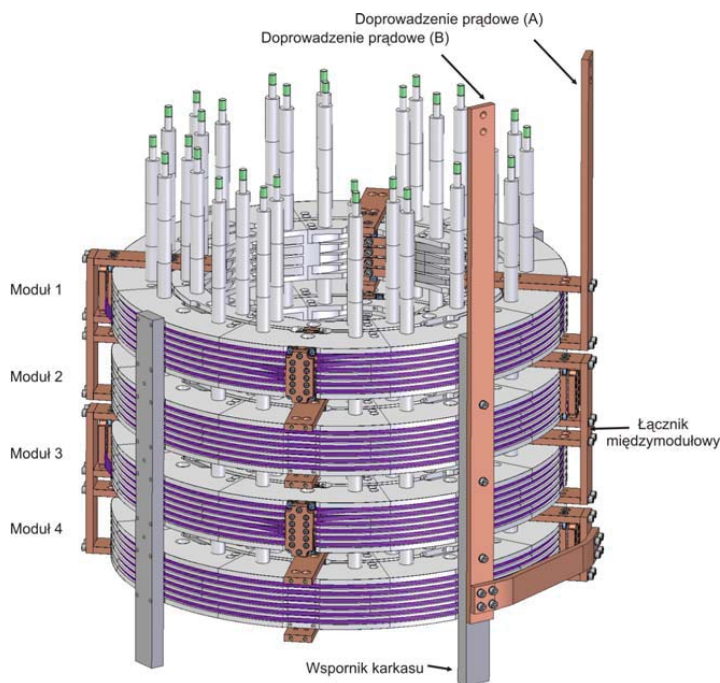
Rys. 6.9. Nawijanie z naciąganiem izolowanej taśmy HTS na karkas modułu ogranicznika

6.1.3. Montaż modułów nadprzewodnikowego ogranicznika prądu

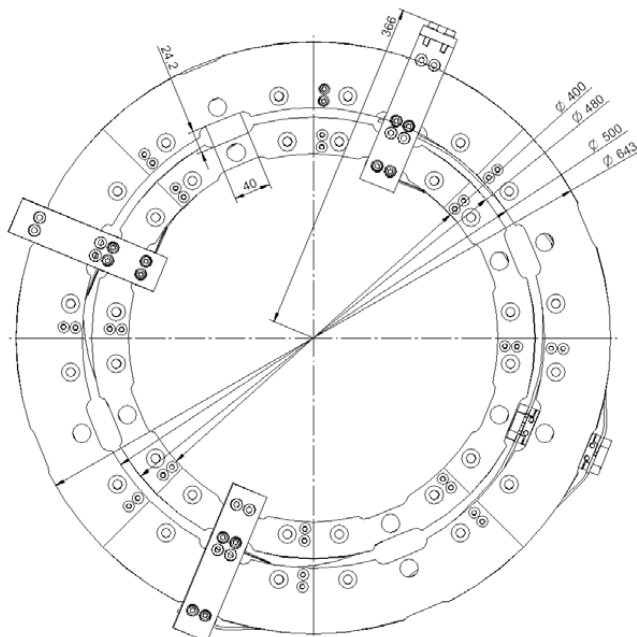
Połączenia pomiędzy modułami zrealizowane są poprzez łączniki między-modułowe wykonane z płaskownika miedzianego o wymiarach 10 mm na 40 mm. Moduły są obrócone o 180 stopni, tak aby połączenie końca modułu z początkiem następnego było najkrótsze.



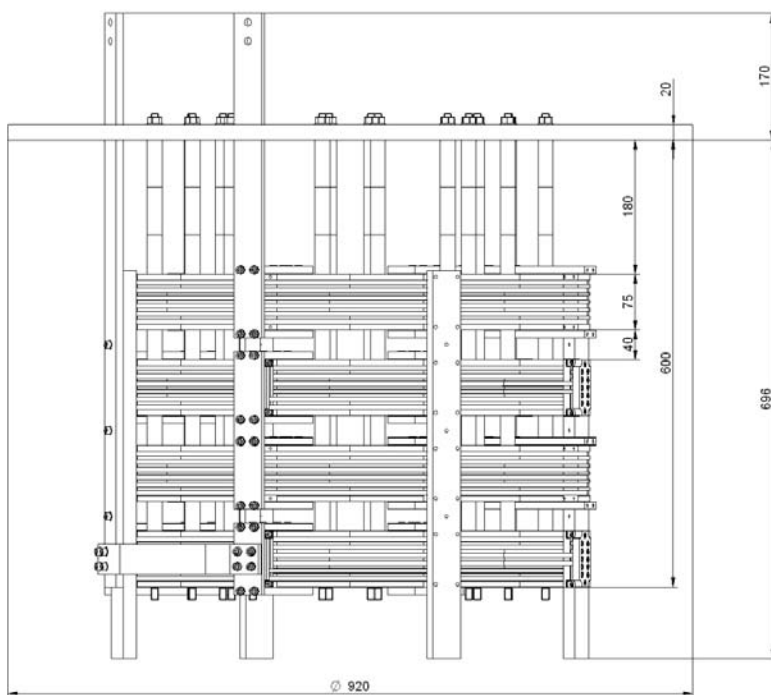
Rys. 6.10. Połączenia elektryczne uzwojeń modułu nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu indukcyjnego



Rys. 6.11. Połączenia pomiędzy modułami



Rys. 6.12. Podstawowe wymiary modułu nadprzewodnikowego ogranicznika prądu

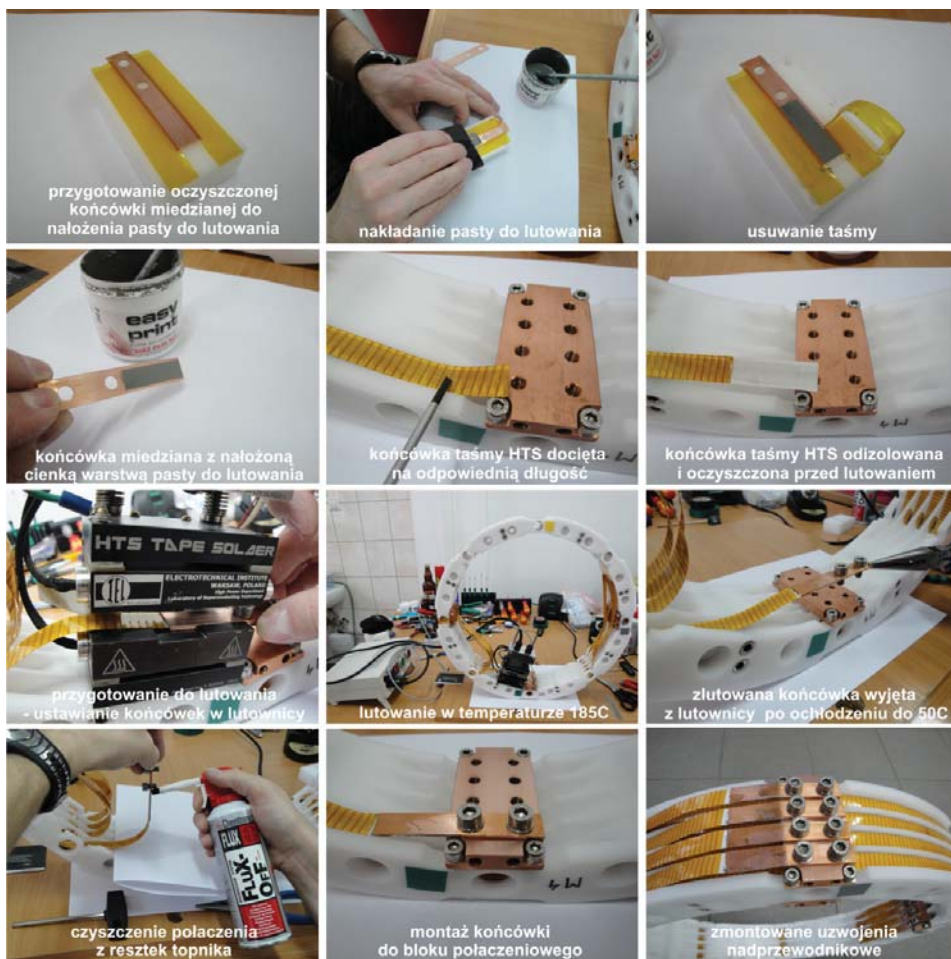


Rys. 6.13. Nadprzewodnikowy ogranicznik prądu - wymiary gabarytowe

Doprowadzenia prądowe ogranicznika wykonane są z miedzianego płaskownika 10 mm x 40 mm. Doprowadzenie prądowe (A) przymocowane jest do wspornika kriostatu i połączone z początkiem uzwojenia pierwotnego pierwszego (dolnego) modułu. Doprowadzenie prądowe (B) zamocowane jest bezpośrednio do czwartego (górnego) modułu (rys. 6.11).

Podstawowe wymiary pojedynczego modułu ogranicznika oraz całego ogranicznika zamieszczono na rysunkach 6.12 i 6.13.

Karkas z nawiniętymi uzwojeniami nadprzewodnikowymi po zdjęciu z nawijarki przenoszony był na stanowisko lutowania końcówek. Proces montażu miedzianych końcówek do taśmy nadprzewodnikowej przedstawiono krok po kroku na rysunku 6.14.

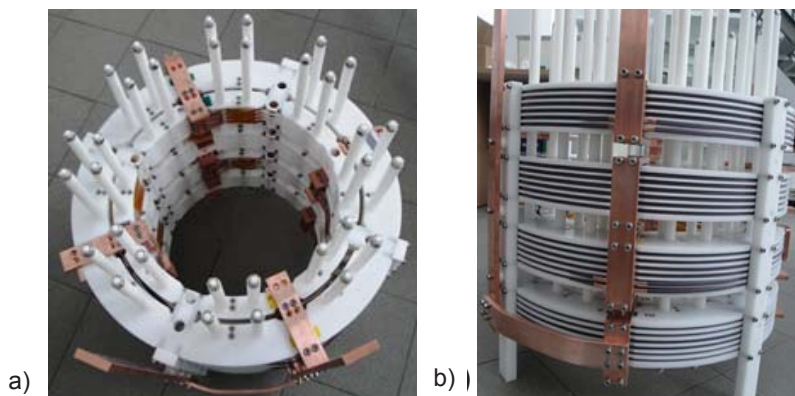


Rys. 6.14. Proces montażu końcówek miedzianych taśm HTS [52]

Przed przystąpieniem do lutowania montowane były miedziane bloki połączeniowe po zewnętrznej stronie karkasu, a następnie taśma nadprzewodnikowa była odcinana do odpowiedniej długości. W kolejnym kroku końcówki taśm nadprzewodnikowych były odizolowane przez usunięcie taśmy poliimidowej na długości około 45 mm, a następnie na oczyszczone i odtłuszczone wcześniej końcówki miedziane nanoszona była cienka warstwa pasty do lutowania Sn62Pb36Ag2 o temperaturze topnienia 179°C w sposób przedstawiony na rysunku 6.14. W lutownicy umieszcza się najpierw dolną końcówkę miedzianą, następnie taśmę HTS i górną końcówkę miedzianą. Lutownice zamyka się, a dwie sprężyny w lutownicy zapewniają odpowiedni docisk podczas lutowania. Ilość pasty do lutowania jest tak dobrana, aby połączenie było prawidłowe bez nadmiernego wyływania kropelek lutu. Po ochłodzeniu się lutownicy do około 50°C zlutowana końcówka jest wyciągana z lutownicy i czyszczona z resztek topnika preparatem Flux-off. Tak przygotowane końcówki przykręcane są śrubami ze stali nierdzewnej do miedzianego bloku połączeniowego.



Rys. 6.15. Montaż ogranicznika 6,9 kV / 600 A



Rys. 6.16. Ogranicznik 6,9 kV / 600 A:

a) widok z góry, b) widok z boku

Karkas uzwojeń nadprzewodnikowych umieszczony jest wewnątrz karkasu uzwojenia miedzianego, cztery kostki dystansowe wykonane są z tego samego materiału co karkasy. Całość skręcona jest śrubami M5 x 60 od wewnętrznej strony karkasu uzwojeń nadprzewodnikowych przez kostki do karkasu uzwojenia miedzianego. Łączniki miedziane po obu stronach modułu skręcone są śrubami M6 x 12. Kolejne moduły nakładane są jeden na drugi oddzielone tulejami dystansowymi o wysokości 64 mm, które wchodzi w zagłębienia 12 mm w karkas, 32 tuleje oddzielają jeden moduł od drugiego usztywniając konstrukcję.

TABELA 10

Parametry jednego modułu uzwojenia pierwotnego HTS

Parametry taśmy HTS	Wartość
Szerokość	12 mm
Grubość	0,55 mm
Prąd krytyczny	~300 A
Parametry uzwojenia pierwotnego HTS dla modułu	
Średnica wewnętrzna uzwojenia	454,4 mm
Średnica zewnętrzna uzwojenia	466,2 mm
Liczba rowków w karkasie	4
Liczba taśm połączonych równolegle	4
Liczba zwojów w rowku	10,5
Liczba zwojów w module	10,5
Średnia długość taśmy / zwoj	1,45 m
Długość taśmy / uzwojenie	15,22 m
Długość taśmy / moduł	60,88 m
Rezystancja uzwojenia w temp. 20 °C	8,2178 Ω
Rezystancja uzwojenia w temp. 77,4 K	0 Ω
Indukcyjność uzwojenia	90 μH

Ogranicznik jest podwieszony do pokrywy kriostatu przy pomocy 32 szpilek przechodzących przez tuleje i moduły. W tabeli 10 zebrane zostały najważniejsze parametry wykonanych uzwojeń nadprzewodnikowego ogranicznika prądu 6,9 kV / 600 A, ich wymiary i właściwości elektryczne, w tabeli 11 parametry jednego modułu uzwojenia wtórnego HTS, a w tabeli 12 parametry jednego modułu miedzianego uzwojenia pierwotnego.

TABELA 11

Parametry jednego modułu uzwojenia wtórnego HTS

Parametry taśmy HTS	Wartość
Szerokość	12 mm
Grubość	0,55 mm
Prąd krytyczny	~300 A
Parametry uzwojenia wtórnego HTS dla modułu	
Średnica wewnętrzna uzwojenia	454,4 mm
Średnica zewnętrzna uzwojenia	466,2 mm
Liczba taśm połączonych równolegle	4
Liczba zwojów w rowku	10
Średnia długość taśmy / zwój	1,43 m
Długość taśmy / moduł	57,6 m
Rezystancja uzwojenia w temp. 20 °C	8,2 Ω
Rezystancja uzwojenia w temp. 77,4 K	0 Ω
Indukcyjność uzwojenia	80 μH

TABELA 12

Parametry jednego modułu uzwojenia pierwotnego Cu

Parametry profilu miedzianego	Wartość
Szerokość	6,2 mm
Grubość	3,2 mm
Pole przekroju poprzecznego miedzi	18 mm ²
Parametry uzwojenia pierwotnego Cu dla modułu	
Średnica wewnętrzna uzwojenia	556,6 mm
Średnica zewnętrzna uzwojenia	628,6 mm
Liczba rowków w karkasie	6
Liczba zwojów w rowku	12
Liczba zwojów w module	36
Średnia długość drutu na 1 zwój	1,75 m
Długość drutu / uzwojenie	22,34 m
Długość drutu / moduł	134,04 m
Rezystancja uzwojenia w temp. 20 °C	35 mΩ
Rezystancja uzwojenia w temp. 77,4 K	4,67 mΩ
Indukcyjność uzwojenia	1,25 mH

6.1.4. Kriostat ogranicznika

Kriostat nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu indukcyjnego dla sieci średniego napięcia wykonany został z polipropylenu PP-H w Pracowni Technologii Nadprzewodnikowych w Lublinie. Kriostat ma dwie ścianki zewnętrzną i wewnętrzną przedzieloną izolatorem cieplnym w celu zminimalizowania strat azotu podczas przeprowadzania prób zwarciovych. Ze względu na występowania podczas przepływu prądu zwarciovego zmiennego pola magnetycznego o znacznej wartości kriostat musi być wykonany z materiałów nieprzewodzących i nieferromagnetycznych.



Rys. 6.17. Kriostat ogranicznika 6,9 kV / 600 A

Pokrywa kriostatu wykonana jest z materiału TECAFORM AH o grubości 20 mm. Do pokrywy poprzez tuleje dystansowe i 32 szpilki zamocowany jest nadprzewodnikowy ogranicznik prądu. Pokrywa kriostatu również posiada warstwę izolatora cieplnego. Ogranicznik wraz z pokrywą można wyjąć z kriostatu podnosząc pionowo do góry za uchwyty znajdujące się na pokrywie kriostatu. W pokrywie kriostatu są cztery rury do odprowadzania gazowego azotu. Parametry materiału PP-H z którego wykonano kriostat azotowy zamieszczono w tabeli 13. Masa ogranicznika to około 180 kg, a po napełnieniu ciekłym azotem około 550 kg.



Rys. 6.18. Zmontowany nadprzewodnikowy ogranicznik prądu 6,9 kV / 600 A

TABELA 13

Parametry materiału PP-H z którego wykonano kriostat ogranicznika

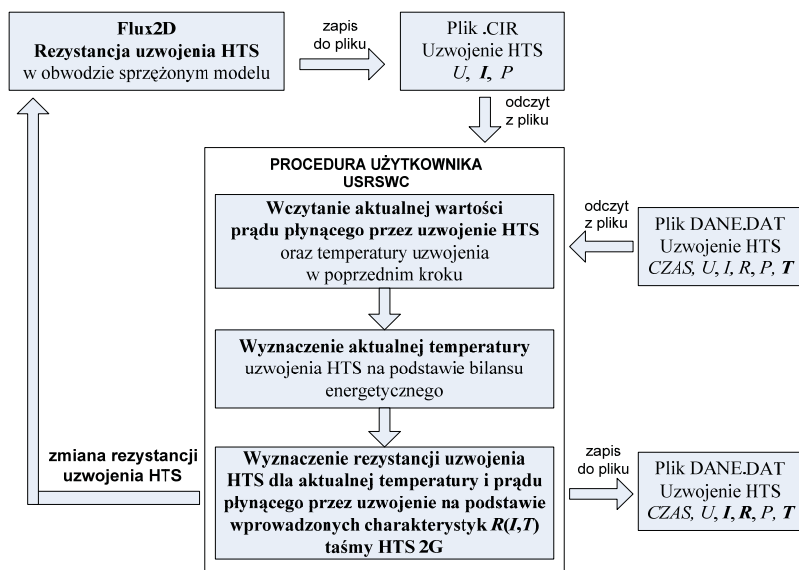
Właściwości mechaniczne	Wartość	Jednostka
Granica plastyczności	30	MPa
Wydłużenie przy zerwaniu	> 50	%
Moduł elastyczności z próby zrywania	1600	MPa
Twardość kulkowa	80	MPa
Wytrzymałość długotrwała	22	MPa
Właściwości termiczne		
Temperatura użytkowa	100	°C
Punkt topnienia	165	°C
Dynamiczna temperatura zeszklenia	-18	°C
Odporność termiczna kształtu – metoda A	65	°C
Odporność termiczna kształtu – metoda B	105	°C
Temperatura maksymalna	130	°C
Przewodność cieplna	0,22	W/(K·m)
Pojemność cieplna	1,7	J/(g·K)
Współczynnik wydłużalności liniowej	17	10 ⁻⁵ 1/K
Właściwości elektryczne		
Stała dielektryczna	2,25	
Współczynnik stratności dielektrycznej	0,0002	
Rezystywność skrośna	> 10 ¹⁴	Ωcm
Rezystancja powierzchniowa	> 10 ¹³	Ω
Wytrzymałość elektryczna	> 40	kV/mm
Gęstość	0,91	g/cm ³

6.2. Model numeryczny ogranicznika 6,9 kV / 600 A

Model numeryczny nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu indukcyjnego 6,9 kV / 600 A do analizy zmian temperatury i przebiegu prądu podczas ograniczania zwarć został opracowany w programie polowo-obwodowym Cedrat FLUX2D. Do zdefiniowania zależności rezystancji uzwojeń nadprzewodnikowych od prądu i temperatury zostały wykorzystane wieloparametrowa procedura użytkownika „USRSWC”. Obliczenia prowadzone są w module polowo-obwodowym „*Transient magnetic*” sprzężonym z obwodem zewnętrznym w pakiecie FLUX2D, a dodatkowo w każdym kroku obliczeniowym w procedurze „USRSWC” obliczany jest bilans cieplny dla poszczególnych uzwojeń ogranicznika i przyrost temperatury uzwojeń. Na podstawie zarejestrowanych wartości prądów płynących w poszczególnych uzwojeniach i obliczonej w procedurze „USRSWC” temperatury, obliczana jest rezystancja uzwojeń i jej wartość jest wprowadzana do obliczeń w module „*Transient magnetic*” w następnym kroku obliczeniowym. Wybrane parametry z obliczeń w kolejnym kroku obliczeniowym są zapisywane w zewnętrznych plikach tekstowych.

Program Flux2D wyposażony jest w narzędzia umożliwiające zmianę kodu modułu obliczeniowego przez wprowadzenie tzw. procedur użytkownika. Pozwala to na bardzo rozbudowane kształtowanie parametrów fizycznych regionów, charakterystyk źródeł ciepła czy warunków brzegowych. Procedury napisane w języku FORTRAN zgodnie z informacjami zawartymi w dokumentacji Flux2D po skompilowaniu zastępują odpowiednie procedury standardowe programu Flux2D w module obliczeniowym RESGEN i postprocesorze EXPGEN.

Rezystancja uzwojenia HTS i strumień ciepła przekazywany z powierzchni uzwojenia do cieczy chłodzącej są zaawansowanymi funkcjami temperatury i nie mogą być zdefiniowane prostymi funkcjami dostępnymi w programie Flux2D, dlatego do zdefiniowania zależności rezystancji uzwojeń nadprzewodnikowych od prądu i temperatury została wykorzystana wieloparametrowa procedura użytkownika USRSWC. Schemat blokowy działania procedury użytkownika USRSWC przedstawiono na rysunku 6.19. Procedura USRSWC wywoływana jest wielokrotnie w każdym kroku obliczeniowym.



Rys. 6.19. Schemat blokowy procedury użytkownika USRSWC wykonywanej w każdym kroku obliczeniowym

Przy założeniu, że temperatura w każdym punkcie przekroju uzwojenia HTS jest jednakowa oraz nie występuje przepływ ciepła pomiędzy sąsiadującymi ze sobą uzwojeniami ogranicznika bilans energetyczny dla każdego z uzwojeń nadprzewodnikowych może być zapisany w postaci:

$$P_e - P_{ch} = v \cdot c_p \cdot \rho \frac{dT}{dt} \quad (10)$$

gdzie P_e – straty mocy Joule'a w uzwojeniu HTS, P_{ch} – moc cieplna odprowadzana do cieczy chłodzącej, v – objętość uzwojenia HTS, c_p – średnia wartość masowego ciepła właściwego uzwojenia HTS, ρ – średnia wartość gęstości uzwojenia HTS. W równaniu (10) moc cieplna P_{ch} oddawana do kąpieli ciekłego azotu opisana jest przez równanie:

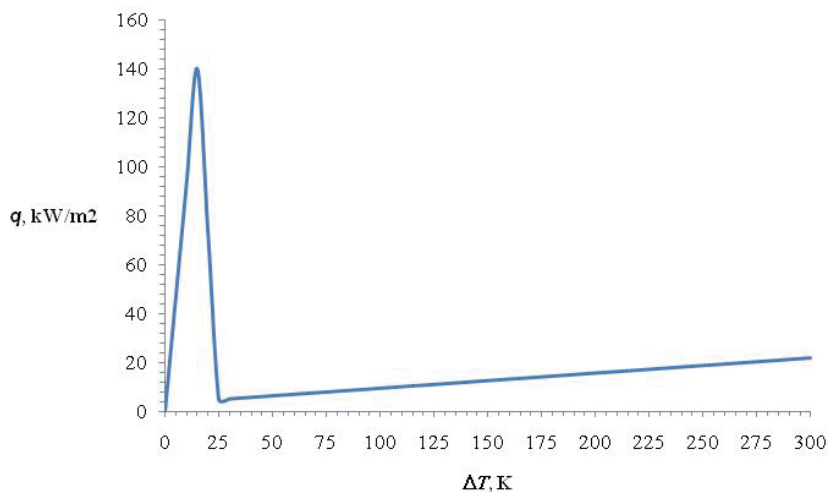
$$P_{ch} = \dot{q} \cdot S_{ch} \quad (11)$$

gdzie S_{ch} – powierzchnia wymiany ciepła uzwojenia HTS, \dot{q} – gęstość strumienia ciepła przepływająca pomiędzy powierzchnią wymiany ciepła uzwojenia HTS i ciekłym azotem. Gęstość strumienia ciepła \dot{q} w równaniu (11) zależy od różnicy temperatur ΔT pomiędzy powierzchnią chłodzoną, a ciekłym azotem. W procedurze USRSWC zastosowano uproszczoną zależność $\dot{q}(\Delta T)$ przedstawioną w tabeli 14, graficznie zależność tą przedstawiono na rysunku 6.20.

TABELA 14

Algorytm uproszczonej charakterystyki chłodzenia ciekłym azotem

ΔT , K	\dot{q} , W/m ²			
0	0	$\dot{q} = 9333,333 \cdot \Delta T$	$\dot{q} = 342500 - 13500 \cdot \Delta T$	$\dot{q} = 61,8 \cdot \Delta T + 3455$
15	140000			
25	5000			
300	22000			



Rys. 6.20. Uproszczona zależność gęstości strumienia ciepła \dot{q} przepływająca pomiędzy chłodzoną powierzchnią a ciekłym azotem w funkcji różnicy temperatur pomiędzy ciekłym azotem a chłodzoną powierzchnią

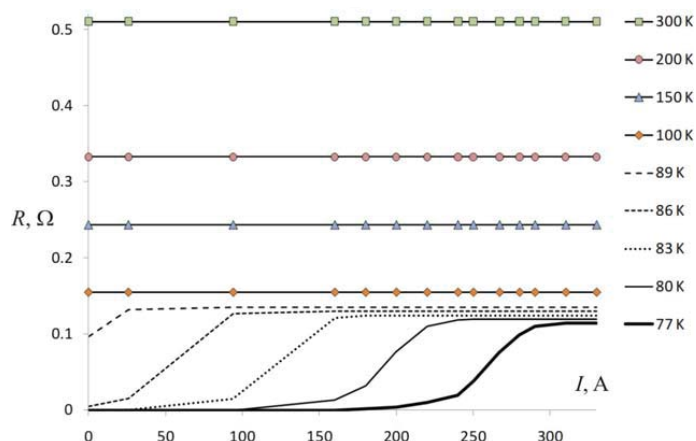
Z równania bilansu energetycznego (10) możliwe jest wyznaczenie aktualnej temperatury T_2 uzwojenia nadprzewodnikowego po upływie czasu dt :

$$T_2 = T_1 + \frac{1}{v \cdot c_p \cdot \rho} (P_e - P_{ch}) \cdot dt \quad (12)$$

gdzie T_1 – temperatura uzwojenia w poprzednim kroku obliczeniowym.

Program Flux2D w każdym kroku obliczeniowym zapisuje w zewnętrznym pliku .CIR wartość napięcia, prądu i mocy dla każdego z elementów zewnętrznego sprzężonego obwodu elektrycznego. W procedurze USRSWC w każdym kroku obliczeniowym wczytywana jest z pliku .CIR aktualna wartość prądu płynącego przez uzwojenie nadprzewodnikowe, a następnie wyznaczana jest aktualna temperatura uzwojenia według algorytmu:

$$T_2 = \begin{cases} T_1 \leq 92 & T_1 + 1 / (v \cdot c_p \cdot \rho) \cdot \left((P_e - (9333,333 \cdot (T_1 - 77))) \cdot S_{ch} \right) dt \\ 92 < T_1 \leq 102 & T_1 + 1 / (v \cdot c_p \cdot \rho) \cdot \left((P_e - (342500 - 13500(T_1 - 77))) \cdot S_{ch} \right) dt \\ T_1 > 102 & T_1 + 1 / (v \cdot c_p \cdot \rho) \cdot \left((P_e - (61,8 \cdot (T_1 - 77) + 3455)) \cdot S_{ch} \right) dt \end{cases} \quad (13)$$

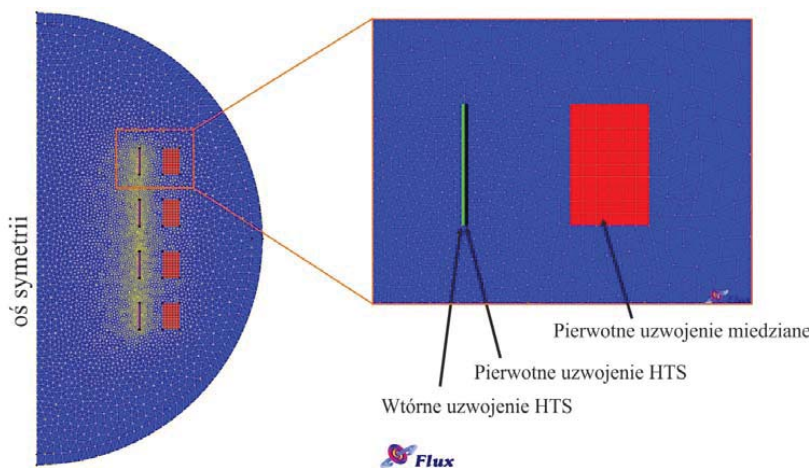


Rys. 6.21. Rezystancja 1 m taśmy nadprzewodnikowej SF12050 w funkcji prądu i temperatury (rezystancja w temperaturze 77 K otrzymana w wyniku pomiarów)

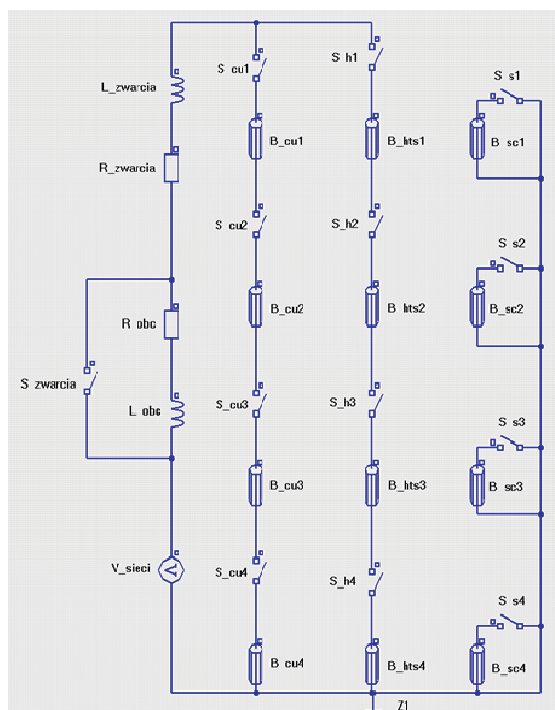
W procedurze USRSWC po obliczeniu aktualnej temperatury uzwojenia HTS oraz odczytaniu wartości prądu płynącego przez uzwojenie wyznaczana jest rezystancja każdego z uzwojeń na podstawie wprowadzonych zależności rezystancji w funkcji prądu i temperatury dla taśmy nadprzewodnikowej SF12050 (rys. 6.21). Obliczona wartość rezystancji uzwojenia wprowadzana jest do obliczeń w następnym kroku obliczeniowym.

Geometria modelu numerycznego ogranicznika prądu zwarciovego wraz z siatką elementów skończonych została przedstawiona na rysunku 6.22. Część połowa modelu numerycznego została sprzężona z zewnętrznym obwodem elektrycznym przedstawionym na rysunku 6.23. Obwód elektryczny składa się z sinusoidalnego źródła napięcia, elementów odzwierciedlających impedancję linii elektroenergetycznej (cewka $L_{zwarcia}$ i rezystor $R_{zwarcia}$), impedancję obciążenia (cewka L_{obc} i rezystor R_{obc}) zwieraną wyłącznikiem $S_{zwarcia}$ w celu zasymulowania zwarcia w zabezpieczanej linii elektroenergetycznej oraz szeregowo włączonego nadprzewodnikowego ogranicznika prądu zwarciovego. Elementy typu *Coil conductor* Bcu , $Bhts$ i Bsc są sprzężone z częścią połową modelu numerycznego i odpowiadają czterem cewkom pierwotnego miedzianego uzwojenia ogranicznika i czterem nadprzewodnikowym modułom ogra-

nicznika. Elementy S_{cu} , S_h , S_s nie są wyłącznikami lecz elementami reprezentującymi rezystancje poszczególnych modułów ogranicznika w funkcji prądu i temperatury.



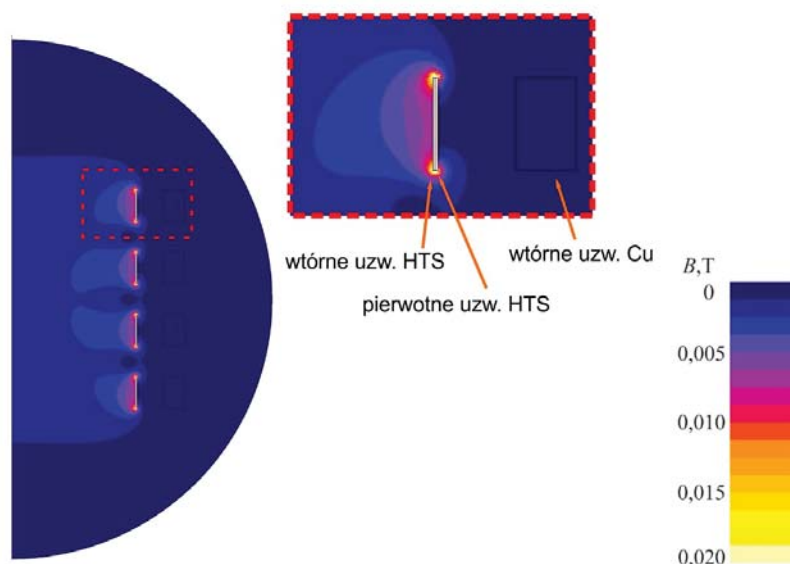
Rys. 6.22. Geometria modelu numerycznego ogranicznika w programie Flux 2D



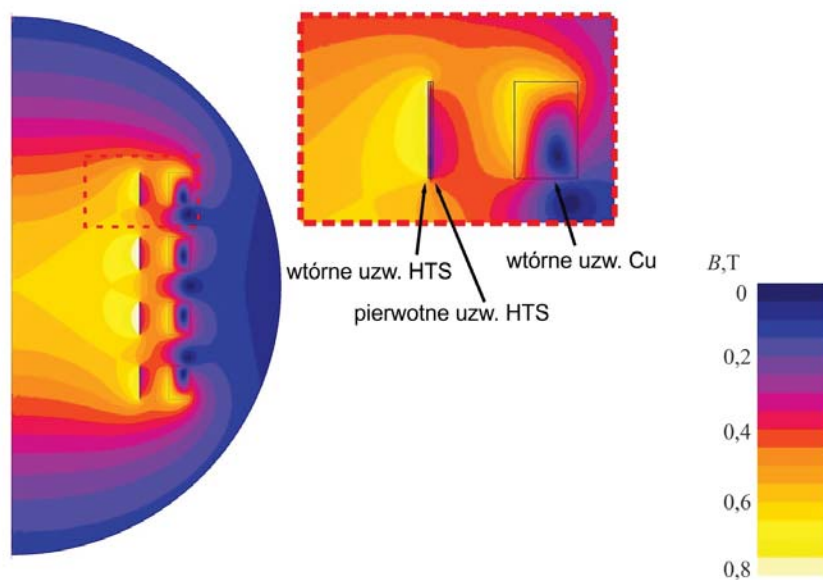
Rys. 6.23. Schemat obwodu elektrycznego modelu numerycznego ogranicznika

W stanie wyczekiwania ogranicznika przy przepływie prądu znamionowego uzwojenia nadprzewodnikowe znajdują się w stanie nadprzewodzącym. Maksymalna wartość indukcji magnetycznej (rys. 6.24) występuje w przestrzeni pomiędzy uzwojeniami nadprzewodnikowymi ogranicznika. Strumień magnetyczny wytworzony przez przepływający prąd w pierwotnym uzwojeniu nadprzewodnikowym niemal w całości kompensowany jest przez przeciwnie skierowany strumień magnetyczny wytworzony przez prąd płynący w zwartym wtórnym uzwojeniu nadprzewodnikowym. Przez uzwojenie miedziane o dużej impedancji w porównaniu z uzwojeniami nadprzewodnikowymi w stanie nadprzewodzącym płynie prąd o nieznacznej wartości.

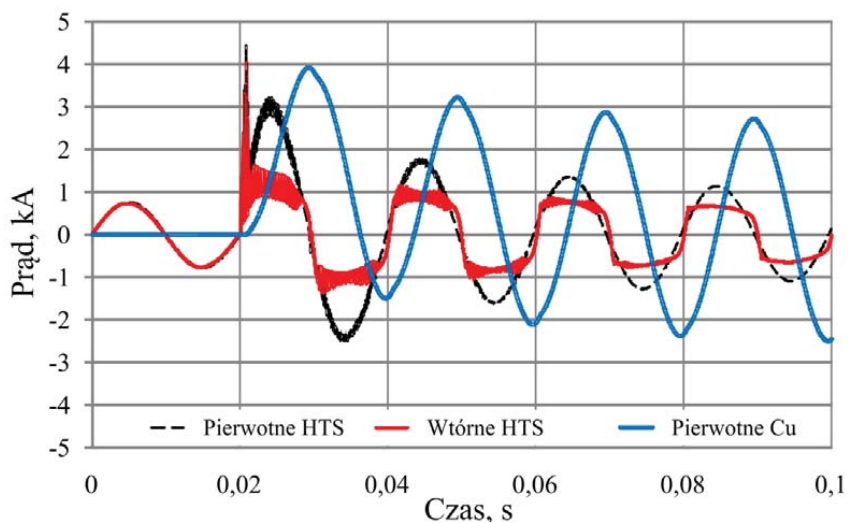
Podczas zwarcia w chronionym obwodzie zmienia się znacząco rozpląt prądów w ograniczniku (rys. 6.26). Podczas zwarcia rezystancje uzwojeń nadprzewodnikowych szybko wzrastają, a prąd zaczyna płynąć przez miedziane uzwojenie pierwotne. Impedancja ogranicznika wzrasta na skutek wzrostu rezystancji uzwojeń nadprzewodnikowych i pojawienia się indukcyjności pierwotnego uzwojenia miedzianego. Mapa indukcji magnetycznej obliczona w modelu numerycznym w stanie ograniczania prądu przedstawia rysunek 6.25.



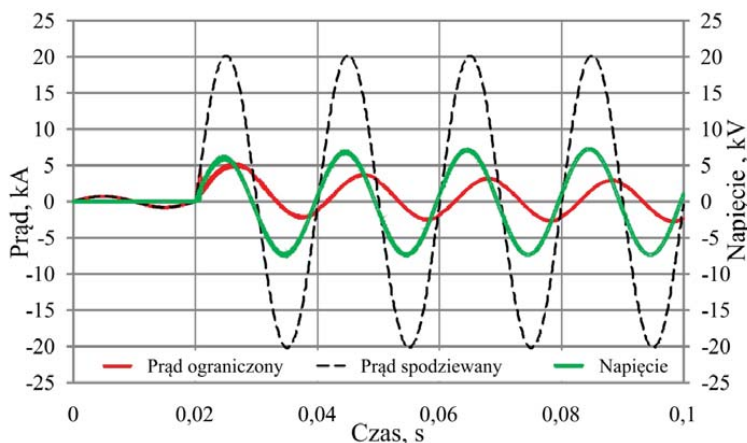
Rys. 6.24 Mapa indukcji magnetycznej w modelu numerycznym ogranicznika prądu zwarciovego 0,6 kV / 600 A – stan nadprzewodzący ogranicznika



Rys. 6.25. Mapa indukcji magnetycznej w modelu numerycznym ogranicznika prądu zwarciovego 6,9 kV / 600 A – stan ograniczania prądu zwarciovego



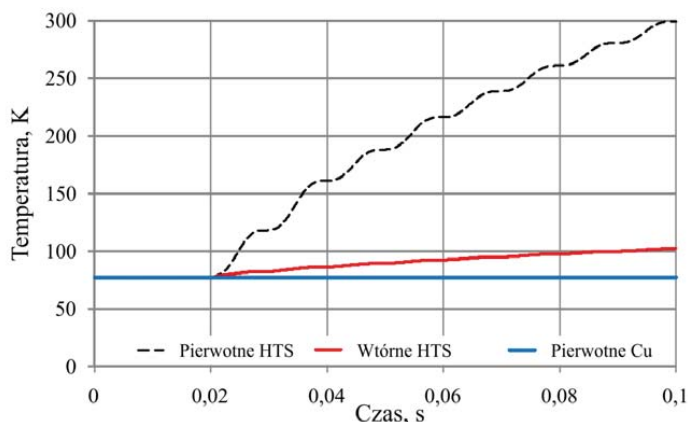
Rys. 6.26. Przebiegi prądów w uzwojeniach nadprzewodnikowego ogranicznika prądu zwarciovego



Rys. 6.27. Obliczone przebiegi prądów zwarciovych i napięcia na ograniczniku

Z obliczeń wykonanych w modelu numerycznym wynika, że spodziewany udar prądowy zostanie ograniczony czterokrotnie z 20 kA do 5 kA (rys. 6.27). W warunkach znamionowych prąd płynie głównie przez pierwotne uzwojenie nadprzewodnikowe, napięcie na ograniczniku jest mniejsze od 1 V.

Podczas przepływu prądu zwarciovego przez ogranicznik następuje bardzo szybkie nagrzewanie się uzwojeń nadprzewodnikowych ogranicznika. Temperatura pierwotnego uzwojenia nadprzewodnikowego wzrasta znacznie szybciej od temperatury wtórnego uzwojenia nadprzewodnikowego osiągając 240 K po 50 ms od chwili wystąpienia zwarcia w zabezpieczonym obwodzie (rys. 6.28). Temperatura uzwojenia wtórnego wzrasta do około 100 K, natomiast temperatura uzwojenia miedzianego praktycznie nie zmienia się w czasie 50 ms.



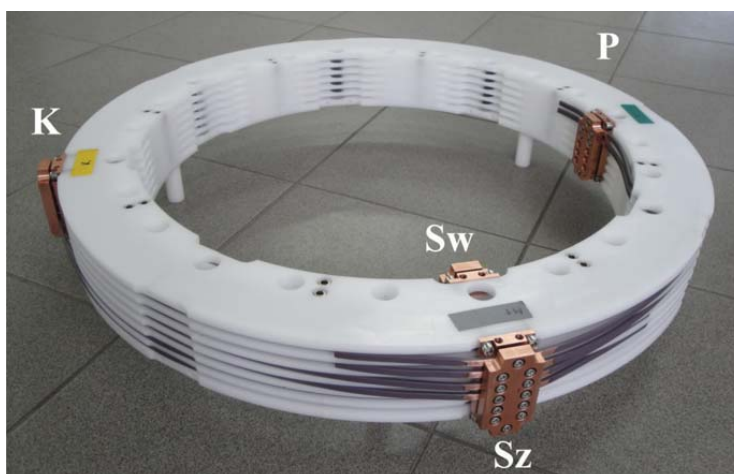
Rys. 6.28. Obliczone zmiany temperatury uzwojeń ogranicznika podczas ograniczania prądu zwarciovego

Ze względu na wzrost temperatury uzwojeń nadprzewodnikowych ogranicznika, obwód zwarciovymusi być wyłączony przez konwencjonalny wyłącznik przed osiągnięciem przez uzwojenia HTS temperatury maksymalnej, a przed następnym włączeniem zabezpieczonego obwodu uzwojenia nadprzewodnikowe powinny być ponownie schłodzone poniżej temperatury krytycznej, żeby odzyskały stan nadprzewodzący.

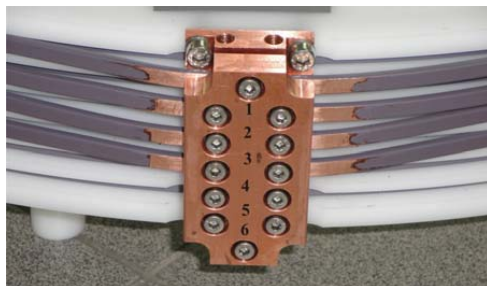
6.3. Pomiary elektryczne parametrów uzwojeń ogranicznika 6,9 kV / 600 A

6.3.1. Pomiary rezystancji połączeń

Pomiar rezystancji połączeń pomiędzy miedzianymi blokami połączeniowymi a miedzianym drutem nawojowym, z którego wykonane jest pierwotne uzwojenie miedziane wykonany był w temperaturze pokojowej 22,9°C dla wszystkich połączeń skręcanych w każdym module. Pomiary wykonano miernikiem rezystancji Hioki 3541.



Rys. 6.29. Oznaczenia bloków połączeniowych pierwotnego uzwojenia miedzianego ogranicznika: P – początek uzwojenia, Sw – połączenie w środku uzwojenia od wewnętrznej strony karkasu, Sz – połączenie w środku uzwojenia od zewnętrznej strony karkasu, K – koniec uzwojenia



Rys. 6.30. Numery połączeń pomiędzy miedzianym drutem nawojowym a miedzianym blokiem połączeniowym pierwotnego uzwojenia miedzianego ogranicznika



Rys. 6.31. Pomiar rezystancji połączeń pomiędzy miedzianym drutem nawojowym a miedzianym blokiem połączeniowym pierwotnego uzwojenia miedzianego ogranicznika (metoda czteroprzewodowa)

TABELA 15

Wyniki pomiarów rezystancji połączeń pomiędzy miedzianym drutem nawojowym a miedzianym blokiem połączeniowym pierwotnego uzwojenia miedzianego ogranicznika (temperatura 22,9°C)

Moduł 1	$R_P, \mu\Omega$	$R_{Sw}, \mu\Omega$	$R_{Sz}, \mu\Omega$	$R_K, \mu\Omega$
1	8	-	10	-
2	9	-	8	-
3	-	9	7	-
4	-	10	8	-
5	-	10	-	9
6	-	13	-	12

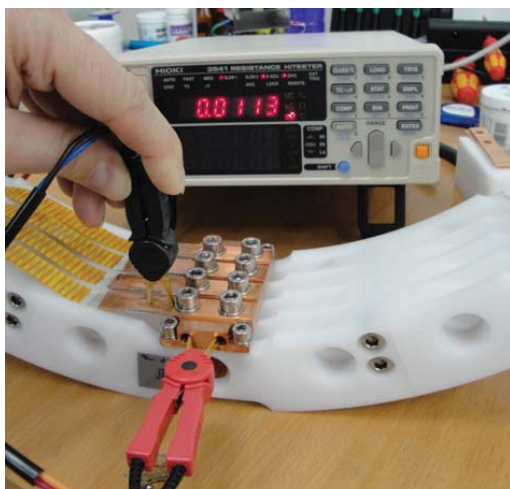
Moduł 2	$R_P, \mu\Omega$	$R_{Sw}, \mu\Omega$	$R_{Sz}, \mu\Omega$	$R_K, \mu\Omega$
1	12	-	9	-
2	7	-	7	-
3	-	8	9	-
4	-	10	8	-
5	-	9	-	10
6	-	8	-	17

ciąg dalszy tabeli 15

Moduł 3	$R_P, \mu\Omega$	$R_{Sw}, \mu\Omega$	$R_{Sz}, \mu\Omega$	$R_K, \mu\Omega$
1	16	-	10	-
2	8	-	9	-
3	-	9	7	-
4	-	10	7	-
5	-	9	-	9
6	-	9	-	11

Moduł 4	$R_P, \mu\Omega$	$R_{Sw}, \mu\Omega$	$R_{Sz}, \mu\Omega$	$R_K, \mu\Omega$
1	8	-	8	-
2	8	-	7	-
3	-	8	7	-
4	-	8	7	-
5	-	10	-	8
6	-	10	-	10

Średnia rezystancja połączenia pomiędzy miedzianym drutem nawojowym, a miedzianym blokiem połączeniowym wynosiła około $10 \mu\Omega$. Pomiar rezystancji połączeń pomiędzy miedzianymi końcówkami taśmy HTS, a miedzianym blokiem połączeniowym wykonany został dla wszystkich połączeń w 4 modułach. Rezystancja połączenia wynosiła od $7,5 \mu\Omega$ do $23 \mu\Omega$.



Rys. 6.32. Pomiar rezystancji połączeń pomiędzy miedzianą końcówką taśmy HTS, a miedzianym blokiem połączeniowym pierwotnego i wtórnego uzwojenia nadprzewodnikowego ogranicznika

TABELA 16

Wyniki pomiarów rezystancji połączeń pomiędzy miedzianą końcówką taśmy HTS, a miedzianym blokiem połączeniowym pierwotnego i wtórnego uzwojenia nadprzewodnikowego ogranicznika

22,6°C		Rezystancja połączeń			
Moduł 1	RPI, $\mu\Omega$	RPII, $\mu\Omega$	RKI, $\mu\Omega$	RKII, $\mu\Omega$	
R1	8,6	10,0	10,4	9,9	
R2	8,9	18,2	10,1	11,7	
R3	10,0	13,8	10,9	11,6	
R4	11,6	11,2	10,7	14,5	

22,9°C		Rezystancja połączeń			
Moduł 2	RPI, $\mu\Omega$	RPII, $\mu\Omega$	RKI, $\mu\Omega$	RKII, $\mu\Omega$	
R1	10,5	11,3	10,0	10,7	
R2	10,5	11,5	10,3	12,3	
R3	9,4	10,5	11,6	11,7	
R4	10,2	11,3	12,0	14,3	

22,9°C		Rezystancja połączeń			
Moduł 3	RPI, $\mu\Omega$	RPII, $\mu\Omega$	RKI, $\mu\Omega$	RKII, $\mu\Omega$	
R1	11,6	11,3	7,5	10,6	
R2	13,4	11,7	12,3	10,7	
R3	13,7	14,1	23,0	11,3	
R4	14,5	14,7	13,0	12,6	

22,6°C		Rezystancja połączeń			
Moduł 4	RPI, $\mu\Omega$	RPII, $\mu\Omega$	RKI, $\mu\Omega$	RKII, $\mu\Omega$	
R1	9,2	9,9	10,2	10,2	
R2	11,8	12,4	11,2	11,6	
R3	13,0	21,2	14,5	12,8	
R4	16,0	16,1	14,2	13,0	

Oznaczenia w tabeli:

PI – początek uzwojenia pierwotnego,

PII – początek uzwojenia wtórnego,

KI – koniec uzwojenia pierwotnego,

KII – koniec uzwojenia wtórnego.

6.3.2. Pomiary rezystancji i indukcyjności uzwojeń ogranicznika

Pomiar rezystancji uzwojeń miedzianych wykonany był w temperaturze pokojowej mikroomierzem HIOKI model 3541, natomiast pomiar indukcyjności uzwojenia mostkiem Escort ELC-133A. Pomiar indukcyjności wykonano dla czterech częstotliwości 100 Hz, 120 Hz, 1 kHz i 10 kHz.



Rys. 6.33. Pomiar indukcyjności pierwotnych uzwojeń miedzianych ogranicznika mostkiem Escort ELC-133A

TABELA 17

Wyniki pomiarów rezystancji oraz indukcyjności poszczególnych modułów pierwotnego uzwojenia miedzianego ogranicznika

Moduł 1	R , m Ω	L , mH (100 Hz)	L , mH (120 Hz)	L , mH (1 kHz)	L , mH (10 kHz)
P-Sz	11,541	0,182	0,177	0,166	0,155
Sz-Sw	11,305	0,165	1,168	0,157	0,150
Sw-K	11,535	0,175	0,175	0,165	0,154
P-K	34,376	1,302	1,310	1,269	1,226

Moduł 2	R , m Ω	L , mH (100 Hz)	L , mH (120 Hz)	L , mH (1 kHz)	L , mH (10 kHz)
P-Sz	11,547	0,18	0,168	0,166	0,155
Sz-Sw	11,308	0,172	0,166	0,158	0,148
Sw-K	11,533	0,174	0,164	0,164	0,154
P-K	34,380	1,293	1,304	1,263	1,218

Moduł 3	R , m Ω	L , mH (100 Hz)	L , mH (120 Hz)	L , mH (1 kHz)	L , mH (10 kHz)
P-Sz	11,548	0,175	0,184	0,165	0,154
Sz-Sw	12,307	0,199	0,186	0,182	0,171
Sw-K	11,540	0,185	0,162	0,163	0,153
P-K	35,392	1,36	1,323	1,332	1,287

Moduł 4	R , m Ω	L , mH (100 Hz)	L , mH (120 Hz)	L , mH (1 kHz)	L , mH (10 kHz)
P-Sz	11,574	0,178	0,181	0,167	0,156
Sz-Sw	12,336	0,196	0,2	0,184	0,172
Sw-K	11,572	0,175	0,17	0,164	0,153
P-K	36,477	1,367	1,346	1,323	1,284



Rys. 6.34. Pomiar indukcyjności cewek uzwojenia nadprzewodnikowego ogranicznika mostkiem Escort ELC-133A

TABELA 18

Wyniki pomiarów rezystancji oraz indukcyjności modułów pierwotnego i wtórnego uzwojenia nadprzewodnikowego ogranicznika

Uzwojenie pierwotne HTS					
22,6°C	R , m Ω	L , mH (100 Hz)	L , mH (120 Hz)	L , μ H (1 kHz)	L , μ H (10 kHz)
R1	8,2747	0,128	0,129	125,1	114,5
R2	8,3048	0,132	0,131	126,0	119,3
R3	8,3038	0,126	0,128	125,8	119,7
R4	8,3055	0,128	0,129	125,0	114,3
MODUŁ 1 I	2,0774	0,077	0,080	78,0	87,7

Uzwojenie wtórne HTS					
22,6°C	R , m Ω	L , mH (100 Hz)	L , mH (120 Hz)	L , μ H (1 kHz)	L , μ H (10 kHz)
R1	7,0168	0,115	0,154	113,3	113,9
R2	7,0225	0,116	0,155	114,4	114,6
R3	7,0119	0,116	0,155	114,0	114,6
R4	7,0156	0,111	0,152	113,6	114,3
MODUŁ 1 II	1,7594	0,066	0,072	71,2	79,5

Uzwojenie pierwotne HTS					
22,9°C	R , m Ω	L , mH (100 Hz)	L , mH (120Hz)	L , μ H (1kHz)	L , μ H (10kHz)
R1	8,2216	0,129	0,148	125,1	115,8
R2	8,2142	0,128	0,144	125,3	120,6
R3	8,2592	0,128	0,143	125,7	120,7
R4	8,2908	0,128	0,130	125,4	115,8
MODUŁ 2 I	2,0646	0,080	0,083	81,2	90,7

ciąg dalszy tabeli 18

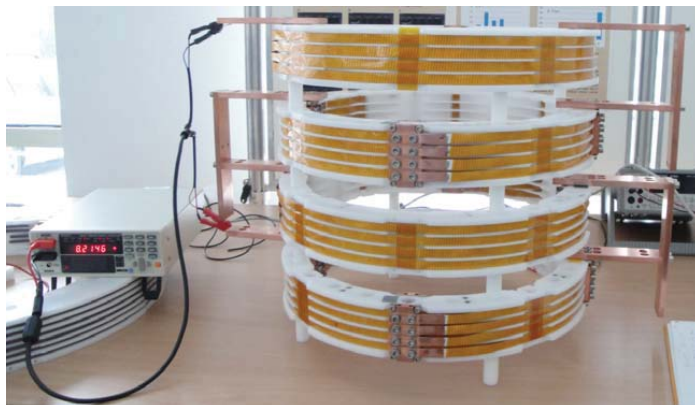
Uzwojenie wtórne HTS					
22,9°C	R , m Ω	L , mH (100 Hz)	L , mH (120 Hz)	L , μ H (1 kHz)	L , μ H (10 kHz)
R1	7,8722	0,115	0,144	112,9	113,7
R2	7,8524	0,116	0,149	113,0	113,3
R3	7,8591	0,110	0,141	112,6	113,4
R4	7,8464	0,114	0,139	112,7	113,4
MODUŁ 2 II	1,9673	0,065	0,072	70,0	79,4

Uzwojenie pierwotne HTS					
22,9°C	R , m Ω	L , mH (100 Hz)	L , mH (120 Hz)	L , μ H (1 kHz)	L , μ H (10 kHz)
R1	8,2325	0,123	0,159	126,1	124,8
R2	8,0105	0,129	0,155	126,1	125,4
R3	8,3412	0,126	0,151	124,8	124,0
R4	8,3260	0,128	0,149	126,1	124,9
MODUŁ 3 I	2,0276	0,083	0,081	79,1	88,9

Uzwojenie wtórne HTS					
22,9°C	R , m Ω	L , mH (100 Hz)	L , mH (120 Hz)	L , μ H (1 kHz)	L , μ H (10 kHz)
R1	7,8383	0,114	0,142	112,8	103,5
R2	7,8430	0,116	0,140	112,0	106,9
R3	7,8450	0,110	0,139	112,3	107,5
R4	7,8430	0,114	0,137	112,4	103,4
MODUŁ 3 II	1,9637	0,065	0,072	69,8	78,7

Uzwojenie pierwotne HTS					
24,2°C	R , m Ω	L , mH (100 Hz)	L , mH (120 Hz)	L , μ H (1 kHz)	L , μ H (10 kHz)
R1	8,2396	0,124	0,129	126,8	117,5
R2	8,2320	0,124	0,128	125,4	120,7
R3	8,2278	0,128	0,128	124,6	120,0
R4	8,2238	0,130	0,129	126,1	113,7
MODUŁ 4 I	2,0583	0,074	0,084	81,6	91,1

Uzwojenie wtórne HTS					
24,2°C	R , m Ω	L , mH (100 Hz)	L , mH (120 Hz)	L , μ H (1 kHz)	L , μ H (10 kHz)
R1	7,8524	0,116	0,137	113,0	111,8
R2	7,8467	0,115	0,140	112,6	112,6
R3	7,8460	0,110	0,139	112,5	112,6
R4	7,8550	0,110	0,147	113,2	113,4
MODUŁ 4 II	1,9636	0,064	0,068	69,9	79,3



Rys. 6.35. Pomiary rezystancji i indukcyjności uzwojeń modułów ogranicznika

TABELA 19

Wyniki pomiarów rezystancji i indukcyjności pierwotnego uzwojenia nadprzewodnikowego ogranicznika 6,9 kV / 600 A przy rozwartym uzwojeniu wtórnym

Uzwojenie pierwotne (uzwojenie wtórne rozwarte)		
21,3°C	R , m Ω	L , μ H (10 kHz)
M4	2,0436	90,5
M4+M3	4,0889	229,5
M4+M3+M2	6,1465	405,3
M4+M3+M2+M1	8,2145	580,6

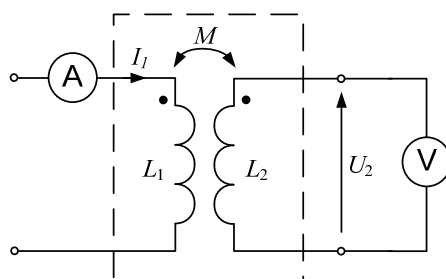
TABELA 20

Wyniki pomiarów rezystancji i indukcyjności pierwotnego uzwojenia nadprzewodnikowego ogranicznika 6,9 kV / 600 A przy zwartym uzwojeniu wtórnym

Uzwojenie pierwotne (uzwojenie wtórne zwarte)		
21,3°C	R , m Ω	L , μ H (10 kHz)
M4	2,0442	13,7
M4+M3	4,0902	20,1
M4+M3+M2	6,1485	26,5
M4+M3+M2+M1	8,2178	28,5

6.3.3. Pomiar współczynnika sprzężenia magnetycznego pomiędzy uzwojeniami

W celu wyznaczenia sprzężenia magnetycznego pomiędzy uzwojeniami ogranicznika M oraz współczynnika sprzężenia magnetycznego k wykonano układ pomiarowy, którego uproszczony schemat pomiarowy przedstawiono na rysunku 6.36.



Rys. 6.36. Schemat pomiarowy do wyznaczenia współczynnika sprzężenia magnetycznego pomiędzy uzwojeniami ogranicznika

Indukcyjność wzajemna M uzwojenia pierwotnego ogranicznika względem uzwojenia wtórnego ogranicznika, jest to stosunek strumienia magnetycznego wytworzonego w cewce pierwszej i skojarzonego z cewką drugą do prądu płynącego w cewce pierwszej:

$$M = \frac{\Psi_{12}}{i_1} \quad (14)$$

przy czym: Ψ_{12} – strumień skojarzony z cewką drugą, wytworzony przez prąd płynący w cewce pierwszej. We wzorach założono, że strumienie skojarzone Ψ_{12} oraz Ψ_{21} przenikają środowisko izotropowe, liniowe i jednorodne. W takim przypadku można przyjąć, że $M = \text{const}$.

$$M = k\sqrt{L_1 L_2}, \quad (15)$$

gdzie: L_1 – indukcyjność uzwojenia pierwotnego ogranicznika, L_2 – indukcyjność uzwojenia wtórnego ogranicznika.

Reaktancja indukcyjności wzajemnej X_M może być wyznaczona z równania:

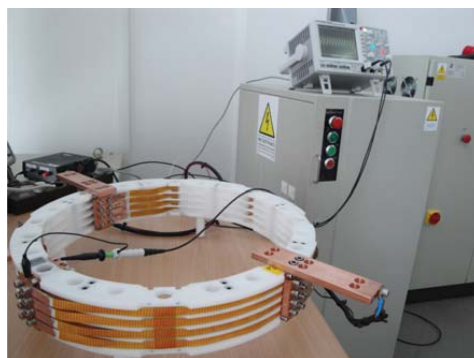
$$X_M = \frac{U}{I_1}, \quad (16)$$

indukcyjność wzajemna M :

$$M = \frac{X_M}{2\pi f}, \quad (17)$$

współczynnik sprzężenia magnetycznego k :

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (18)$$

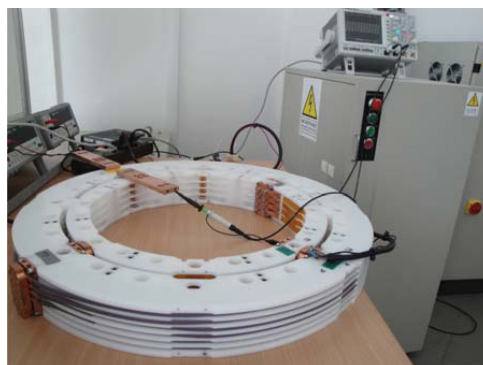


Rys. 6.37. Pomiar współczynnika sprzężenia magnetycznego uzwojeń nadprzewodnikowych modułu ogranicznika 6,9 kV / 600 A

TABELA 21

Wyniki pomiarów do wyznaczenia współczynnika sprzężenia magnetycznego k uzwojeń nadprzewodnikowych pierwotnego i wtórnego modułu ogranicznika 6,9 kV / 600 A.

I_1	U_2	L_1 uzwojenie pierwotne HTS	L_2 uzwojenie wtórne HTS	X_M	M	k
A	V	μH	μH	Ω	H	-
10,28	0,255	88,6	78,6	0,0256	$8,151 \cdot 10^{-5}$	0,976



Rys. 6.38. Pomiar współczynnika sprzężenia uzwojeń miedzianego i nadprzewodnikowych modułu ogranicznika

TABELA 22

Wyniki pomiarów do wyznaczenia współczynnika sprzężenia magnetycznego k uzwojeń pierwotnego miedzianego i pierwotnego nadprzewodnikowego modułu ogranicznika

I_1	U_2	L_1 uzwojenie pierwotne Cu	L_2 uzwojenie pierwotne HTS	X_M	M	k
A	V	μH	μH	Ω	H	-
10,28	0,5639	1299,7	85,8	0,0548	$1,7463 \cdot 10^{-4}$	0,523

TABELA 23

Wyniki pomiarów do wyznaczenia współczynnika sprzężenia magnetycznego k uzwojeń pierwotnego miedzianego i wtórnego nadprzewodnikowego modułu ogranicznika

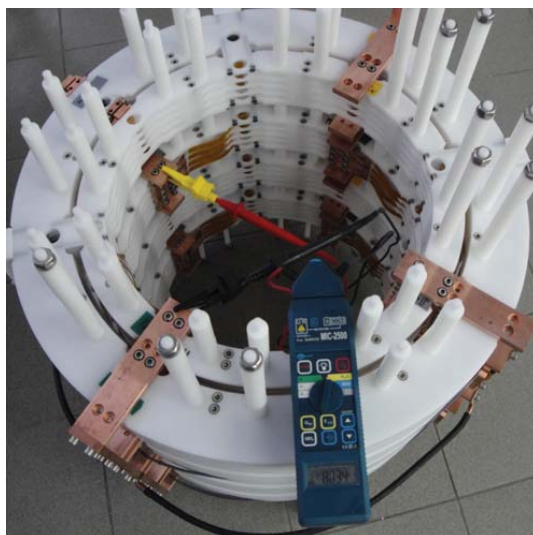
I_1	U_2	L_1 uzwojenie pierwotne Cu	L_2 uzwojenie wtórne HTS	X_M	M	k
A	V	μH	μH	Ω	H	-
10,28	0,53547	1299,7	77,9	0,05208	$1,6581 \cdot 10^{-4}$	0,521

Uzyskana wartość współczynnika sprzężenia magnetycznego $k = 0,976$ pomiędzy pierwotnym i wtórnym uzwojeniem nadprzewodnikowym potwierdza, że zastosowane rozwiązanie techniczne wykonania uzwojeń nadprzewodnikowych zapewnia bardzo dobre sprzężenie magnetyczne pomiędzy uzwojeniami, co korzystnie przekłada się na mały spadek napięcia na ograniczniku w warunkach znamionowych.

6.3.4. Pomiary rezystancji izolacji

W ograniczniku podczas zwarcia występują napięcia rzędu kilku kilowoltów, dlatego wymagana jest bardzo dobra izolacja taśmy nadprzewodnikowej, aby uniknąć przebicia pomiędzy uzwojeniami nadprzewodnikowymi oraz przebicia pomiędzy poszczególnymi zwojami cewek nadprzewodnikowych. Uzwojenia są sekcjonowane i umieszczone w rowkach karkasu wykonanego z materiału izolacyjnego. Na karkas wybrano materiał TECAFOM AH (POM-C) o rezystywności skrośnej $1014 \Omega\text{cm}$ i wytrzymałości elektrycznej 50 kV/mm . Izolacja taśmy nadprzewodnikowej wykonana została z taśmy poliimidowej z klejem silikonowym. Cała konstrukcja została skręcona śrubami ze stali nierdzewnej (niemagnetycznej). Taśma poliimidowa o grubości $25 \mu\text{m}$ zapewnia izolację elektryczną do $5,5 \text{ kV}$. Każda taśma nadprzewodnikowa została owinięta taśmą poliimidową z zakładką około 1 mm . Izolacja międzyzwojowa jest zapewniona przez minimum dwie warstwy poliimidowej taśmy izolacyjnej.

Pomiar rezystancji izolacji dla każdego z modułów ogranicznika wykonane zostały miernikiem izolacji MIC-2500 firmy SONEL. Pomiarzy wykonane zostały dla dwóch napięć 1 kV oraz 2,5 kV. Podane w tablicy wyniki rezystancji izolacji zostały zarejestrowane po czasach $t_1 = 15$ s, $t_2 = 60$ s oraz $t_3 = 180$ s.



Rys. 6.39. Pomiar rezystancji izolacji modułów ogranicznika 6,9 kV / 600 A

Podczas pomiaru rezystancji izolacji pomiędzy uzwojeniem wtórnym modułu mierzonego a jego uzwojeniem pierwotnym uzwojenia wtórne pozostałych modułów były zwierane z uzwojeniami pierwotnymi, które są połączone ze sobą szeregowo. Ostatni pomiar to pomiar rezystancji izolacji pomiędzy zwartymi i połączonymi ze sobą uzwojeniami wtórnymi a połączonymi szeregowo uzwojeniami pierwotnymi wszystkich czterech modułów.

TABELA 24

Wyniki pomiarów rezystancji izolacji modułów ogranicznika prądu 6,9 kV / 600 A

22,1°C	Pomiary rezystancji izolacji modułu nr 1 ogranicznika prądu						
Napięcie	R_{t1} , GΩ 15 s	R_{t2} , GΩ 60 s	R_{t3} , GΩ 180 s	Ab ₁ Współczynnik absorpcji	Ab ₂ Współczynnik absorpcji	U, kV 180 s	I, nA 180 s
1 kV	56,17	98,97	151,8	1,76	1,53	1,045	6,78
2,5 kV	34,04	85,98	34,04	2,52	1,70	2,604	17,33

22,1°C Pomiary rezystancja izolacji modułu nr 2 ogranicznika prądu							
Napięcie	R_{i1} , GΩ 15 s	R_{i2} , GΩ 60 s	R_{i3} , GΩ 180 s	Ab1 Współczynnik absorpcji	Ab2 Współczynnik absorpcji	U , kV 180 s	I , nA 180 s
1 kV	65,09	119,2	217,2	1,83	1,82	1,045	4,877
2,5 kV	21,71	79,15	195,5	3,64	2,47	2,604	13,55

22,1°C Pomiary rezystancja izolacji modułu nr 3 ogranicznika prądu							
Napięcie	R_{i1} , GΩ 15 s	R_{i2} , GΩ 60 s	R_{i3} , GΩ 180 s	Ab1 Współczynnik absorpcji	Ab2 Współczynnik absorpcji	U , kV 180 s	I , nA 180 s
1 kV	61,65	112,6	212,3	1,82	1,88	1,045	4,096
2,5 kV	23,40	82,97	199,9	3,54	2,40	2,606	13,07

22,1°C Pomiary rezystancji izolacji modułu nr 4 ogranicznika prądu							
Napięcie	R_{i1} , GΩ 15 s	R_{i2} , GΩ 60 s	R_{i3} , GΩ 180 s	Ab1 Współczynnik absorpcji	Ab2 Współczynnik absorpcji	U , kV 180 s	I , nA 180 s
1 kV	68,31	130,3	23,8	1,90	1,82	1,045	4,457
2,5 kV	52,29	122,2	320,5	2,33	2,62	2,603	8,085

22,1°C Pomiary rezystancja izolacji zmontowanego ogranicznika prądu 6,6 kV / 600 A							
Napięcie	R_{i1} , GΩ 15 s	R_{i2} , GΩ 60 s	R_{i3} , GΩ 180 s	Ab1 Współczynnik absorpcji	Ab2 Współczynnik absorpcji	U , kV 180 s	I , nA 180 s
1 kV	15,84	31,05	53,72	1,64	1,73	1,044	19,43
2,5 kV	10,99	30,46	58,61	2,77	1,92	2,603	44,40

W tabeli 24 przedstawione są wyniki pomiarów rezystancji izolacji modułów ogranicznika SFCL2G-SN dla zadanych czasów 15 s, 60 s i 180 s, współczynniki absorpcji, dokładna wartość napięcia próby po czasie 180 s, oraz wartość prądu upływu po czasie 180 sekund.

6.4. Testy zwarciove ogranicznika 6,9 kV / 600 A

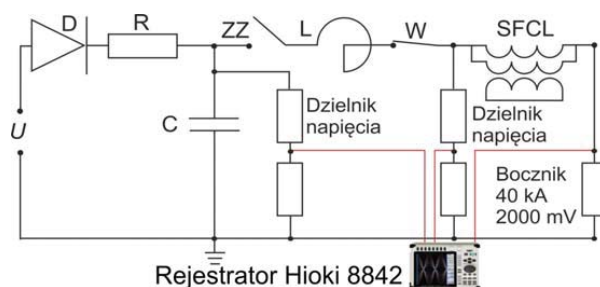
Badania zwarciove zostały przeprowadzone w Laboratorium Badawczym Aparatury Rozdzielczej Instytutu Elektrotechniki w Warszawie. Głównym celem testów zwarciowych było zbadanie skuteczności działania nadprzewodnikowego ogranicznika prądu poprzez porównanie szczytowej wartości prądu zwarciowego w obwodzie zwarciowym bez ogranicznika i z ogranicznikiem. Badania zostały przeprowadzone w układzie zwarciowym RLC przedstawionym na rysunku 6.41, schemat laboratoryjnego układu zwarciowego z włączonym szeregowo nadprzewodnikowym ogranicznikiem prądu zwarciowego zamieszczono na rysunku 6.42.



Rys. 6.40. Pierwsze chłodzenie ogranicznika ciekłym azotem

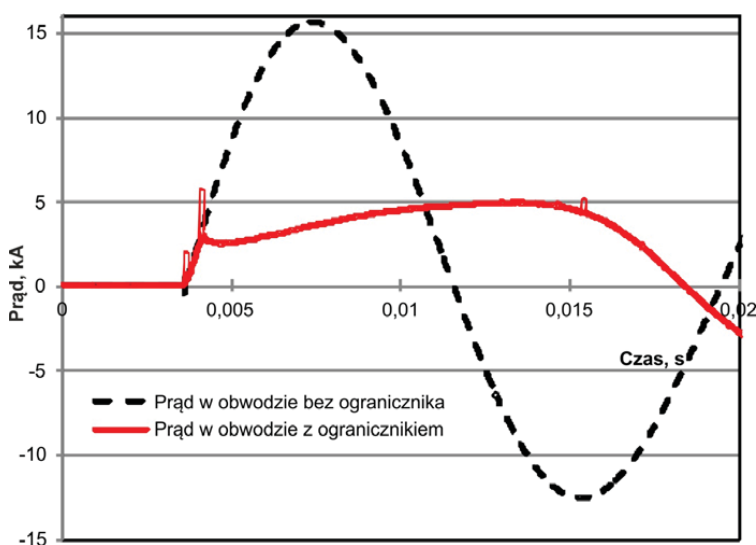


Rys. 6.41. Układ zwarciovoy z włączonym szeregowo ogranicznikiem 6,9 kV / 600 A



Rys. 6.42. Schemat laboratoryjnego układu zwarciovoy z włączonym szeregowo nadprzewodnikowym ogranicznikiem prądu 6 kV / 600 A: C – bateria kondensatorów 4,711 mF, 10 kV, ZZ – załącznik zwarciovoy, W – wyłącznik, SFCL – nadprzewodnikowy ogranicznik prądu zwarciovoy 6,9 kV / 600 A

Próba zwarciova ogranicznika SFCL-SN wykonana została po schłodzeniu ogranicznika ciekłym, do schłodzenia ogranicznika zużyto 460 litrów ciekłego azotu. Bateria kondensatorów C (rys. 6.42) naładowana do napięcia 10 kV została rozładowana po zamknięciu załącznika zwarciowego ZZ, a po około 50 ms obwód został rozłączony wyłącznikiem W. Na rysunku 6.43 przedstawiającym porównanie przebiegów prądu zwarciowego w obwodzie z ogranicznikiem i bez ogranicznika widoczne jest ograniczenie szczytowej wartości prądu zwarciowego 15,67 kA do wartości 5 kA.



Rys. 6.43. Przebiegi prądu zwarciowego w obwodzie z ogranicznikiem i bez ogranicznika

6.5. Podsumowanie

W rozdziale przedstawiono zrealizowany projekt trójuzwojeniowego bezrdzeniowego nadprzewodnikowego ogranicznika prądu zwarciowego o parametrach znamionowych 6,9 kV / 600 A. Dla przyjętych założeń projektu przeprowadzono symulacje numeryczne pracy ogranicznika z uwzględnieniem przepływu ciepła do cieczy chłodzącej. Otrzymano przebiegi prądu zwarciowego, przebiegi prądów w poszczególnych uzwojeniach ogranicznika oraz przebiegi obliczono temperaturę poszczególnych uzwojeń ogranicznika podczas przepływu prądu zwarciowego. Opracowany model numeryczny pozwolił na opracowanie projektu technicznego ogranicznika. Zaprojektowano kriostat azotowy ogranicznika, opracowano proces nawijania uzwojeń HTS z jednoczesnym izolowaniem

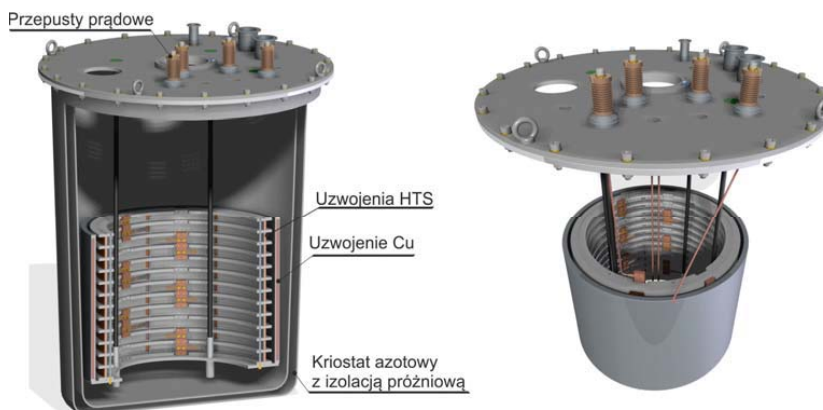
taśmy nadprzewodnikowej przez owijanie izolacją poliimidową. Do wykonania ogranicznika zaprojektowano i wykonano specjalną nawijarkę. Po wykonaniu ogranicznika prądu składającego się z 4 identycznych modułów przeprowadzono laboratoryjne badania parametrów poszczególnych uzwojeń ogranicznika. Badania laboratoryjne potwierdziły skuteczność działania nadprzewodnikowych ograniczników typu indukcyjnego o konstrukcji bezrdzeniowej, a opracowana konstrukcja uzwojeń nadprzewodnikowych pozwalająca uzyskać bardzo duży współczynnik sprzężenia pomiędzy uzwojeniami, znacząco poprawiła parametry ogranicznika w znamionowych warunkach pracy. Test ogranicznika wykonany został dla napięcia 10 kV. Ogranicznik zgodnie z założeniami, ograniczył prąd udarowy z 15,67 kA do 5 kA.

7. NADPRZEWODNIKOWY OGRANICZNIK PRĄDU ZWARCIOWEGO 15 KV / 140 A

7.1. Model fizyczny ogranicznika prądu 15 kV / 140 A

W rozdziale przedstawiono projekt, sposób wykonania oraz rezultaty przeprowadzonych badań eksperymentalnych bezrdzeniowego nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu indukcyjnego o parametrach znamionowych 15 kV i 140 A. Ogranicznik prądu zwarciovego składa się z trzech uzwojeń sprzężonych magnetycznie i chłodzonych w kąpeli ciekłego azotu. Prezentowany projekt nadprzewodnikowego ogranicznika prądu jest lekką, bezrdzeniową konstrukcją (rys. 7.1). Główne parametry ogranicznika zostały przedstawione w tabeli 25. Ogranicznik składa się z miedzianego uzwojenia pierwotnego o 185 zwojach, pierwotnego uzwojenia HTS o 144 zwojach i wtórnego uzwojenia HTS o 144 zwojach. Rysunek 7.1 przedstawia zmontowany ogranicznik prądu oraz przekrój uzwojeń ogranicznika i karkasu azotowego z izolacją próżniową. Uzwojenia ogranicznika zostały nawinięte na dwóch karkasach o różnych średnicach. Schemat elektryczny ogranicznika przedstawia rysunek 7.3. Uzwojenia nadprzewodnikowe ogranicznika zostały podzielone na dwanaście cewek typu krążkowego. Karkasy uzwojeń oraz kriostat azotowy zostały wykonane z kompozytu epoksydowo-szklanego. Oba uzwojenia nadprzewodnikowe zostały nawinięte na jednym karkasie. Długość taśmy nadprzewodnikowej drugiej generacji SF12050 przypadająca na jedną cewkę wynosi 19 metrów, co odpowiada napięciu 1 kV przypadającego na jeden moduł. Cewki pierwotnego uzwojenia HTS są połączone ze sobą szeregowo. Cewki nadprzewodnikowego uzwojenia wtórnego są połączone ze sobą po dwie sztuki, zaprojektowano

w ten sposób sześć zwartych uzwojeń wtórnych HTS izolowanych od siebie. Cewki uzwojenia wtórnego HTS są sprzężone magnetycznie z pierwotnym uzwojeniem HTS i pierwotnym uzwojeniem miedzianym.



Rys. 7.1. Projekt CAD ogranicznika

TABELA 25

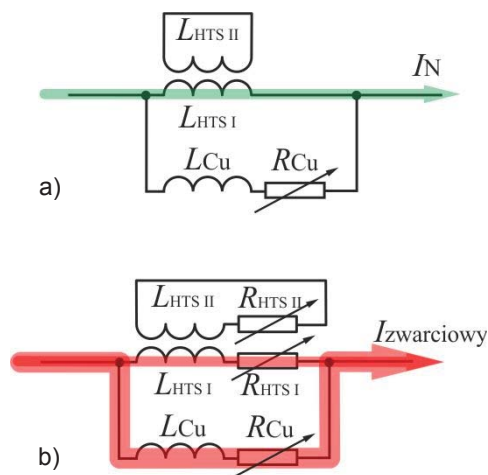
Parametry wykonanego ogranicznika prądu typu indukcyjnego

Parametr		Wartość
Napięcie znamionowe	U_N	15 kV
Prąd znamionowy	I_N	140 A
Napięcie na ograniczniku w stanie wyczekiwania przy I_N	U_{sfcl}	< 1 V
Spodziewany prąd zwarciový szczytowy	i_{peak}	40 kA
Ograniczony prąd zwarciový szczytowy	i_p	3,4 kA
Czas ograniczania prądu	t_{lim}	160 ms
Temperatura pracy	T	77,4 K
Wysokość kriostatu	H	1 m
Średnica kriostatu	O.D.	0,85 m
Średnica uzwojenia miedzianego	I.D.	0,578 m
Średnica uzwojeń nadprzewodnikowych	I.O.	0,506 m
Liczba zwojów pierwotnego uzwojenia miedzianego	n_{Cu}	185
Liczba zwojów pierwotnego uzwojenia nadprzewodnikowego	$n_{HTS I}$	144
Liczba zwojów wtórnego uzwojenia nadprzewodnikowego	$n_{HTS II}$	144
Długość uzwojenia miedzianego	l_{Cu}	337 m
Długość pierwotnego uzwojenia nadprzewodnikowego	$l_{HTS I}$	229 m
Długość wtórnego uzwojenia nadprzewodnikowego	$l_{HTS II}$	229 m

W uzwojeniach nadprzewodnikowego ogranicznika prądu zastosowano taśmę ReBCO o szerokości 12 mm firmy SuperPower z warstwą srebra o grubości 2 μm i niemagnetycznym podłożu Hastelloy o grubości 50 μm . Długość taśmy jest określana przez temperaturę taśmy HTS w chwili wyłączenia zwarcia

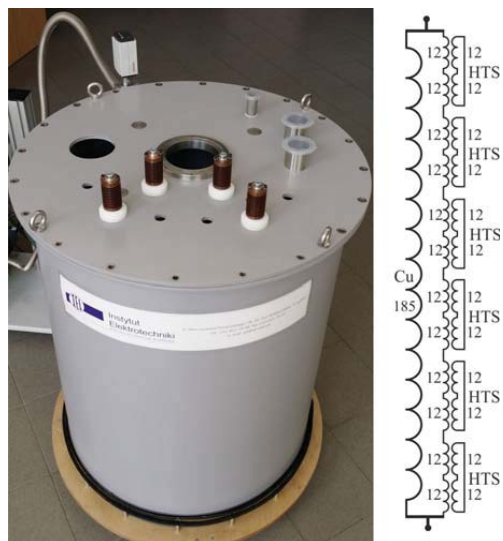
oraz przez dopuszczalną wartość napięcia na ograniczniku podczas ograniczania prądu zwarciego. Zakładając maksymalną temperaturę taśmy nadprzewodnikowej 200 K po 160 ms trwania zwarcia dobrano długość taśmy nadprzewodnikowej, która wynosiła 229 m dla pierwotnego i 229 m dla wtórnego uzwojenia nadprzewodnikowego (tabela 25). Miedziane i nadprzewodnikowe uzwojenia pierwotne są połączone równolegle do siebie.

Ogranicznik został zaprojektowany do pracy w ciekłym azocie. Całkowite straty mocy w ograniczniku w temperaturze 77 K (138,9 W) można oszacować jako sumę strat AC taśmy HTS (22,9 W), strat ciepła w przepustach prądowych (26,8 W), strat ciepłych w kriostacie próżniowym (50 W) oraz strat występujących w połączeniach pomiędzy doprowadzeniami miedzianymi a taśmą HTS wewnątrz kriostatu (39,2 W).



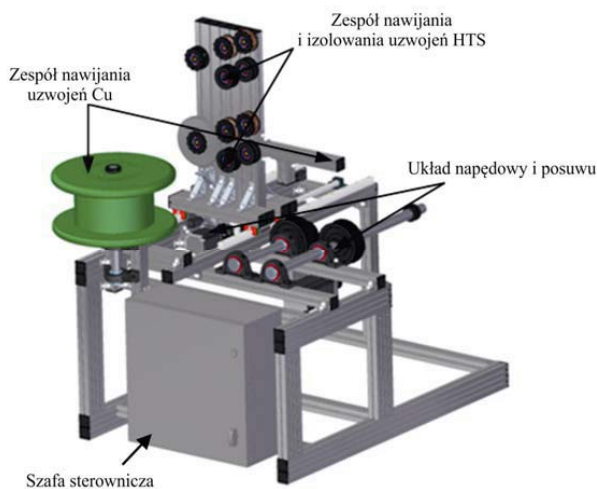
Rys. 7.2. Zasada działania nadprzewodnikowego ogranicznika prądu:
a) w warunkach normalnych, b) w warunkach zwarcioowych

Zasadę działania nadprzewodnikowego ogranicznika prądu przedstawiono na rysunku 7.2. W warunkach normalnych prąd znamionowy o wartości skutecznej 140 A płynie przez pierwotne uzwojenie HTS włączone szeregowo do zabezpieczanego obwodu (rys. 7.2a). Strumień magnetyczny wytwarzany przez pierwotne uzwojenie HTS jest kompensowany przez strumień magnetyczny wytworzony przez prąd płynący we wtórnym zwartym uzwojeniu HTS ogranicznika. Ogranicznik wykazuje bardzo małą impedancję, a napięcie mierzone na zaciskach ogranicznika jest mniejsze od 1 V. Po przekroczeniu prądu w uzwojeniu wtórnym ogranicznika następuje bardzo szybki wzrost rezystancji uzwojeń nadprzewodnikowych, a prąd zwarcioowy płynie głównie przez pierwotne uzwojenie miedziane (rys. 7.2b).



Rys. 7.3. Bezrdzeniowy nadprzewodnikowy ogranicznik prądu w kriostacie azotowym z izolacją próżniową i jego schemat elektryczny

Uzwojenia ogranicznika prądu zostały wykonane na specjalnie w tym celu zaprojektowanej i wykonanej nawijarce (rys. 7.4). Sterowana komputerowo nawijarka posiada możliwość płynnej regulacji prędkości nawijania, przesuwu i ciągłego kontrolowania parametrów nawijania. Konfigurując odpowiednio nawijarkę możemy nawijać zarówno spiralne uzwojenia miedziane, jak i kilka uzwojeń nadprzewodnikowych w tym samym czasie z jednoczesnym izolowaniem uzwojeń.



Rys. 7.4. Projekt CAD nawijarki uzwojeń ogranicznika

7.1.1. Uzwojenia nadprzewodnikowe ogranicznika

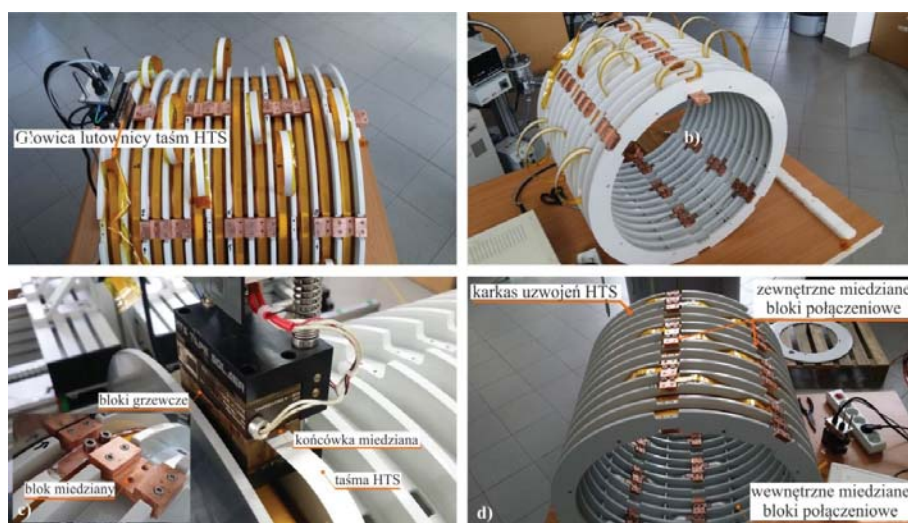
Pierwotne i wtórne uzwojenie nadprzewodnikowe ogranicznika zostało nawinięta taśmą SF12050 produkcji SuperPower o szerokości 12 mm i grubości 0,055 mm z warstwą srebra o grubości 2 μm . Pojedyncze cewki uzwojeń ogranicznika nawijane były w poszczególnych rowkach karkasu wykonanego z kompozytu epoksydowo-szklanego typu E (rys. 7.5a). Proces nawijania i izolowania pierwotnego i wtórnego uzwojenia nadprzewodnikowego ogranicznika przedstawia rysunek 7.5b. Jednocześnie nawijane i izolowane były dwie cewki, jedna cewka dla uzwojenia pierwotnego, a druga dla uzwojenia wtórnego ogranicznika. Aby sprzężenie magnetyczne pomiędzy uzwojeniami nadprzewodnikowymi było możliwe duże, izolację pomiędzy uzwojeniem pierwotnym i wtórnym stanowi jedna taśma poliimidowa umieszczona pomiędzy dwoma taśmami HTS. Do izolacji zastosowano samoprzylepną taśmę poliimidową Kapton o grubości 50 μm i szerokości 25 mm. Folia poliimidowa została zastosowana zarówno do izolowania pojedynczych zwojów między sobą jak i do izolowania poszczególnych warstw uzwojeń.



Rys. 7.5 a) Karkas uzwojeń nadprzewodnikowych ogranicznika wykonany z kompozytu epoksydowo-szklanego typu E, b) nawijanie dwóch cewek ogranicznika z jednoczesnym izolowaniem zwojów

Konstrukcja cewki nadprzewodnikowej zawiera 25 miedzianych bloków połączeniowych (rys. 7.6d). Po nawinięciu cewek nadprzewodnikowych końce taśmy HTS zostały przyłutowane do miedzianych końcówek wykonanych z blachy miedzianej o grubości 0,3 mm, które zostały następnie przykręcone do miedzianych bloków łączeniowych (rys. 7.6c), uzyskując założoną konfigurację uzwojeń nadprzewodnikowych (rys. 7.3). Konstrukcja ogranicznika zawiera łącznie 50 połączeń śrubowych. Do lutowania użyto pasty lutowniczej Sn62Pb36Ag2 o temperaturze topnienia 179°C oraz lutownicy taśm nadprzewodnikowych, zaprojektowanej i wykonanej w Pracowni Technologii Nadprze-

wodnikowych. Średnia rezystancja kontaktu pomiędzy blokiem miedzianym, a taśmą HTS w temperaturze 77 K wynosi $40 \mu\Omega$. Łączna rezystancja wszystkich połączeń śrubowych wynosi $2 \text{ m}\Omega$, co przekłada się na $39,2 \text{ W}$ strat przy prądzie znamionowym ogranicznika.



Rys. 7.6. Kolejne etapy wykonywania połączeń pomiędzy cewkami nadprzewodnikowymi ogranicznika

7.1.2. Pierwotne uzwojenie miedziane ogranicznika

Pierwotne uzwojenie miedziane połączone równoległe z pierwotnym uzwojeniem nadprzewodnikowym ma 185 izolowanych zwojów. Uzwojenie miedziane nawinięte jest śrubowo, bezpośrednio na karkasie z kompozytu epoksydowo-szklanego typu E, miedzianym izolowanym drutem nawojowym o wymiarach poprzecznych $1,8 \text{ mm} \times 7,5 \text{ mm}$ (rys. 7.7).

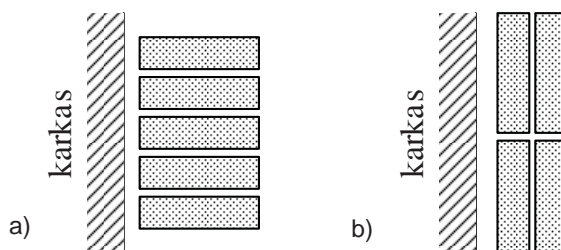
Ze względu na występowanie dużych sił elektrodynamicznych występujących w uzwojeniu podczas przepływu prądu zwarcowego, uzwojenie miedziane ogranicznika zostało dodatkowo po nawinięciu wzmocnione matami z włókna szklanego (rys. 7.7c) oraz zaimpregnowane żywicą epoksydową (rys. 7.7d). Zapobiega to przemieszczaniu się zwojów podczas przepływu prądu zwarcowego. Ze względu na występowanie dużych sił osiowych uzwojenie ogranicznika zostało nawinięte śrubowo „na kant”, co sprawia, że sąsiednie zwoje uzwojenia ściśle przylegają do siebie (rys. 7.8). Proces nawijania uzwojenia pierwotnego został przedstawiony na rysunku 7.9. Do nawinięcia uzwojenia

miedzianego ogranicznika nawijarka została wyposażona w zaprojektowane rolki prowadzące, które wyginają miedziany drut nawojowy w odpowiednią stronę.



Rys. 7.7. Kolejne etapy wykonywania uzwojenia miedzianego ogranicznika:

a) karkas uzwojenia wykonany z kompozytu epoksydowo-szklanego, b) uzwojenie miedziane nawinięte na karkas przed impregnacją, c) impregnacja uzwojenia żywicą epoksydową, d) gotowe uzwojenie miedziane ogranicznika po impregnacji



Rys. 7.8. Uzwojenia nadprzewodnikowego ogranicznika nawinięte:
a) „na kant”, b) „na płasko”



Rys. 7.9. Proces nawijania uzwojenia miedzianego na karkas z kompozytu epoksydowo-szklanego

7.1.3. Montaż nadprzewodnikowego ogranicznika prądu

Rysunek 7.10 przedstawia uzwojenia ogranicznika umieszczone wspólnie. Karkas z miedzianym uzwojeniem pierwotnym ogranicznika znajduje się po zewnętrznej stronie. Uzwojenia ogranicznika podłączone są do pokrywy kriostatu na prętach z włókna szklanego, będące częścią konstrukcji wsporczej ogranicznika (rys. 7.11).



Rys. 7.10. Uzwojenia ogranicznika umieszczone wspólnie



Rys. 7.11. Nadprzewodnikowy ogranicznik prądu zwarciego podczas montażu:
a) uzwojenia ogranicznika podwieszane do pokrywy kriostatu, b) ogranicznik podczas montażu w kriostacie azotowym

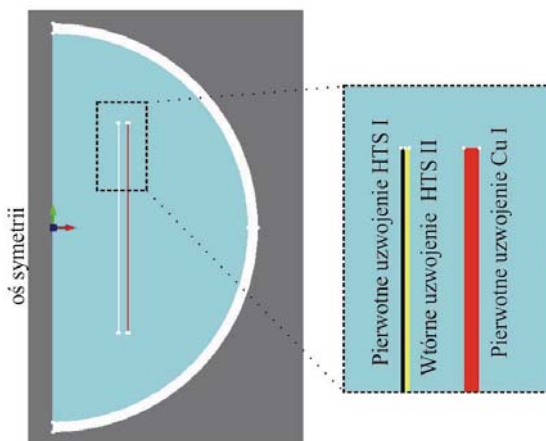
Przepływ ciepła w kriostacie został zredukowany poprzez zastosowanie podwójnych ścianek kriostatu, które oddzielają fizyczny kontakt między częścią wewnętrzną i zewnętrzną kriostatu, tworząc próżnię między podwójnymi ściankami (rys. 7.1 i 7.11). Kriostat wykonany z kompozytu epoksydowo-szklanego ma średnicę zewnętrzną 1 m, wysokość 1 m, a szacunkowy dopływ ciepła do ciekłego azotu wynosi 50 W. Góra pokrywa kriostatu została wyposażona w przepusty prądowe uzwojeń pierwotnych i gniazda pomiarowe oraz otwory umożliwiające odprowadzenie par azotu podczas zwarcia.

Zaprojektowane przepusty prądowe na prąd znamionowy ogranicznika wynoszący 140 A zostały wykonane z miedzi. Izolator przepustu prądowego został wykonany z POM-C. Całkowite straty ciepłne obliczone dla przepustów prądowych wynoszą 6,7 W przy prądzie znamionowym i 2,3 W w warunkach bezprądowych.

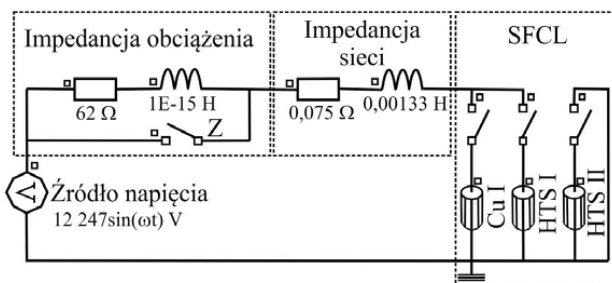
7.2. Modele numeryczne ogranicznika 15 kV / 140 A

7.2.1. Model numeryczny ogranicznika do analizy wpływu liczby zwojów ogranicznika na temperaturę końcową w chwili wyłączenia zwarcia

Omawiany model numeryczny ogranicznika 15 kV / 140 A został wykonany w module "Transient Magnetic" programu polowego Flux2D firmy Cedrat. Geometria rzeczywistego modelu ogranicznika została zastąpiona uproszczoną osiowo-symetryczną geometrią 2D (rys. 7.12). Modułowa konstrukcja została zastąpiona przez trzy obszary prostokątne o wysokości 0,412 m i zmiennym wymiarze promieniowym zależnym od liczby zwojów uzwojenia (rys. 7.12).



Rys. 7.12. Uproszczona geometria ogranicznika 15 kV / 140 A w modelu numerycznym w programie Cedrat Flux2D



Rys. 7.13. Schemat elektryczny obwodu zwarciego z szeregowo włączonym ogranicznikiem w programie Cedrat Flux2D

Część polowa modelu numerycznego została sprzężona z zewnętrznym obwodem elektrycznych, który został przedstawiony na rysunku 7.13. Obwód elektryczny składa się z sinusoidalnego źródła napięcia, elementów odzwierciedlających impedancję linii elektroenergetycznej, szeregowo włączonego ogranicznika prądu zwarciego, którego uzwojenia są sprzężone z częścią polową modelu numerycznego, oraz sterowanej w czasie impedancji obciążenia umożliwiającej wywołanie zwarcia w badanym układzie.

TABELA 26

Parametry modeli numeryczny ogranicznika 15 kV / 140 A

Model	Parametr	Cu I	HTS I	HTS II
A	Rodzaj przewodu	Cu	SF12050	SF12050
	Liczba zwojów	162	72	72
	Długość przewodu	294 m	114 m	114 m
B	Rodzaj przewodu	Cu	SF12050	SF12050
	Liczba zwojów	162	84	84
	Długość przewodu	294 m	134 m	134 m
C	Rodzaj przewodu	Cu	SF12050	SF12050
	Liczba zwojów	162	108	108
	Długość przewodu	294 m	172 m	172 m
D	Rodzaj przewodu	Cu	SF12050	SF12050
	Liczba zwojów	216	132	132
	Długość taśmy	392 m	210 m	210 m
E	Rodzaj przewodu	Cu	SF12050	SF12050
	Liczba zwojów	216	144	144
	Długość przewodu	392 m	229 m	229 m
F	Rodzaj przewodu	Cu	SF12050	SF12050
	Liczba zwojów	216	156	156
	Długość przewodu	392 m	248 m	248 m
G	Rodzaj przewodu	Cu	SF12050	SF12050
	Liczba zwojów	270	72	72
	Długość przewodu	490 m	287 m	287 m
H	Rodzaj przewodu	Cu	SF12050	SF12050
	Liczba zwojów	270	84	84
	Długość przewodu	490 m	134 m	134 m
I	Rodzaj przewodu	Cu	SF12050	SF12050
	Liczba zwojów	270	96	96
	Długość przewodu	490 m	152 m	152 m
J	Rodzaj przewodu	Cu	SF12050	SF12050
	Liczba zwojów	270	132	132
	Długość przewodu	490 m	210 m	210 m
K	Rodzaj przewodu	Cu	SF12050	SF12050
	Liczba zwojów	270	156	156
	Długość przewodu	490 m	248 m	248 m
L	Rodzaj przewodu	Cu	SF12050	SF12050
	Liczba zwojów	270	168	168
	Długość przewodu	490 m	267 m	267 m
M	Rodzaj przewodu	Cu	SF12050	SF12050
	Liczba zwojów	270	180	180
	Długość przewodu	490 m	286 m	286 m

Problemy termiczne występujące w uzwojeniach ogranicznika zostały uwzględnione w procedurze użytkownika napisanej w Fortranie. Zgodnie z tą procedurą w każdym kroku obliczeniowych temperatura uzwojeń ogranicznika jest wyznaczana z równania bilansu energetycznego, w oparciu o aktualną wartość prądu płynącego przez uzwojenia ogranicznika. Równanie bilansu energetycznego uwzględnia również przepływ ciepła do cieczy chłodzącej. Po wyznaczeniu aktualnej temperatury uzwojeń obliczana jest rezystancja poszczególnych uzwojeń na podstawie eksperymentalnie wyznaczonej zależności $R(I, T)$ dla taśmy nadprzewodnikowej SF12050.

Symulacje zostały przeprowadzone dla trzynastu modeli ogranicznika A – M, których parametry zostały zamieszczone w tabeli 26. W poszczególnych modelach numerycznych A – M zmieniano impedancję uzwojeń ogranicznika poprzez zmianę liczby zwojów uzwojenia miedzianego i uzwojeń nadprzewodnikowych. Wykonane modele numeryczne pozwalają na przeprowadzenie analizy wpływu liczby zwojów poszczególnych uzwojeń ogranicznika na temperaturę końcową uzwojeń w chwili wyłączenia zwarcia. Przyjęta maksymalna wartość temperatury uzwojeń nadprzewodnikowych ogranicznika w chwili wyłączenia zwarcia wynosi 200 K.

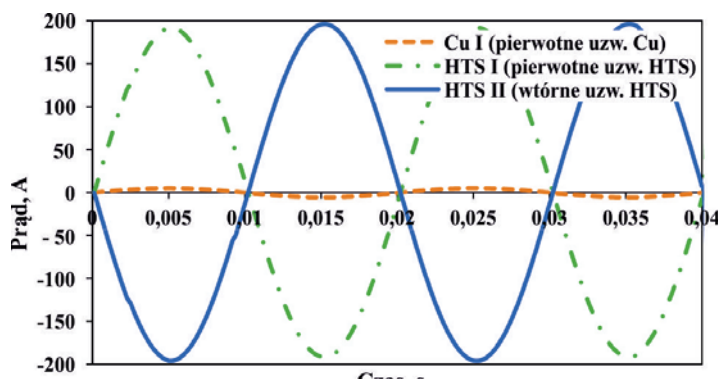
Model numeryczne zostały podzielone na trzy grupy w zależności od liczby zwojów uzwojenia miedzianego. W trzech pierwszych modelach numerycznych A – C uzwojenie miedziane ma 162 zwojów, w modelach D – F uzwojenie miedziane ma 216 zwojów, w pozostałych modelach G – M uzwojenie miedziane ma 270 zwojów. Liczba zwojów uzwojeń nadprzewodnikowych zmieniła się w zakresie od 72 do 180 zwojów.

W zewnętrznym obwodzie elektrycznym modelu numerycznego zamknięcie wyłącznika Z umożliwia symulację zwarcia w obwodzie (rys. 7.13). Przez pierwsze 40 ms symulacji wyłącznik jest otwarty, a przez ogranicznik płynie prąd znamionowy o wartości skutecznej 140 A, ogranicznik prądu znajduje się w stanie wyczekiwania, a jego uzwojenia nadprzewodnikowe znajdują się w stanie nadprzewodzącym. Po 40 milisekundach symulacji, w chwili przejścia napięcia zasilającego przez zero, wyłącznik Z jest zamykany, przez ogranicznik zaczyna płynąć prąd zwarciový powodując przejście uzwojeń nadprzewodnikowych ogranicznika do stanu rezystywnego, zwiększenie impedancji ogranicznika, a w konsekwencji ograniczenie prądu zwarciovýgo. Symulacje przeprowadzono dla maksymalnego czasu pracy ogranicznika wynoszącego 160 ms. Po 160 milisekundach od chwili wystąpienia zwarcia w obwodzie następuje wyłączenie obwodu przez wyłącznik szeregowo połączony z ogranicznikiem.

W modelu możliwe jest uzyskanie przebiegów prądu zwarciovýgo w obwodzie zwarciovým z ogranicznikiem i bez ogranicznika, jak również przebiegów zmian rezystancji i temperatury poszczególnych uzwojeń ogranicznika podczas ograniczania prądu zwarciovýgo.

7.2.1.1. Wyniki obliczeń numerycznych

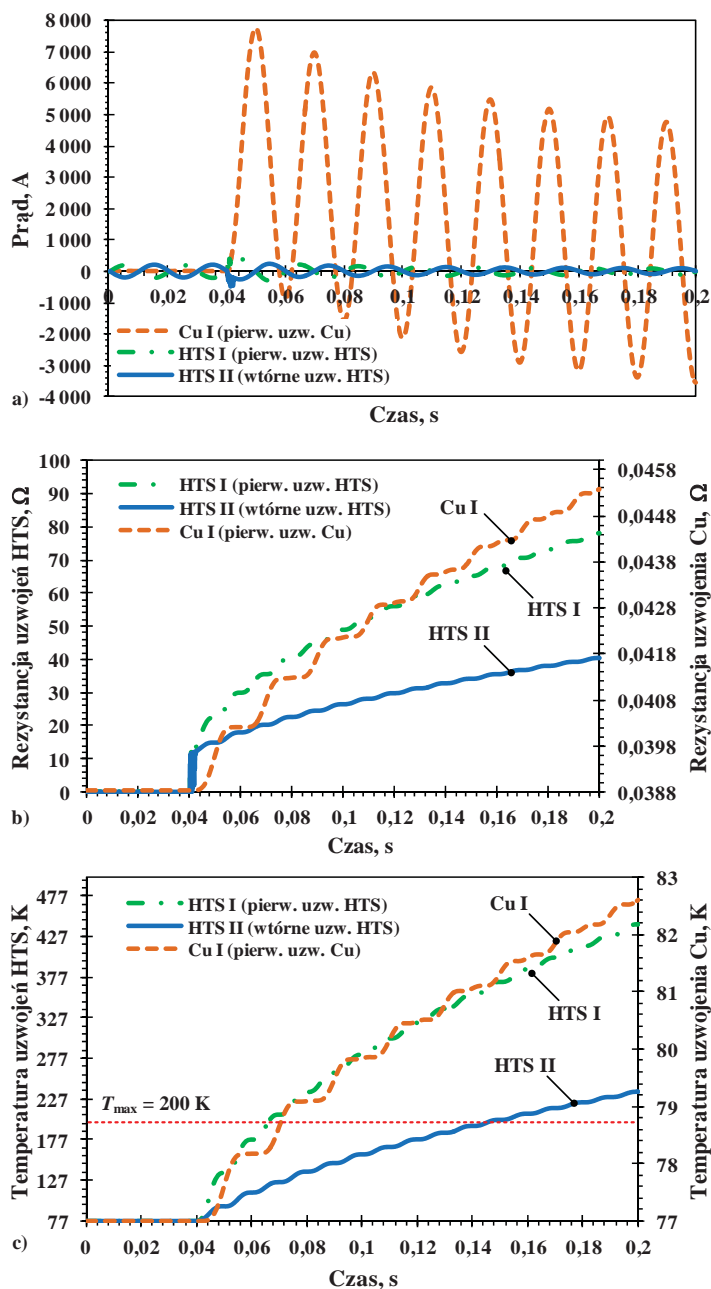
W stanie wyczekiwania ogranicznika, to jest w pierwszych 40 ms symulacji, uzwojenia nadprzewodnikowe ogranicznika znajdują się w stanie nadprzewodzącym. Przez ogranicznik płynie prąd znamionowy o wartości skutecznej 140 A (rys. 7.14). Wartość napięcia dla wszystkich modeli ogranicznika jest mniejsza od 1 V. Niewielka wartość napięcia na ograniczniku w porównaniu do napięcia zasilającego jest rezultatem małej wartości reaktancji rozproszenia, która jest skutkiem zastosowanej konstrukcji uzwojeń, w której uzwojenia nadprzewodnikowe ogranicznika są bardzo dobrze sprzężone magnetycznie ze sobą.



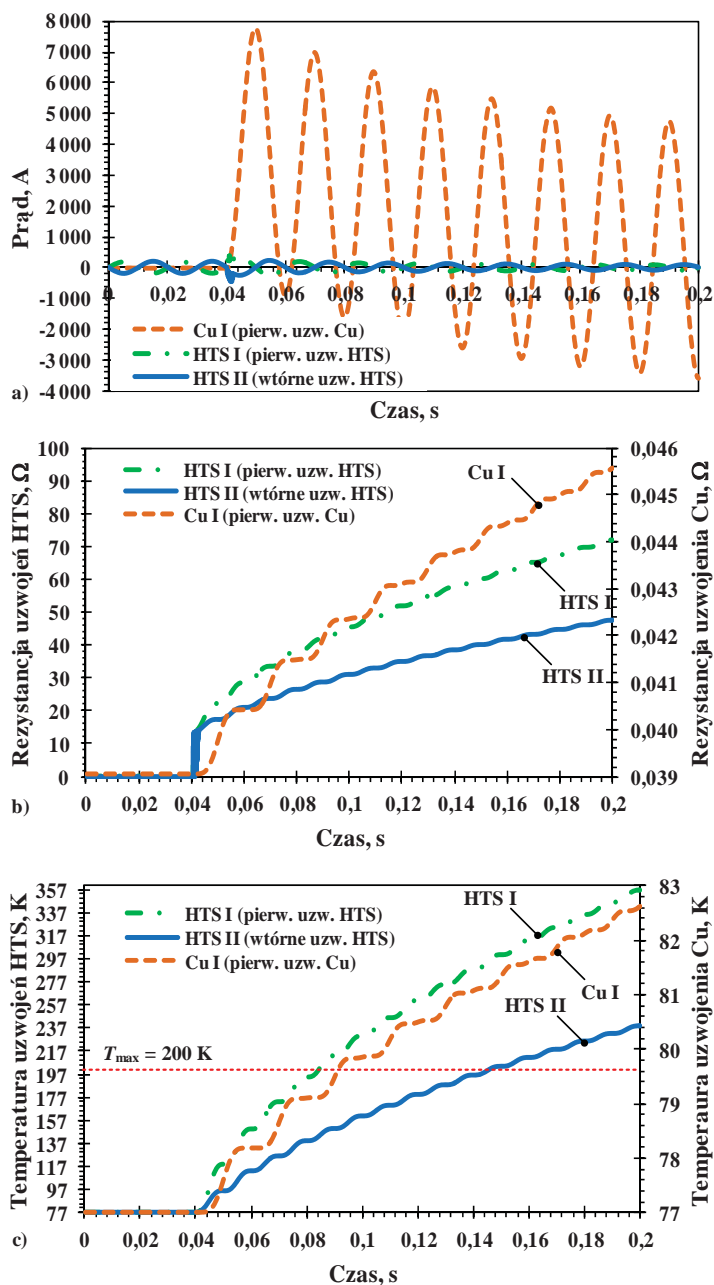
Rys. 7.14. Przebiegi prądu w uzwojeniach ogranicznika w stanie wyczekiwania

Na rysunkach 7.15 – 7.27 przedstawiono przebiegi prądu w uzwojeniach ogranicznika, zmiany rezystancji poszczególnych uzwojeń ogranicznika oraz zmiany temperatury uzwojeń ogranicznika podczas ograniczania prądu zwarciovego dla wszystkich analizowanych modeli numerycznych.

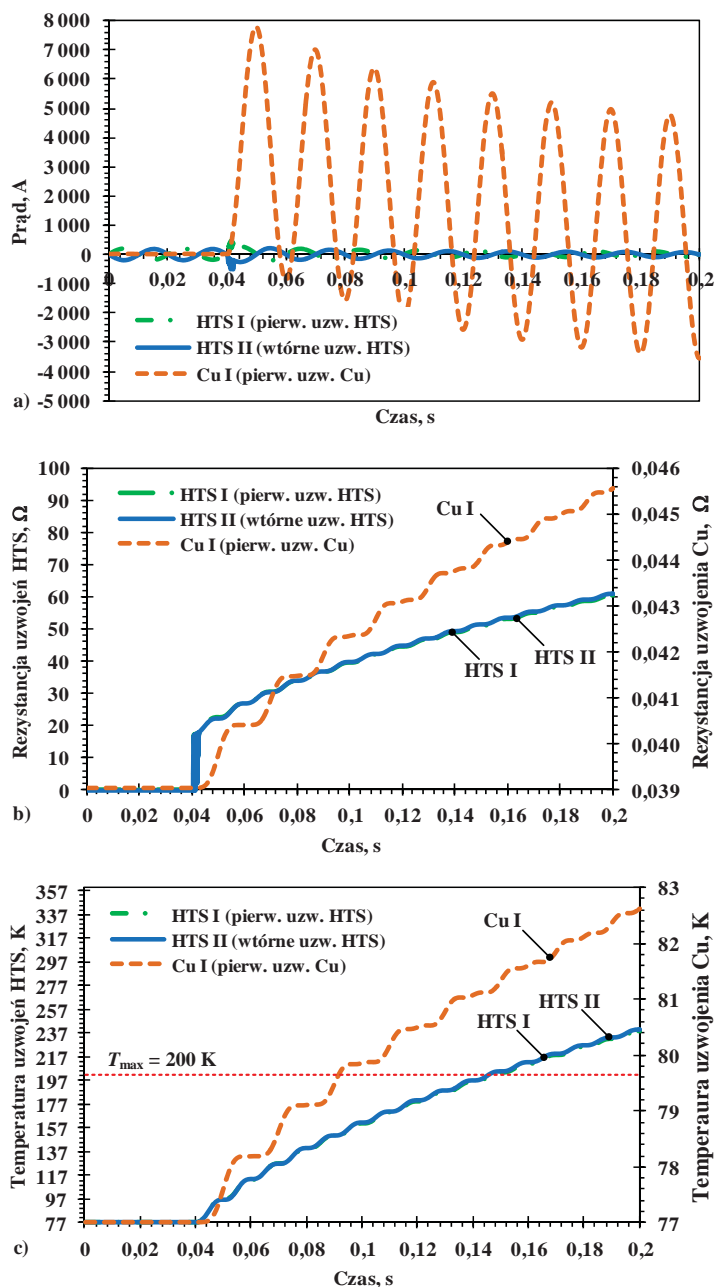
Podczas zwarcia trwającego od 40 ms do 200 ms symulacji prąd zwarciovowy płynie przez ogranicznik. Przepływ prądu zwarciovego przez uzwojenia nadprzewodnikowe ogranicznika powoduje bardzo szybkie nagrzewanie się uzwojeń. Temperatura uzwojeń ogranicznika rośnie od temperatury początkowej 77,4 K do temperatury maksymalnej T_{\max} , która jest osiągana w momencie wyłączenia prądu zwarciovego. Z przeprowadzonych symulacji wynika, że temperatura uzwojeń nadprzewodnikowych wzrasta znacznie szybciej niż temperatura uzwojenia miedzianego i osiąga różne wartości w momencie wyłączenia zwarcia (rys. 7.15 – 7.27).



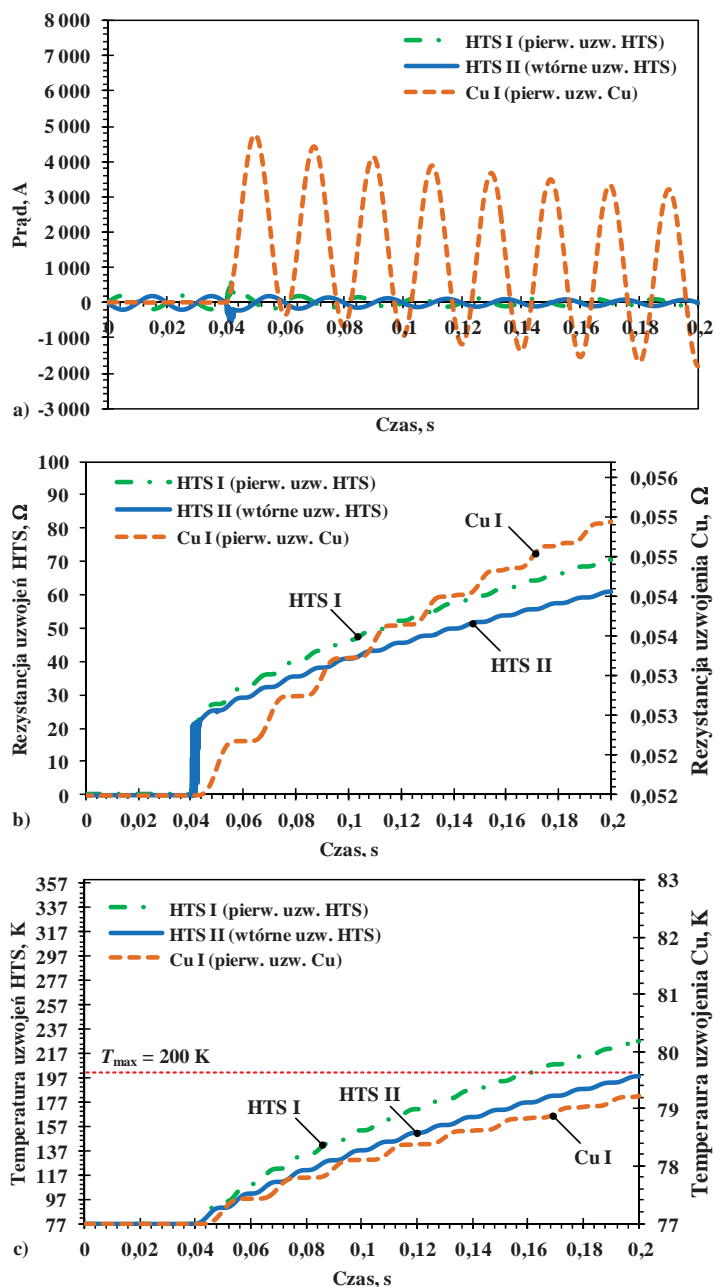
Rys. 7.15. Model A – przebiegi prądu w uzwojeniach ogranicznika (a), zmiany rezystancji poszczególnych uzwojeń ogranicznika (b) oraz zmiany temperatury uzwojeń ogranicznika podczas ograniczania prądu zwarciego(c)



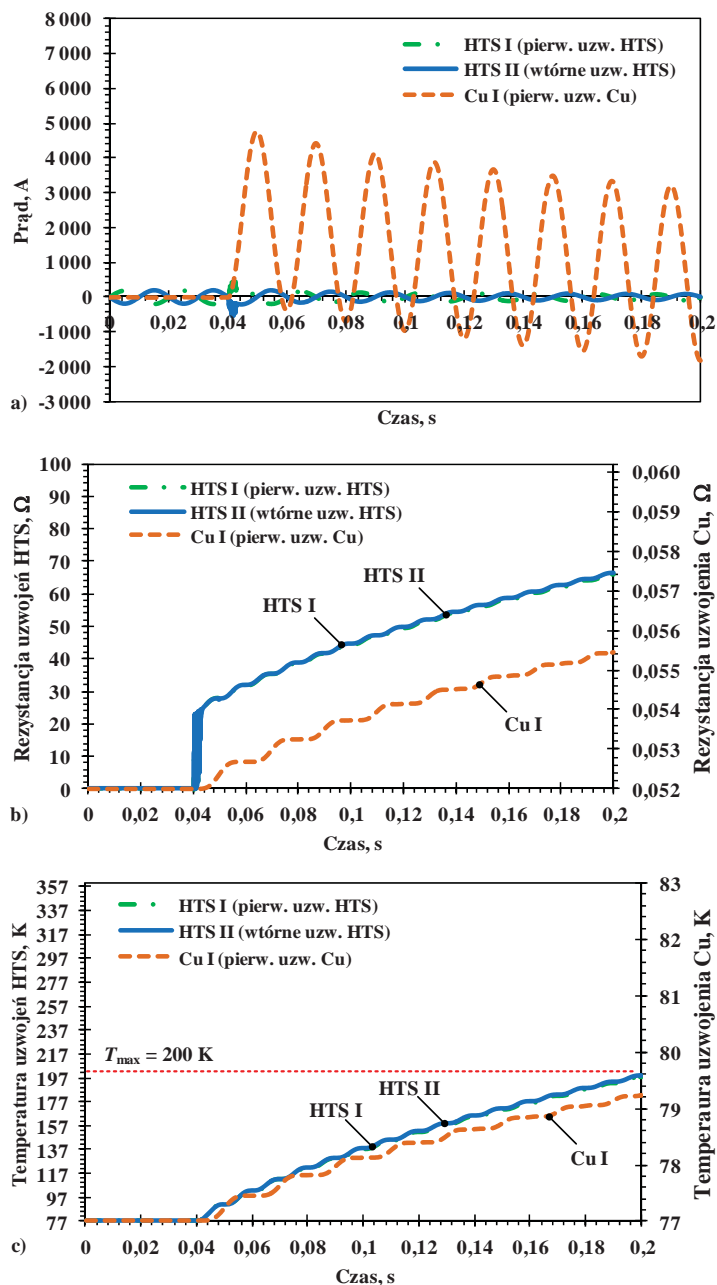
Rys. 7.16. Model B – przebiegi prądu w uzwojeniach ogranicznika (a), zmiany rezystancji poszczególnych uzwojeń ogranicznika (b) oraz zmiany temperatury uzwojeń ogranicznika podczas ograniczania prądu zwarcowego (c)



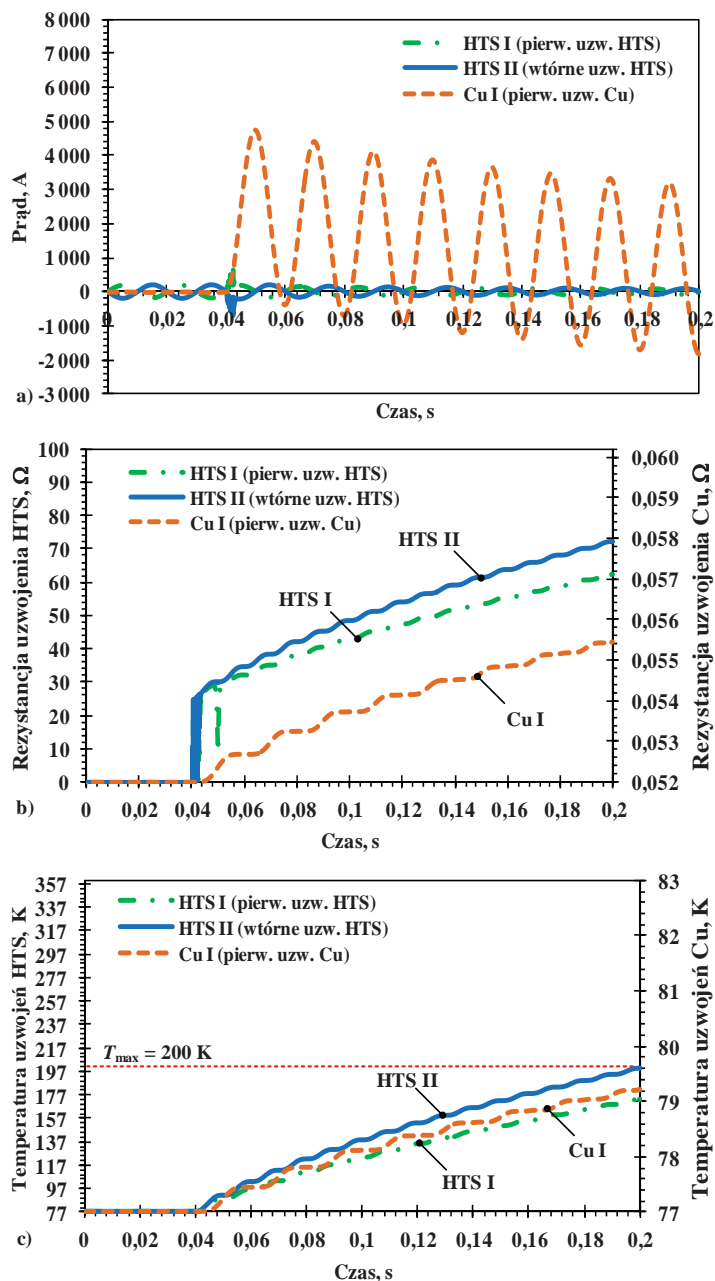
Rys. 7.17. Model C – przebiegi prądu w uzwojeniach ogranicznika (a), zmiany rezystancji poszczególnych uzwojeń ogranicznika (b) oraz zmiany temperatury uzwojeń ogranicznika podczas ograniczania prądu zwarciovego (c)



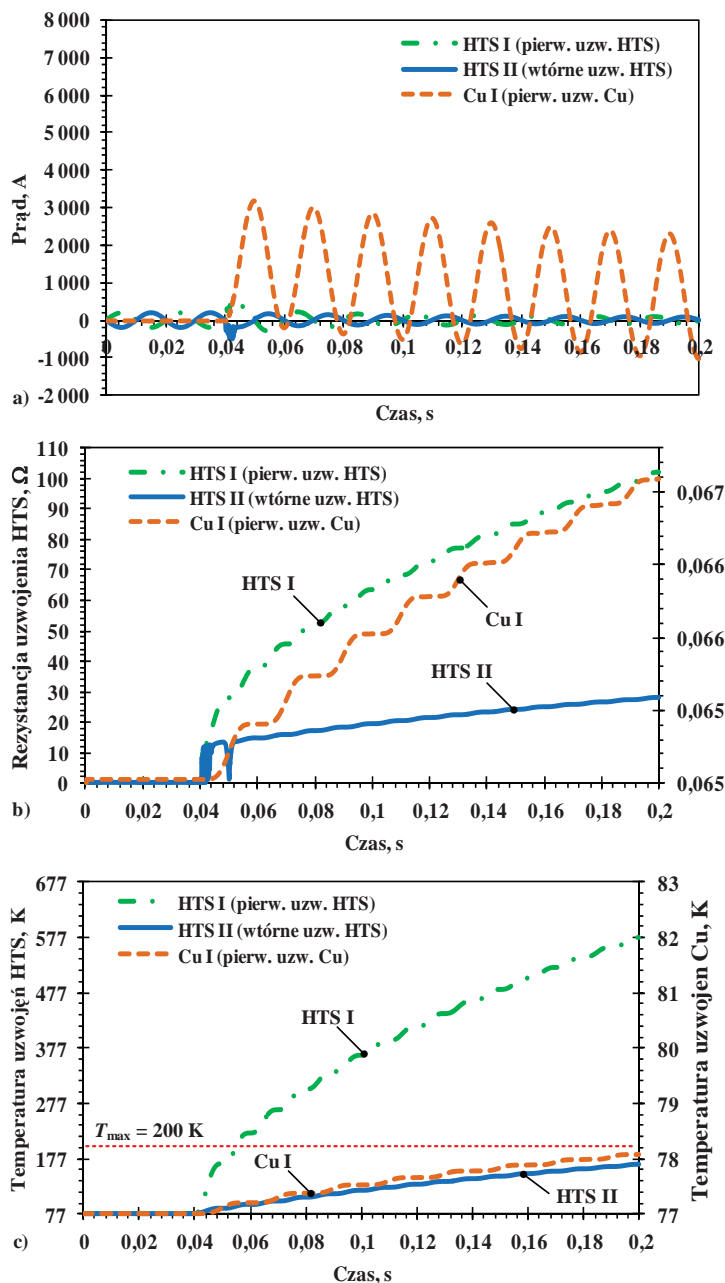
Rys. 7.18. Model D – przebiegi prądu w uzwojeniach ogranicznika (a), zmiany rezystancji poszczególnych uzwojeń ogranicznika (b) oraz zmiany temperatury uzwojeń ogranicznika podczas ograniczania prądu zwarcowego (c)



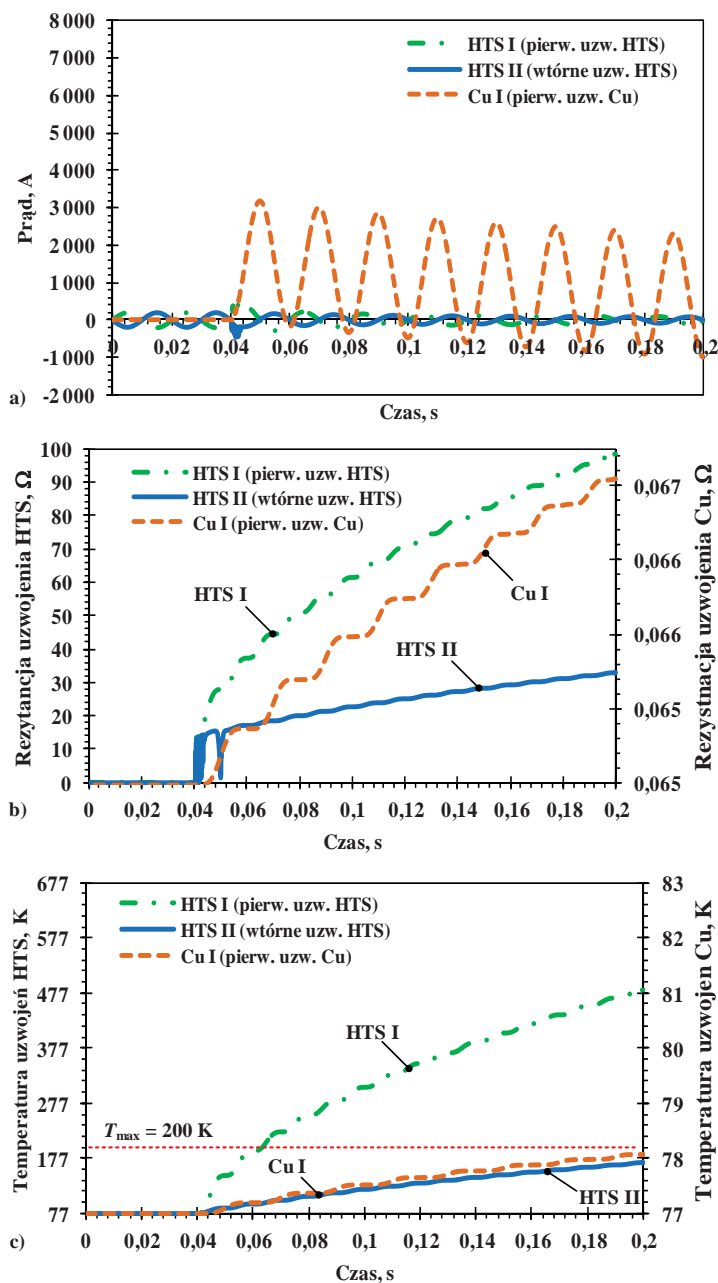
Rys. 7.19. Model E – przebiegi prądu w uzwojeniach ogranicznika (a), zmiany rezystancji poszczególnych uzwojeń ogranicznika (b) oraz zmiany temperatury uzwojeń ogranicznika podczas ograniczania prądu zwarcowego (c)



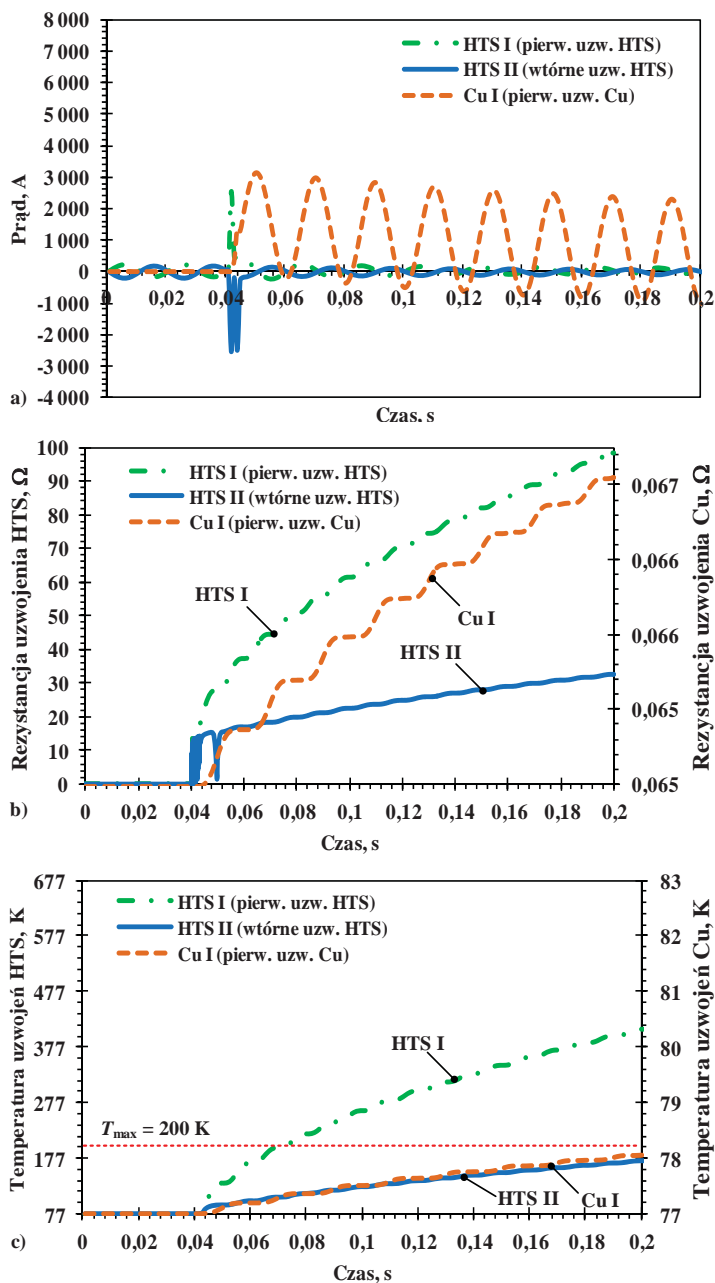
Rys. 7.20. Model F – przebiegi prądu w uzwojeniach ogranicznika (a), zmiany rezystancji poszczególnych uzwojeń ogranicznika (b) oraz zmiany temperatury uzwojeń ogranicznika podczas ograniczania prądu zwarciovego (c)



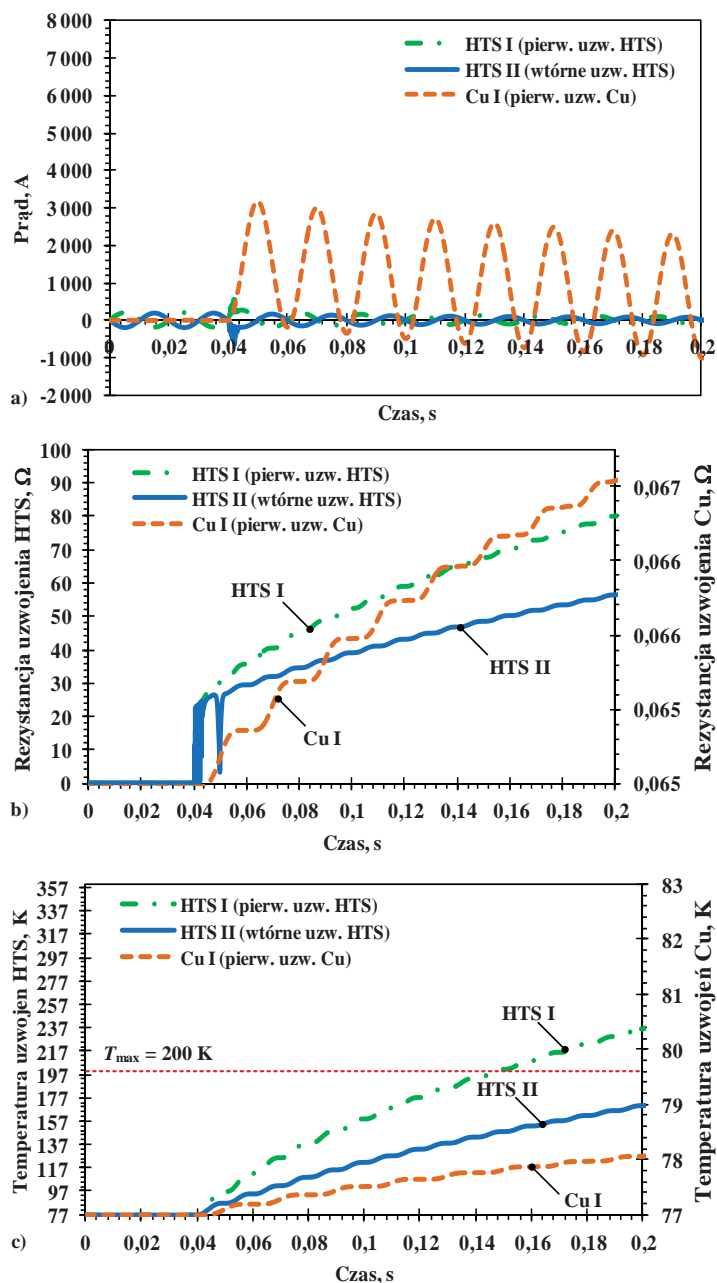
Rys. 7.21. Model G – przebiegi prądu w uzwojeniach ogranicznika (a), zmiany rezystancji poszczególnych uzwojeń ogranicznika (b) oraz zmiany temperatury uzwojeń ogranicznika podczas ograniczania prądu zwarcowego (c)



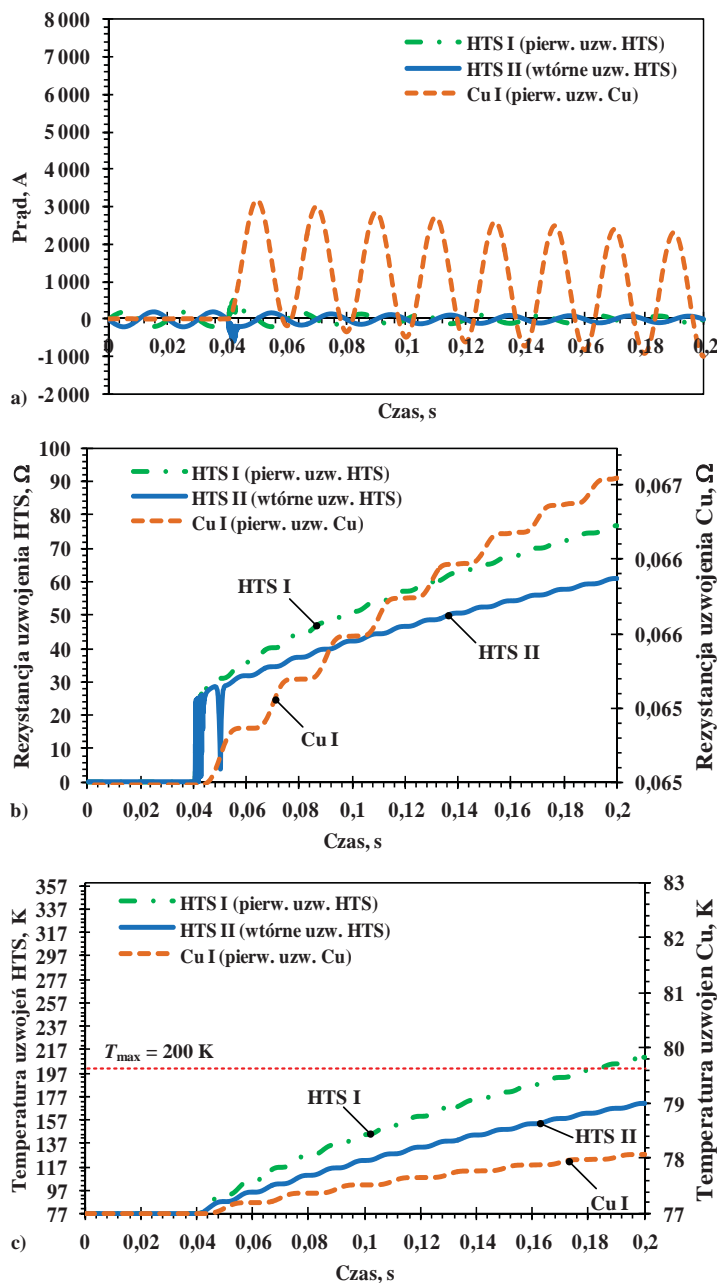
Rys. 7.22. Model H – przebiegi prądu w uzwojeniach ogranicznika (a), zmiany rezystancji poszczególnych uzwojeń ogranicznika (b) oraz zmiany temperatury uzwojeń ogranicznika podczas ograniczania prądu zwarciovego (c)



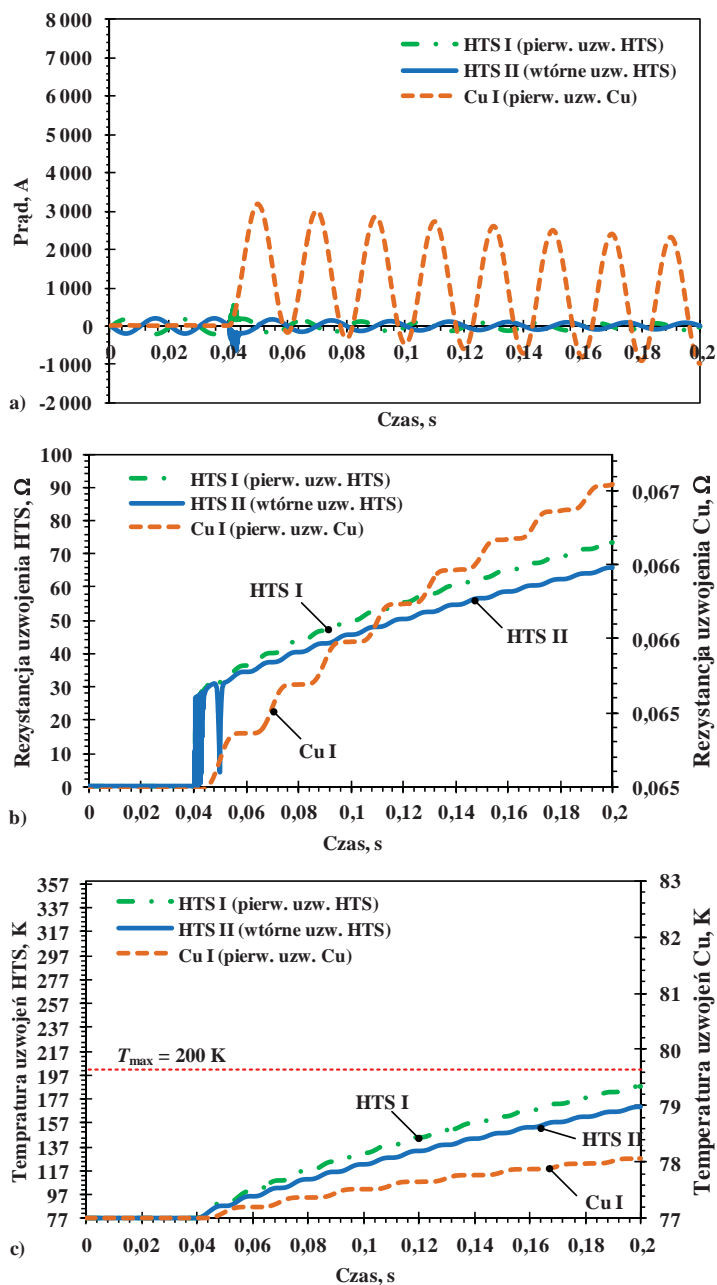
Rys. 7.23. Model I – przebiegi prądu w uzwojeniach ogranicznika (a), zmiany rezystancji poszczególnych uzwojeń ogranicznika (b) oraz zmiany temperatury uzwojeń ogranicznika podczas ograniczania prądu zwarcowego (c)



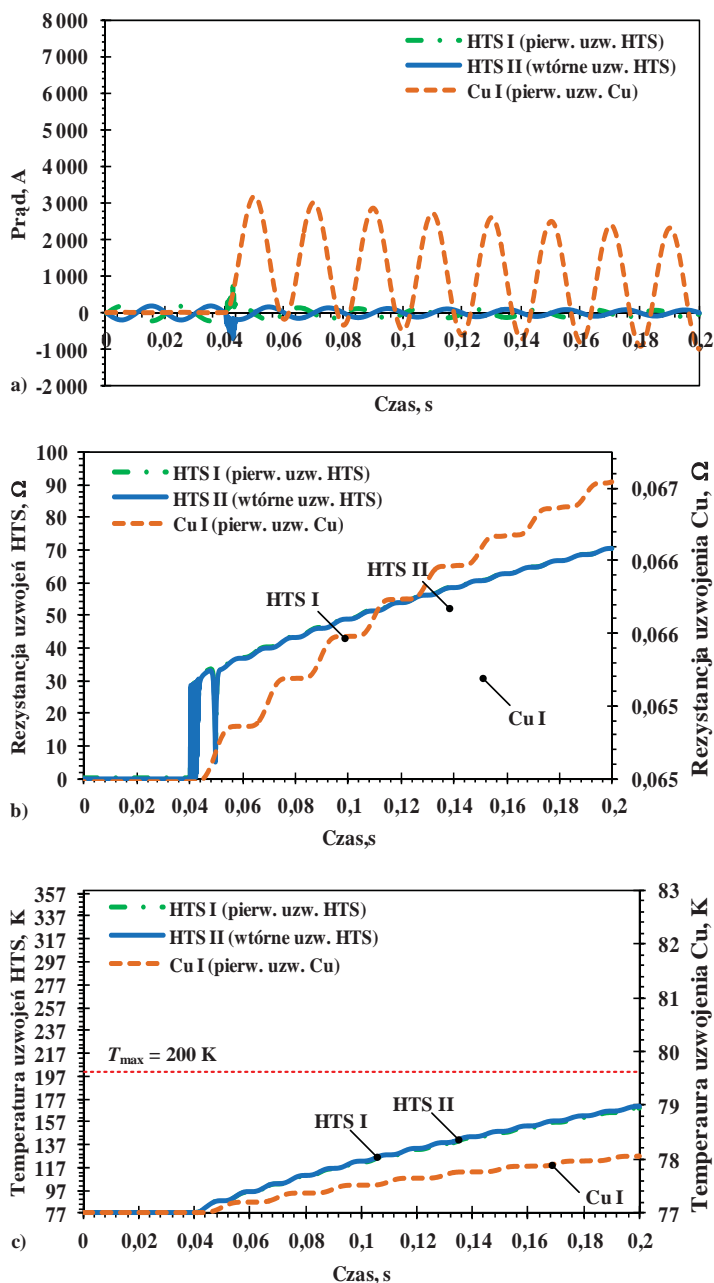
Rys. 7.24. Model J – przebiegi prądu w uzwojeniach ogranicznika (a), zmiany rezystancji poszczególnych uzwojeń ogranicznika (b) oraz zmiany temperatury uzwojeń ogranicznika podczas ograniczania prądu zwarcowego (c)



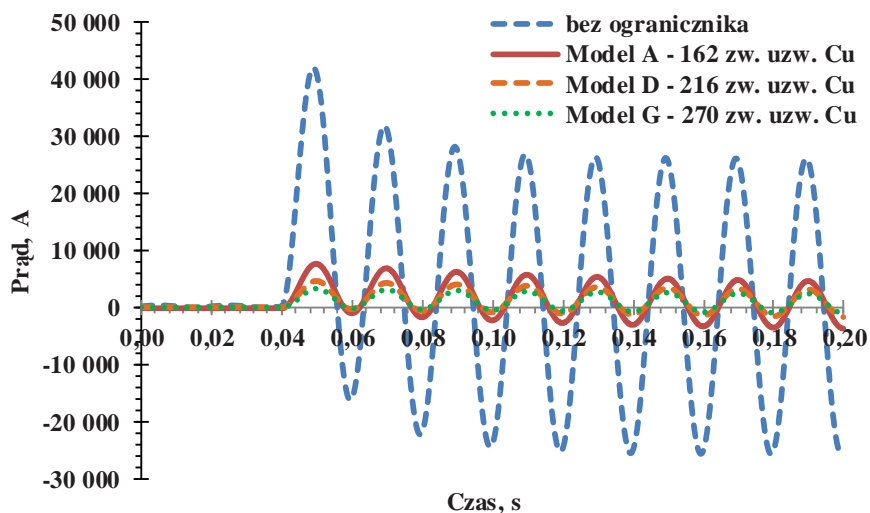
Rys. 7.25. Model K – przebiegi prądu w uzwojeniach ogranicznika (a), zmiany rezystancji poszczególnych uzwojeń ogranicznika (b) oraz zmiany temperatury uzwojeń ogranicznika podczas ograniczania prądu zwarcowego (c)



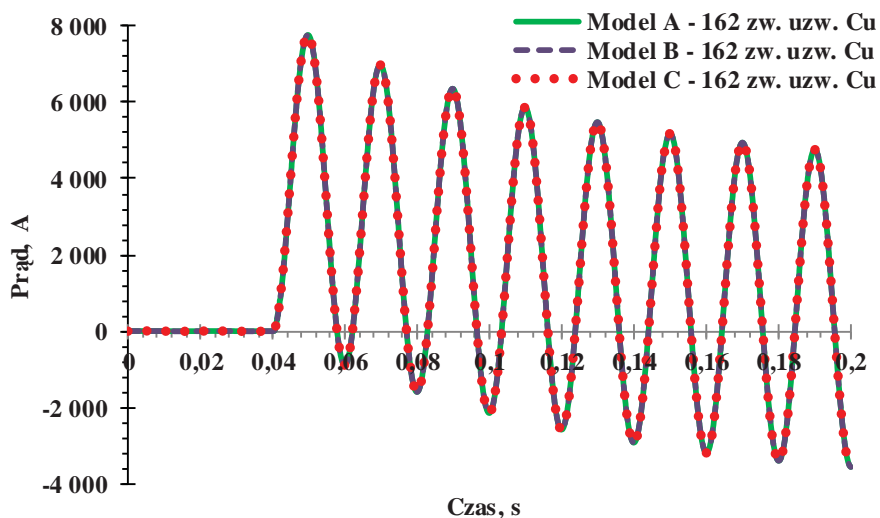
Rys. 7.26. Model L – przebiegi prądu w uzwojeniach ogranicznika (a), zmiany rezystancji poszczególnych uzwojeń ogranicznika (b) oraz zmiany temperatury uzwojeń ogranicznika podczas ograniczania prądu zwarciovego (c)



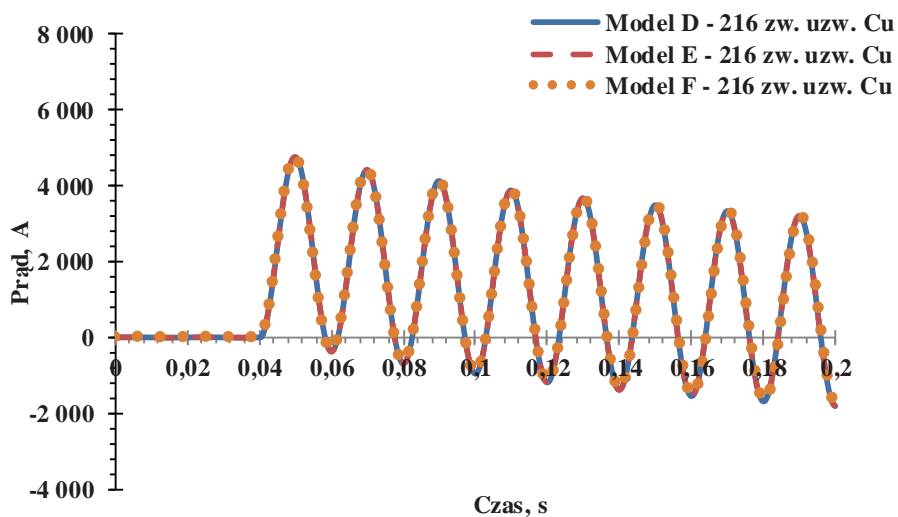
Rys. 7.27. Model M – przebiegi prądu w uzwojeniach ogranicznika (a), zmiany rezystancji poszczególnych uzwojeń ogranicznika (b) oraz zmiany temperatury uzwojeń ogranicznika podczas ograniczania prądu zwarciovego (c)



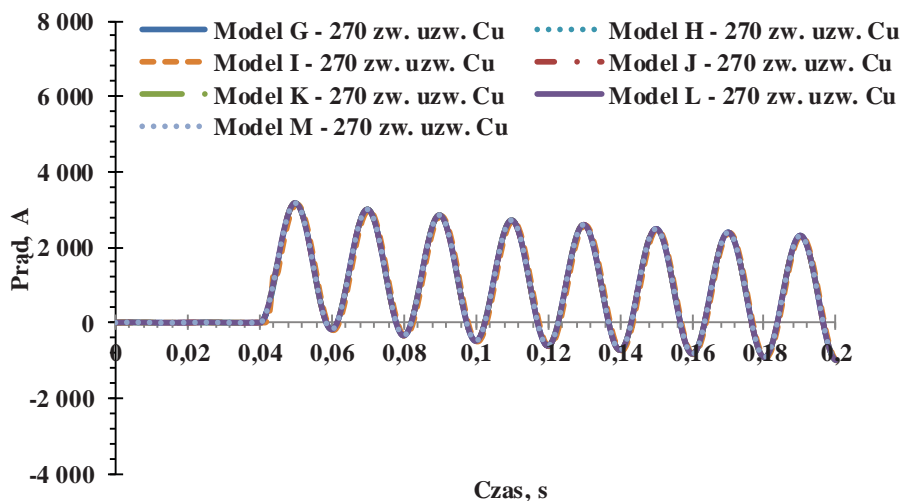
Rys. 7.28. Przebiegi prądu w obwodzie zwarciovym bez ogranicznika i z ogranicznikiem



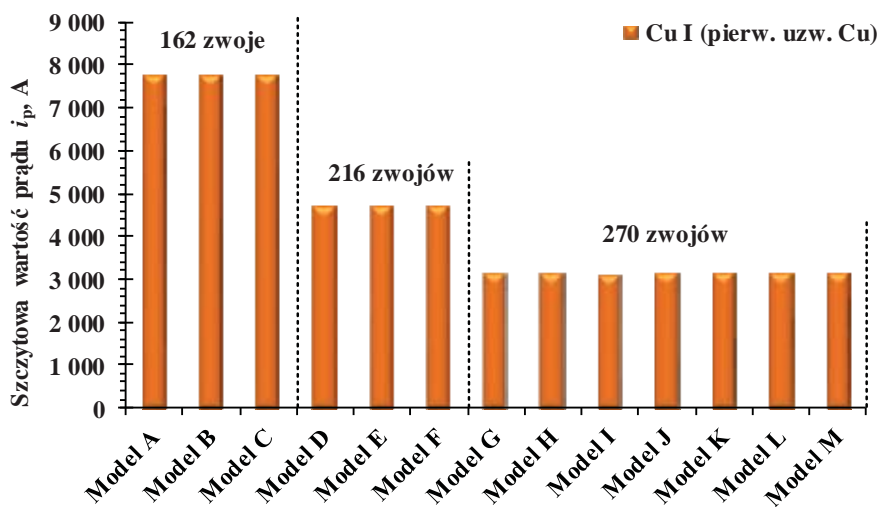
Rys. 7.29. Przebiegi ograniczonego prądu zwarciovego w modelach A-C (uzwojenia miedziane o 162 zwojach)



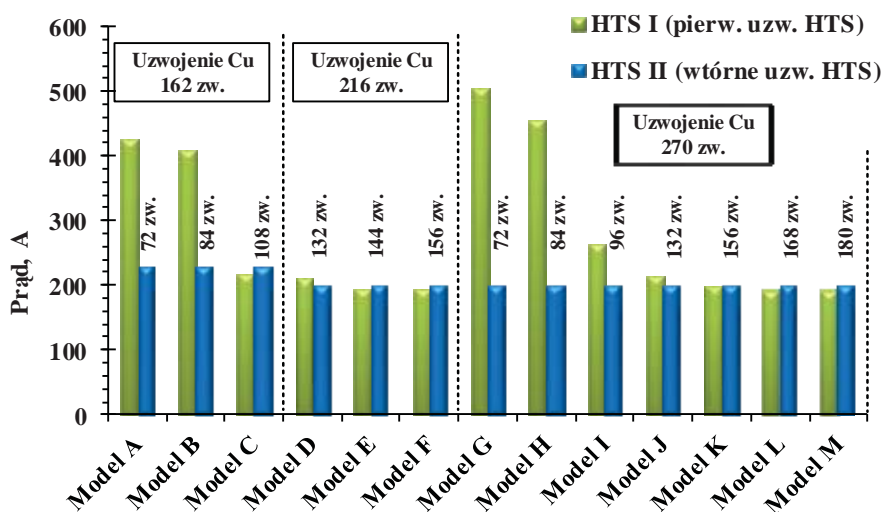
Rys. 7.30. Przebiegi ograniczonego prądu zwarciovego w modelach D-E (uzwojenie miedziane o 216 zwojach)



Rys. 7.31. Przebiegi ograniczonego prądu zwarciovego w modelach G-M (uzwojenie miedziane o 270 zwojach)



Rys. 7.32. Porównanie szczytowej wartości prądu i_p w obwodzie z ogranicznikiem



Rys. 7.33. Porównanie maksymalnej wartości prądu w uzwojeniach nadprzewodnikowych ogranicznika

TABELA 27

Prąd zwarciovyy szczytovy i końcowa temperatura uzwojeń w chwili wyłączenia zwarcia (162 zwoje uzwojenia miedzianego)

Model	Parametr	Cu I	HTS I	HTS II
A	Liczba zwojów	162 zw.	72 zw.	72 zw.
	Temp. maksymalna – T_{\max}	82,6 K	442,6 K	236,5 K
	Rezystancja maksymalna – R_{\max}	0,05 Ω	77,95 Ω	40,55 Ω
	Prąd zwarciovyy szczytovy – i_p	7772,8 A	424,7 A	224,4 A
B	Liczba zwojów	162 zw.	84 zw.	84 zw.
	Temp. maksymalna – T_{\max}	82,6 K	356,7 K	238,8 K
	Rezystancja maksymalna – R_{\max}	0,05 Ω	72,05 Ω	47,33 Ω
	Prąd zwarciovyy szczytovy – i_p	7773 A	407,2 A	225,1 A
C	Liczba zwojów	162 zw.	108 zw.	108 zw.
	Temp. maksymalna – T_{\max}	82,6 K	238,4 K	239,6 K
	Rezystancja maksymalna – R_{\max}	0,05 Ω	60,63 Ω	60,97 Ω
	Prąd zwarciovyy szczytovy – i_p	7773,5 A	216,2 A	224,5 A

TABELA 28

Prąd zwarciovyy szczytovy i końcowa temperatura uzwojeń w chwili wyłączenia zwarcia (216 zwojów uzwojenia miedzianego)

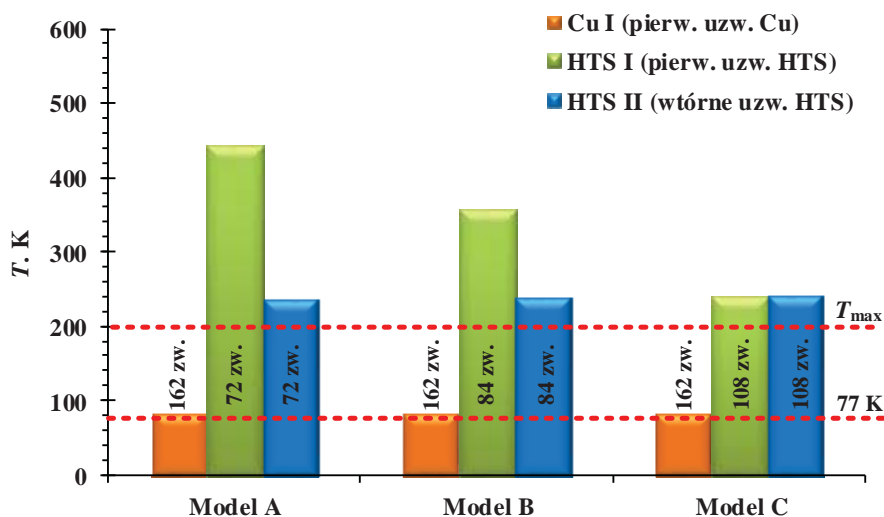
Model	Parametr	Cu I	HTS I	HTS II
D	Liczba zwojów	216 zw.	132 zw.	132 zw.
	Temp. maksymalna – T_{\max}	79,2 K	227,2 K	198,6 K
	Rezystancja maksymalna – R_{\max}	0,06 Ω	70,36 Ω	60,97 Ω
	Prąd zwarciovyy szczytovy – i_p	4751,3 A	209,3 A	196,6 A
E	Liczba zwojów	216 zw.	144 zw.	144 zw.
	Temp. maksymalna – T_{\max}	79,2 K	197,7 K	198,8 K
	Rezystancja maksymalna – R_{\max}	0,06 Ω	66,15 Ω	66,56 Ω
	Prąd zwarciovyy szczytovy – i_p	4751,6 A	191,8 A	196,4 A
F	Liczba zwojów	216 zw.	156 zw.	156 zw.
	Temp. maksymalna – T_{\max}	79,2 K	173,1 K	199 K
	Rezystancja maksymalna – R_{\max}	0,06 Ω	62,10 Ω	72,16 Ω
	Prąd zwarciovyy szczytovy – i_p	4748,6 A	191 A	196 A

TABELA 29

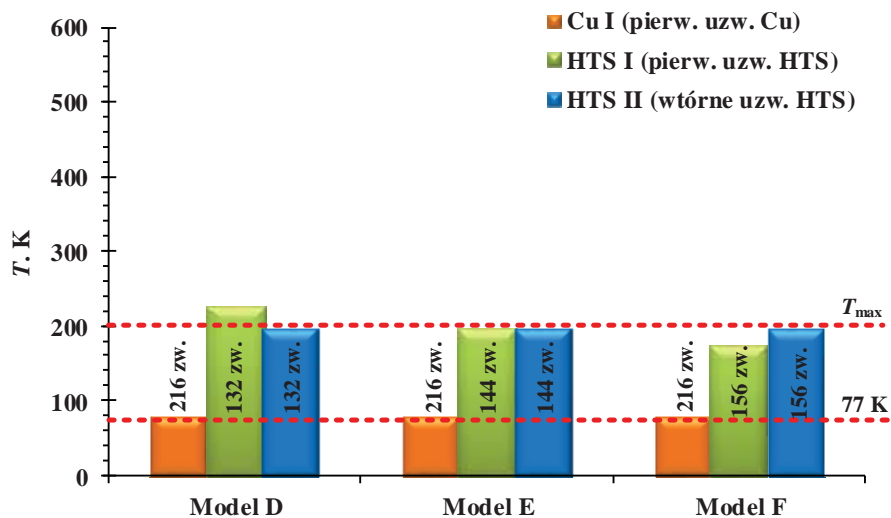
Prąd zwarciaowy szczytowy i końcowa temperatura uzwojeń w chwili wyłączenia zwarcia (270 zwojów uzwojenia miedzianego)

Model	Parametr	Cu I	HTS I	HTS II
G	Liczba zwojów	270 zw.	72 zw.	72 zw.
	Temp. maksymalna – T_{max}	78,1 K	576,5 K	167,3 K
	Rezystancja maksymalna – R_{max}	0,07 Ω	102,26 Ω	27,98 Ω
	Prąd zwarciaowy szczytowy – i_p	3170,7 A	504,5 A	197,1 A
H	Liczba zwojów	270 zw.	84 zw.	84 zw.
	Temp. maksymalna – T_{max}	78,1 K	482,4 K	169 K
	Rezystancja maksymalna – R_{max}	0,07 Ω	98,41 Ω	32,69 Ω
	Prąd zwarciaowy szczytowy – i_p	3171 A	453,1 A	197,2 A
I	Liczba zwojów	270 zw.	96 zw.	96 zw.
	Temp. maksymalna – T_{max}	78,1 K	409,7 K	172,3 K
	Rezystancja maksymalna – R_{max}	0,07 Ω	94,94 Ω	38,12 Ω
	Prąd zwarciaowy szczytowy – i_p	3118 A	262,7 A	197 A
J	Liczba zwojów	270 zw.	132 zw.	132 zw.
	Temp. maksymalna – T_{max}	78,1 K	236,5 K	170,4 K
	Rezystancja maksymalna – R_{max}	0,07 Ω	80,04 Ω	56,37 Ω
	Prąd zwarciaowy szczytowy – i_p	3173,4 A	213,5 A	196,9 A
K	Liczba zwojów	270 zw.	156 zw.	156 zw.
	Temp. maksymalna – T_{max}	78,1 K	210,6 K	170,6 K
	Rezystancja maksymalna – R_{max}	0,07 Ω	76,63 Ω	61,12 Ω
	Prąd zwarciaowy szczytowy – i_p	3173,7 A	198,3 A	196,8 A
L	Liczba zwojów	270 zw.	168 zw.	168 zw.
	Temp. maksymalna – T_{max}	78,1 K	188,1 K	170,3 K
	Rezystancja maksymalna – R_{max}	0,07 Ω	73,4 Ω	65,91 Ω
	Prąd zwarciaowy szczytowy – i_p	3174,2 A	192,4 A	196,6 A
M	Liczba zwojów	270 zw.	180 zw.	180 zw.
	Temp. maksymalna – T_{max}	78,1 K	169,5 K	170,5 K
	Rezystancja maksymalna – R_{max}	0,07 Ω	70,24 Ω	70,67 Ω
	Prąd zwarciaowy szczytowy – i_p	3170,5 A	191,8 A	196,3 A

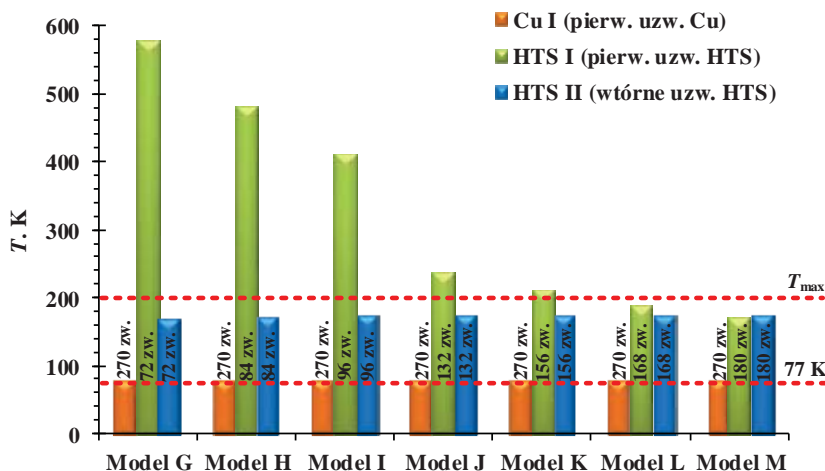
Podczas zwarcia trwającego od 40 ms do 200 ms prąd zwarciaowy jest ograniczany przez ogranicznik. Szczytowa wartość prądu zwarciaowego $i_p = 40$ kA została ograniczona do 7,77 kA w modelach A – C (tab. 27, rys. 7.29), do 4,75 kA w modelach D – F (tab. 28, rys. 7.30) oraz do 3,2 kA w modelach G – M (tab. 29, rys. 7.31). Przepływ prądu zwarciaowego powoduje bardzo szybkie nagrzewanie się uzwojeń nadprzewodnikowych. Temperatura uzwojeń wzrasta od temperatury początkowej 77,4 K do temperatury maksymalnej T_{max} , która jest osiągnięta w chwili wyłączenia zwarcia (rys. 7.15 – 7.27 i rys. 7.34 – 7.36). Przeprowadzone symulacje pokazują, że dla wszystkich modeli ograniczników temperatura uzwojeń nadprzewodnikowych wzrasta znacznie szybciej niż temperatura uzwojeń miedzianych i osiąga różne wartości w momencie wyłączenia zwarcia.



Rys. 7.34. Porównanie maksymalnych wartości temperatury uzwojeń ogranicznika w chwili wyłączenia zwarcia (modele A-C, uzwojenie miedziane 162 zwojów)



Rys. 7.35. Porównanie maksymalnych wartości temperatury uzwojeń ogranicznika w chwili wyłączenia zwarcia (modele E-F, uzwojenie miedziane 216 zwojów)



Rys. 7.36. Porównanie maksymalnych wartości temperatury uzwojeń ogranicznika w chwili wyłączenia zwarcia (modele G-M, uzwojenie miedziane 270 zwojów)

W modelu A pierwotne uzwojenie nadprzewodnikowe nagrzewa się znacznie szybciej, a jego temperatura osiąga wartość prawie dwukrotnie wyższą niż uzwojenie wtórne HTS (tab. 27, rys. 2.28). Temperatura pierwotnego uzwojenia HTS może zostać obniżona przez zwiększenie rezystancji uzwojeń nadprzewodnikowych. Zwiększenie liczby zwojów w uzwojeniach nadprzewodnikowych w modelu B spowodowało zmniejszenie temperatury pierwotnego uzwojenia nadprzewodnikowego o 85 K. Dalsze zwiększanie liczby zwojów w modelu C powoduje, że uzwojenia nadprzewodnikowe nagrzewają się z taką samą intensywnością i osiągają podobną temperaturę maksymalną poniżej 240 K.

Zwiększenie liczby zwojów w uzwojeniach nadprzewodnikowych, a tym samym zwiększenie ich impedancji ma niewielki wpływ na szczytową wartość prądu ograniczonego, która jest głównie określana przez impedancję uzwojenia miedzianego, która w czasie ograniczania prądu zwarciovego, jest znacznie niższa od impedancji uzwojeń nadprzewodnikowych. Aby zwiększyć skuteczność ograniczania prądu zwarciovego, należy zwiększyć liczbę zwojów uzwojenia miedzianego. Zwiększenie liczby zwojów uzwojenia miedzianego ze 162 zwojów (modele A – C) do 270 zwojów (model F) powoduje obniżenie szczytowej ograniczonej wartości prądu zwarciovego z 7,77 kA do 3,2 kA.

We wszystkich modelach należy dobrać prawidłową liczbę zwojów uzwojeń nadprzewodnikowych w zależności od liczby zwojów uzwojenia miedzianego, aby nie przekroczyć temperatury maksymalnej uzwojeń w momencie wyłączenia zwarcia. Aby zwiększyć skuteczność ograniczania prądu zwarciovego, konieczne jest, poza zwiększeniem liczby zwojów uzwojenia miedzianego, zwiększenie liczby zwojów uzwojenia nadprzewodnikowego, co oznacza również wzrost kosztów produkcji takiego ogranicznika.

Przy projektowaniu ogranicznika przyjęto, że maksymalna temperatura uzwojeń nadprzewodnikowych ogranicznika w chwili wyłączenia zwarcia nie przekroczy 200 K, a szczytowa wartość prądu zwarciovego będzie mniejsza od 5 kA. Z wyliczonych modeli tylko model E spełnia powyższe wymagania.

Szczytowe wartości prądu zwarciovego i wartości maksymalnej temperatury osiągnięte po 160 ms od chwili wystąpienia zwarcia zostały zamieszczone dla wszystkich modeli ograniczników w tabelach 27 – 29 i na rysunku 7 - 32.

Zmiana impedancji uzwojeń ogranicznika powoduje zmianę rozkładu prądu w uzwojeniach podczas ograniczania prądu zwarciovego i zmienia proces nagrzewania uzwojeń nadprzewodnikowych podczas zwarcia, co ma istotny wpływ na temperaturę poszczególnych uzwojeń HTS w momencie wyłączenia zwarcia.

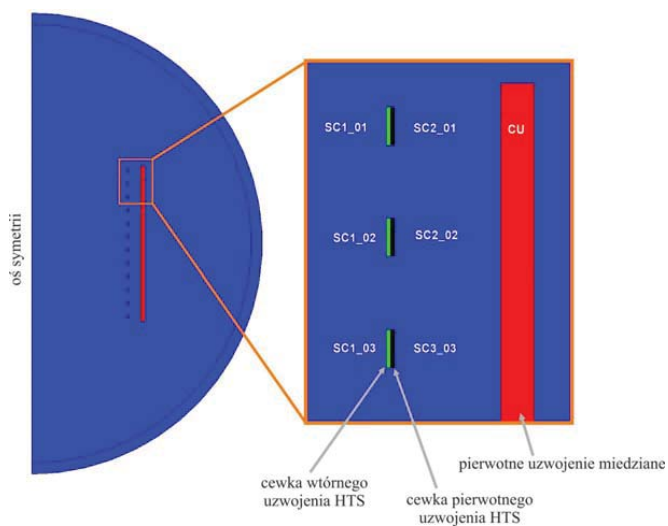
7.2.2. Model numeryczny ogranicznika do analizy zmian temperatury w stanie ograniczania prądu i w stanie reaktywacji

Model numeryczny nadprzewodnikowego ogranicznika prądu z uwzględnieniem modułowej budowy został opracowany z wykorzystaniem programu narzędziowego Flux2D. Zależności rezystancji uzwojeń nadprzewodnikowych od prądu, pola magnetycznego i temperatury zdefiniowane zostały w wieloparametrowej procedurze „*PhysicalParameter*”. Obliczenia elektromagnetyczne prowadzone są w polowym module *Transient magnetic* programu Flux2D sprzężonym z obwodem zewnętrznym. Dodatkowo, w każdym kroku obliczeniowym obliczana jest temperatura uzwojeń i zmieniana rezystancja tych uzwojeń w obwodzie zewnętrznym w zależności od prądu, pola magnetycznego i temperatury w przypadku uzwojeń nadprzewodnikowych albo w zależności od temperatury w przypadku uzwojeń miedzianych.

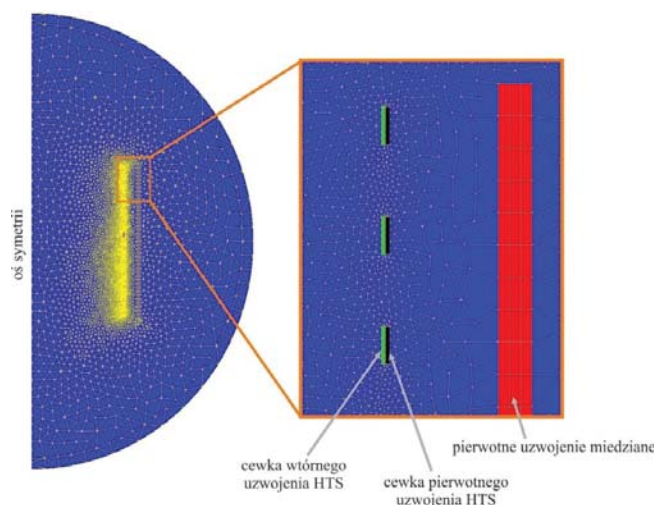
7.2.2.1. Geometria modelu numerycznego

Nadprzewodnikowy ogranicznik prądu zbudowany jest z dwunastu osiowosymetrycznych cewek nadprzewodnikowych pierwotnych o przekroju prostokątnym, 12 osiowosymetrycznych cewek nadprzewodnikowych wtórnych o przekroju prostokątnym oraz jednej osiowosymetrycznej cewki miedzianej o przekroju prostokątnym. Uzwojenia nadprzewodnikowe nawinięte zostały taśmą SF12050 firmy SuperPower.

Nadprzewodnikowy ogranicznik prądu o takiej konstrukcji uzwojeń można zamodelować numerycznie w osiowosymetrycznej geometrii 2D. Widok geometrii ogranicznika z siatką elementów skończonych przedstawiony został na rysunku 7.37 i rysunku 7.38. Wymiary i liczby zwojów cewek ogranicznika przedstawione zostały w tabeli 30 i tabeli 31.



Rys. 7.37. Geometria modelu numerycznego z nazwanymi obszarami uzwojeń nadprzewodnikowych (SC) i miedzianych (CU)



Rys. 7.38. Siatka elementów skończonych modelu numerycznego ogranicznika

TABELA 30

Parametry cewek nadprzewodnikowych

Parametr	cewki pierwotne	cewki wtórne
Promień wewnętrzny	0,253 m	0,254 m
Grubość	0,00126 m	0,00126 m
Wysokość	0,012 m	0,012 m
Odległość osiowa pomiędzy końcami cewek	0,023 m	0,023 m
Liczba zwojów	12	12
Materiał uzwojeń nadprzewodnikowych	taśma SF12050	taśma SF12050

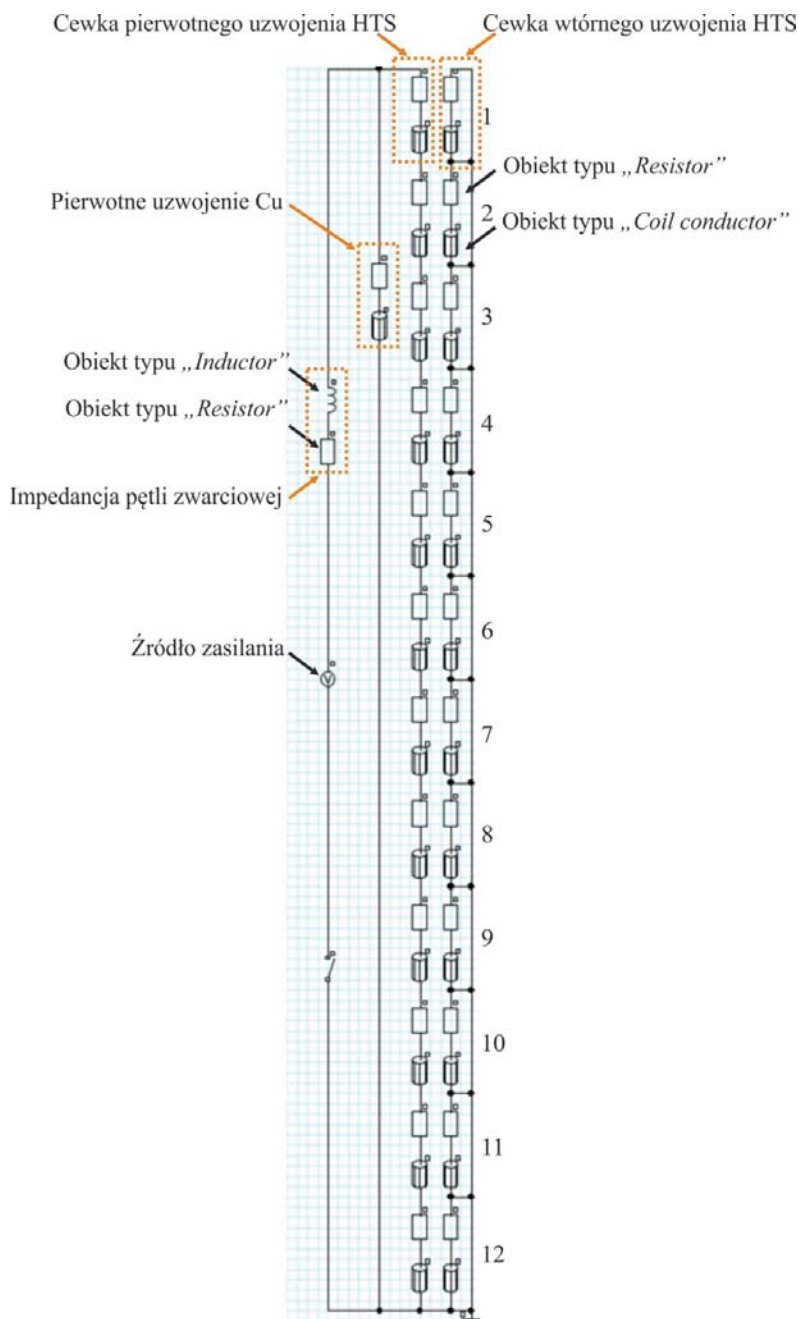
TABELA 31

Parametry cewki miedzianej uzwojenia pierwotnego.

Parametr	Wartość
Promień wewnętrzny	0,289 m
Promień zewnętrzny	0,2995 m
Wysokość	0,412 m
Liczba zwojów	185
Materiał uzwojenia	druk nawojowy emaliowany o przekroju 1,8 mm x 7,5 mm

Cewki nadprzewodnikowe pierwotne są połączone szeregowo. Pierwotne uzwojenie nadprzewodnikowe składające się z 12 cewek połączonych równolegle z pierwotnym uzwojeniem miedzianym. Cewki nadprzewodnikowe uzwojenia wtórnego są zwarte. Widok połączeń elektrycznych modelu numerycznego nadprzewodnikowego ogranicznika prądu przedstawiony został na rysunku 7.39. Każda cewka reprezentowana jest w części polowej modelu numerycznego przez region polowy typu „Coil conductor region”, a w części obwodowej, poprzez sprzężony z tym regionem obiekt typu „Stranded coil conductor” i jeden rezystor.

W modelu numerycznym podobnie jak w poprzednich modelach wyznaczano temperaturę cewek miedzianych i nadprzewodnikowych ogranicznika z uwzględnieniem nieliniowej charakterystyki wymiany ciepła pomiędzy powierzchnią chłodzoną ogranicznika a ciekłym azotem (algorytm analogiczny jak opisany w rozdziale 6.2).

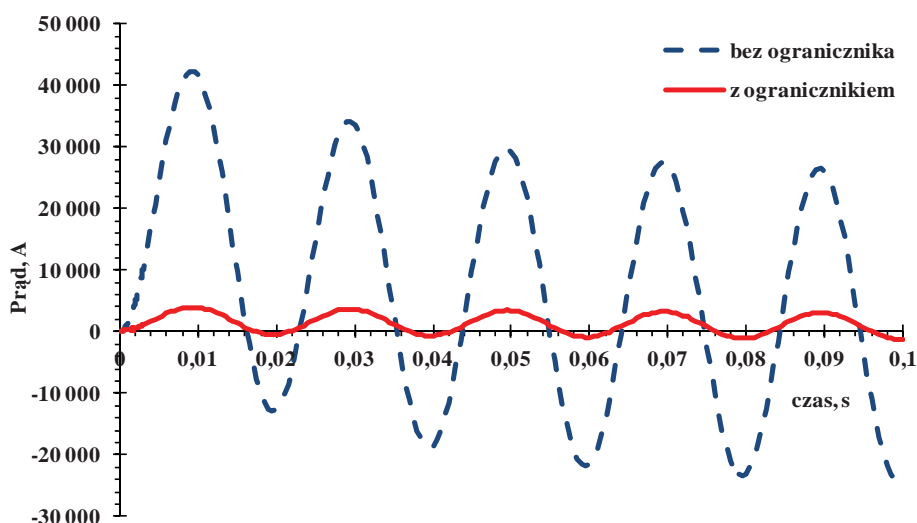


Rys. 7.39. Schemat obwodu elektrycznego modelu numerycznego

7.2.2.2. Wyniki analizy numerycznej

W modelu numerycznym ogranicznika odwzorowany został układ zwarciový z Laboratorium Badawczego Aparatury Rozdzielczej Instytutu Elektrotechniki w Warszawie, w którym wykonywane są badania eksperymentalne ograniczników zbudowanych w Pracowni Technologii Nadprzewodnikowych. Prąd zwarciový jest ograniczany przez 100 milisekund, a następnie układ zwarciový zostaje rozłączony przez zewnętrzny wyłącznik.

W obwodzie elektrycznym modelu numerycznego prąd zwarciový płynie w czasie od 0 s do 0,1 s, a następnie ogranicznik podlega procesowi schładzania bez przepływu prądu. Szczytowa wartość prądu zwarciovego została ograniczona w obwodzie zwarciovym ponad 10-krotnie, z 42,3 kA (bez ogranicznika) do 4 kA (rys. 7.40).

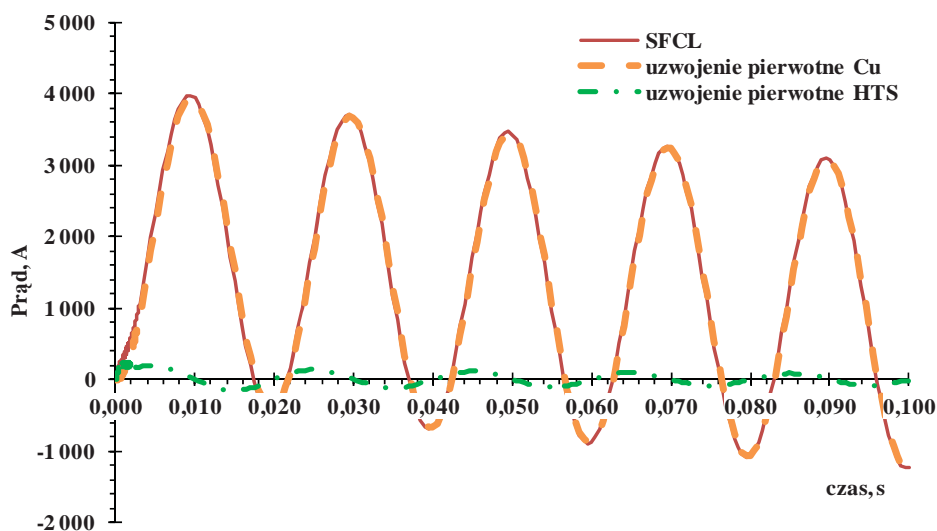


Rys. 7.40. Prąd w obwodzie zwarciovym z włączonym szeregowo ogranicznikiem oraz w obwodzie bez ogranicznika

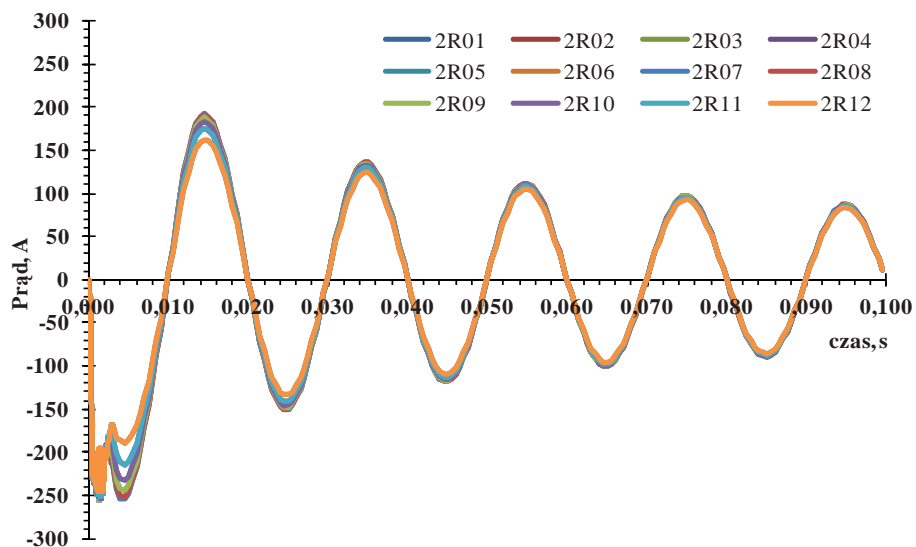
Na rysunku 7.41 pokazany został rozptyw prądów w ograniczniku podczas zwarcia. Prąd płynie głównie przez pierwotne uzwojenie miedziane, a mała jego część przez pierwotne uzwojenia nadprzewodnikowe.

W zwartych cewkach nadprzewodnikowych uzwojenia wtórne ogranicznika indukowany jest prąd od prądów płynących w cewkach uzwojenia pier-

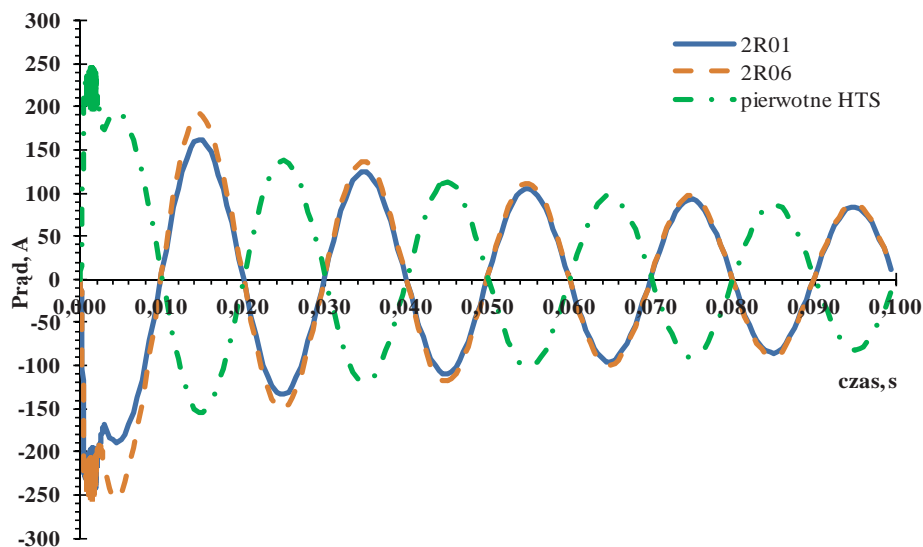
wotnego. Przebiegi prądów w cewkach uzwojenia wtórnego przedstawione zostały na rysunku 7.42. Przebiegi te różnią się między sobą w zależności od położenia cewki w uzwojeniu, ale są parami zbliżone. Zbliżone przebiegi prądów obserwowane są we wtórnych cewkach nadprzewodnikowych o numerach: 2R01 i 2R12, 2R02 i 2R11, 2R03 i 2R10, 2R04 i 2R09, 2R05 i 2R08, 2R06 i 2R07. Na rysunku 7.43 przedstawione zostały przebiegi prądu w pierwszej 2R01 i szóstej 2R06 wtórnej cewce HTS oraz w cewkach pierwotnych. Widoczne są znaczące różnice w przebiegach prądu w cewkach wtórnego uzwojenia nadprzewodnikowego. Pole magnetyczne oddziałujące na środkowe cewki wtórne (2R06 i 2R07) jest znacząco większe od pola magnetycznego działającego na cewki skrajne (2R01 i 2R12) jak to pokazane zostało na rysunkach 7.44 – 7.46. Przebiegi modułu indukcji magnetycznej we wszystkich sensorach umieszczonych w uzwojeniach nadprzewodnikowych przedstawiono na rysunku 7.44, z kolei na rysunku 7.45 porównanie modułów w cewce skrajnej i środkowej. Na rysunku 7.46 przedstawiona została maksymalna wartość indukcji magnetycznej w sensorach umieszczonych w uzwojeniach nadprzewodnikowych.



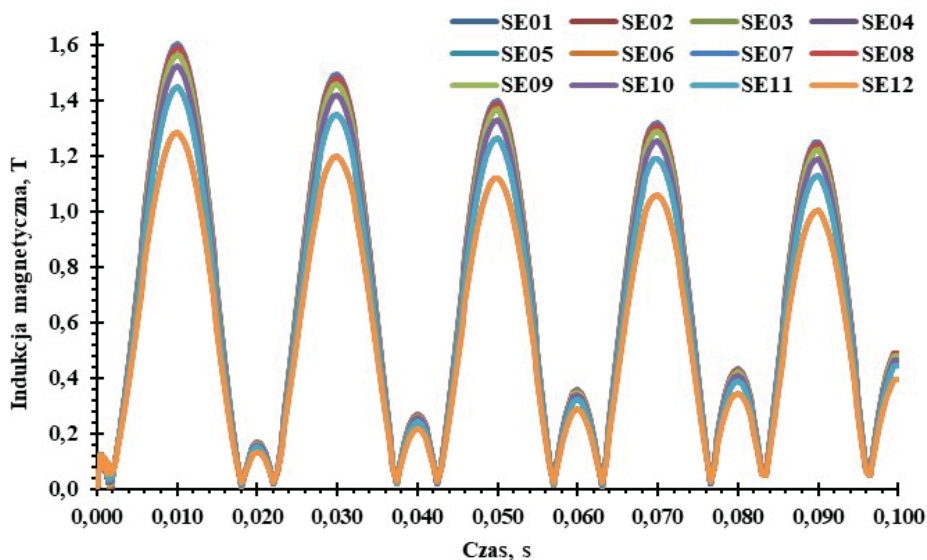
Rys. 7.41. Prąd płynący przez ogranicznik nadprzewodnikowy (SFCL), pierwotne uzwojenie miedziane (CU) i nadprzewodnikowe (HTS)



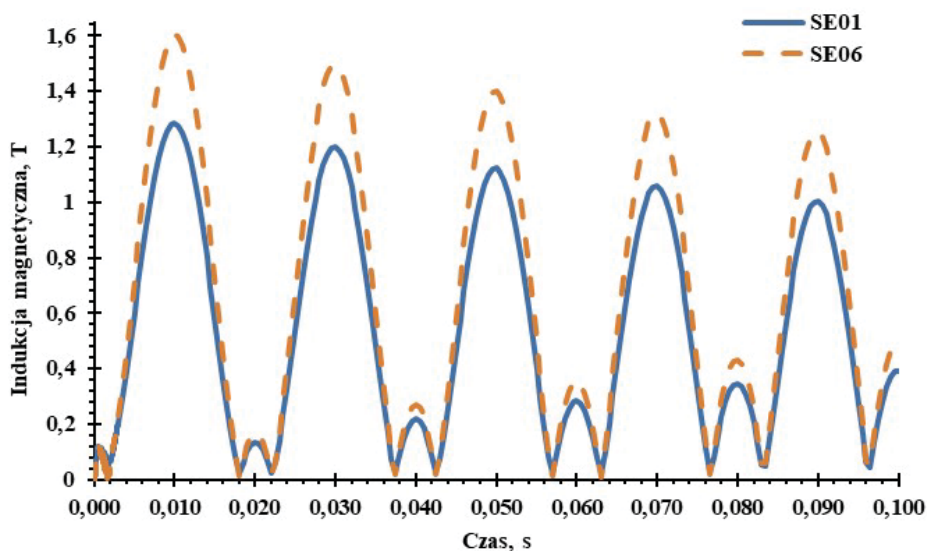
Rys. 7.42. Prąd w nadprzewodnikowych uzwojeniach wtórnych



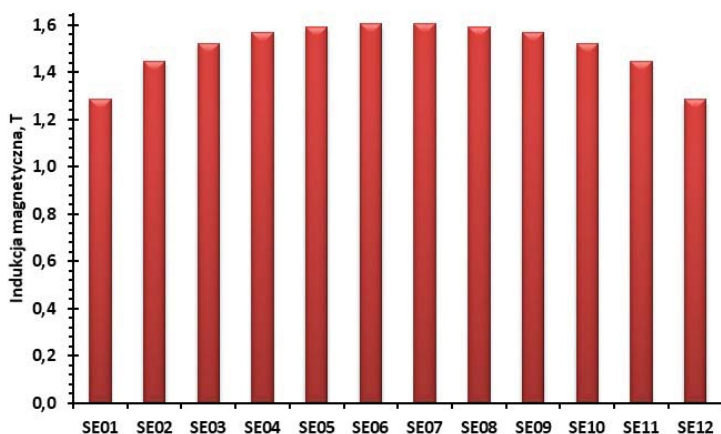
Rys. 7.43. Prąd w pierwszym 2R01 i szóstym 2R06 nadprzewodnikowym uzwojeniu wtórnym oraz w pierwotnych cewkach nadprzewodnikowych



Rys. 7.44. Moduł indukcji magnetycznej w sensorach umieszczonych w uzwojeniach nadprzewodnikowych

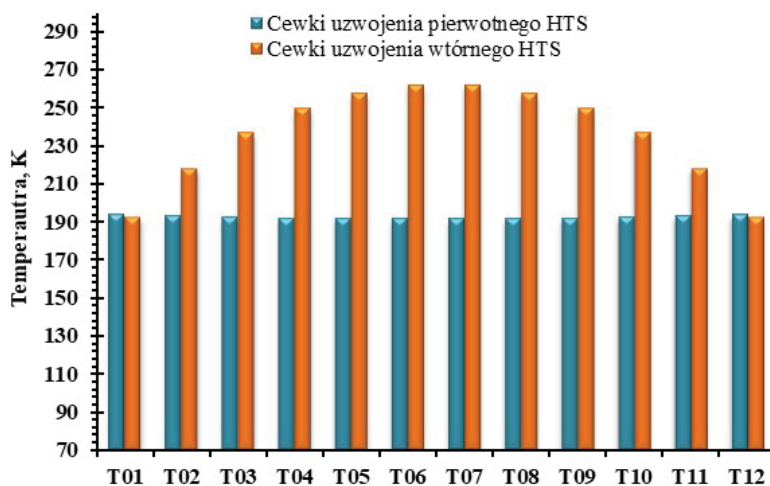


Rys. 7.45. Moduł indukcji magnetycznej w sensorach umieszczonych w pierwszym SE01 i szóstym SE06 uzwojeniu nadprzewodnikowym



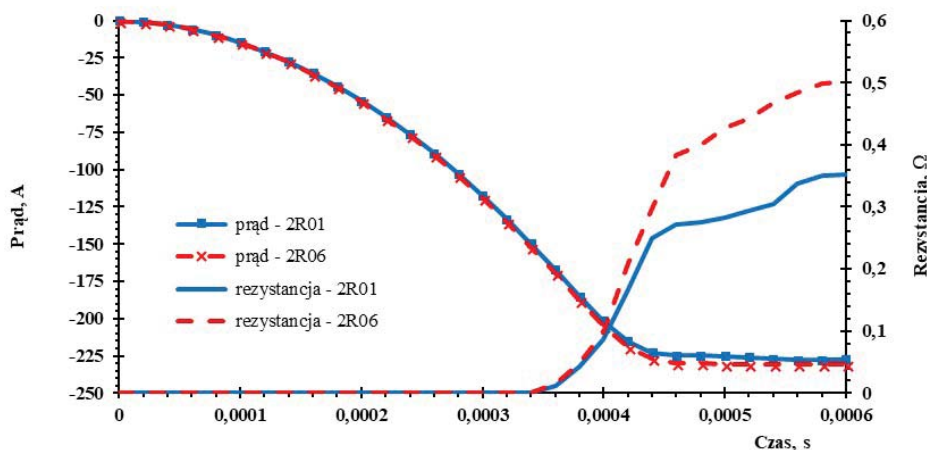
Rys. 7.46. Maksymalna wartość indukcji magnetycznej w sensorach umieszczonych w uzwojeniach nadprzewodnikowych

Większa wartość indukcji w cewkach środkowych niż w skrajnych wpływa zarówno na wartości prądów indukowanych w cewkach, jak i na charakterystykę $R(I, T, B)$ taśmy nadprzewodnikowej. W cewkach poddanych działaniu silniejszego pola magnetycznego taśmy HTS przechodzą do stanu rezystywnego przy mniejszej wartości prądu. Oba te czynniki powodują, że uzwojenia środkowe nagrzewają się szybciej i osiągają wyższą temperaturę końcową, jak to zostało pokazane na rysunku 7.47.



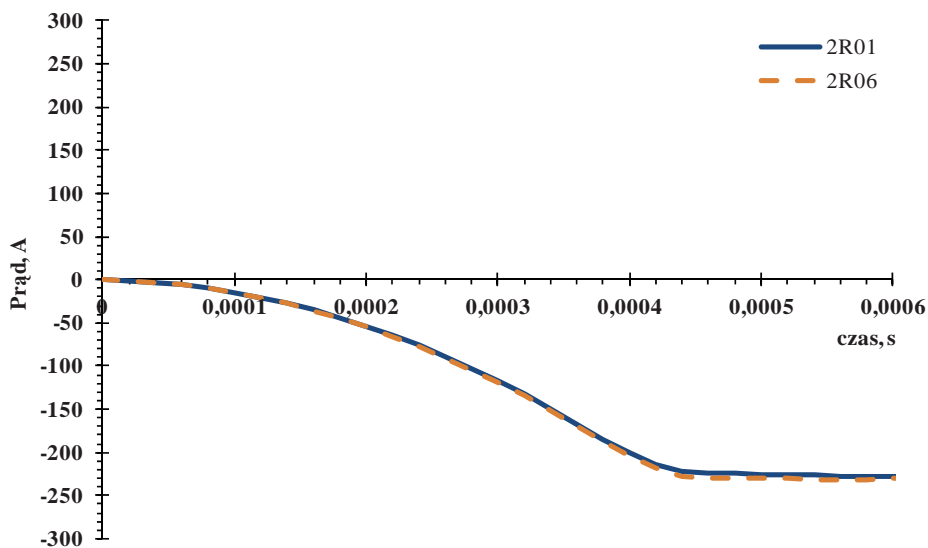
Rys. 7.47. Maksymalna temperatura cewek HTS uzwojenia pierwotnego

Na rysunku 7.48 przedstawione zostały przebiegi zmian rezystancji pierwszego 2R01 i szóstego 2R06 nadprzewodnikowego uzwojenia wtórnego i przebiegi prądu w tych uzwojeniach w początkowych chwilach działania ogranicznika prądu. Do ok. 0,00035 s uzwojenia znajdują się w stanie nadprzewodzącym, a później po przekroczeniu przez prąd wartości krytycznej dla nadprzewodnika, zaczyna wzrastać rezystancja uzwojeń. Wartość prądu w uzwojeniu środkowym narasta nieznacznie szybciej niż w uzwojeniu skrajnym, ale daje to w efekcie znacząco szybszy wzrost rezystancji uzwojenia środkowego w porównaniu do skrajnego.

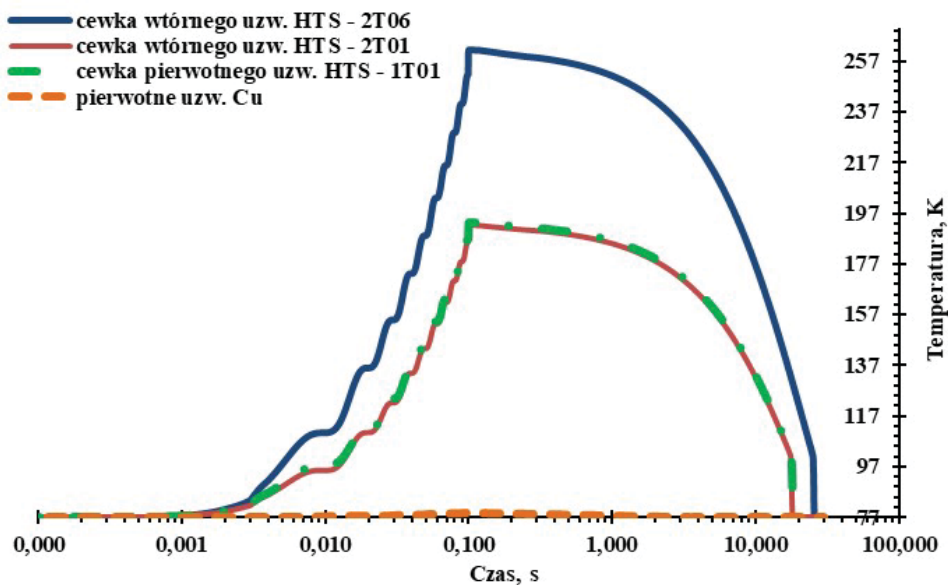


Rys. 7.48. Rezystancja pierwszego i szóstego nadprzewodnikowego uzwojenia wtórnego i prąd w tych uzwojeniach w początkowych chwilach działania ogranicznika prądu

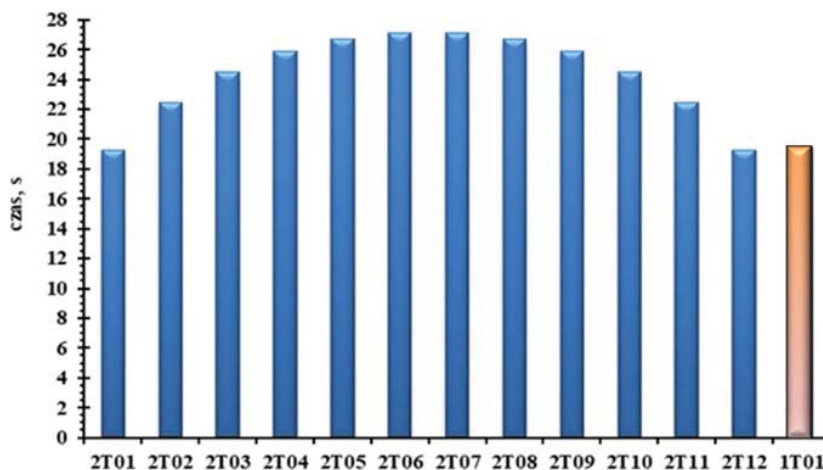
Na rysunku 7.49 pokazane zostały, dla porównania, zmiany rezystancji pierwszego 2R01 i szóstego nadprzewodnikowego 2R06 uzwojenia pierwotnego w początkowych chwilach działania ogranicznika prądu. Ponieważ prąd w uzwojeniach pierwotnych połączonych szeregowo ma takie same przebiegi we wszystkich uzwojeniach, na nieznaczne zmiany rezystancji ma wpływ głównie obniżenie krytycznej wartości prądu w uzwojeniach. W efekcie uzwojenia pierwotne nagrzewają się do różnych temperatur końcowych, a uzwojenia pierwotne mają zbliżoną temperaturę końcową, jak to pokazane zostało na rysunku 7.47.



Rys. 7.49. Rezystancja pierwszego 2R01 i szóstego 2R06 nadprzewodnikowego uzwojenia pierwotnego w początkowych chwilach ograniczania prądu zwarciego



Rys. 7.50. Temperatura wybranych uzwojeń nadprzewodnikowych i uzwojenia miedzianego podczas ograniczania zwarcia i podczas chłodzenia po zwarcu



Rys. 7.51 Czasy chłodzenia uzwojeń nadprzewodnikowych po ograniczeniu zwarcia

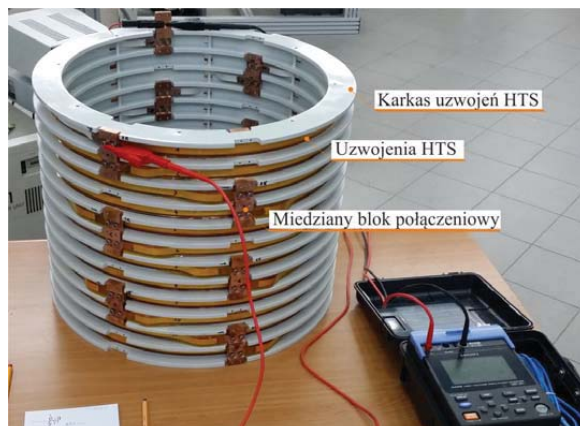
Na rysunku 7.50 przedstawione zostały zmiany temperatury wybranych uzwojeń nadprzewodnikowych i uzwojenia miedzianego podczas ograniczania prądu zwarcowego i podczas chłodzenia ogranicznika po wyłączeniu zwarcia. Skrajne uzwojenia nadprzewodnikowe pierwotne 1T01 i wtórne 2T01 nagrzewają się podobnie. Środkowe nadprzewodnikowe uzwojenie wtórne 2T06 nagrzewa się najszybciej i osiąga najwyższą temperaturę. Uzwojenie miedziane, pomimo przewodzenia znacznego prądu rzędu 4 kA, nagrzewa się tylko do temperatury 78 K.

Na rysunku 7.51 przedstawiony zostały obliczony czas chłodzenia poszczególnych cewek nadprzewodnikowych po wyłączeniu zwarcia, od temperatury maksymalnej do temperatury ciekłego azotu równej 77,4 K. Czas schładzania cewek skrajnych jest najszybszy, a cewek środkowych – najwolniejszy.

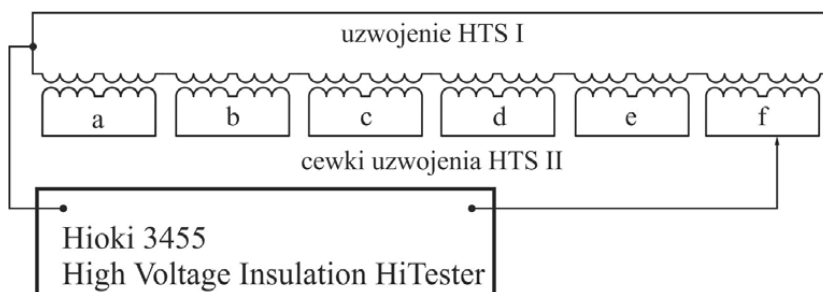
7.3. Pomiary parametrów elektrycznych uzwojeń ogranicznika w temperaturze pokojowej

7.3.1. Pomiary rezystancji izolacji uzwojeń nadprzewodnikowych

Pomiary rezystancji izolacji przeprowadzono w układzie jak na rysunku 7.52 i rysunku 7.53 pomiędzy pierwotnym uzwojeniem HTS I, a zwartymi cewkami wtórnego uzwojenia nadprzewodnikowego HTS II, cewki $a - f$. Pomiary wykonano przy użyciu miernika rezystancji izolacji HIOKI 3455 High Voltage Insulation Hitester.



Rys. 7.52. Testy izolacji uzwojeń nadprzewodnikowych ogranicznika



Rys. 7.53. Schemat układu pomiarowego do wyznaczania rezystancji izolacji uzwojeń HTS ogranicznika

Wyniki pomiaru zmierzone przy napięciu probierczym 2,5 kV w czasie $t_1 = 15$ s i $t_2 = 30$ s zamieszczono w tabeli 32. Zmierzona wartość rezystancji izolacji powyżej 5 G Ω oraz wartości współczynników DAR i PI powyżej 1 świadczą o dobrej wytrzymałości izolacji uzwojeń.

TABELA 32

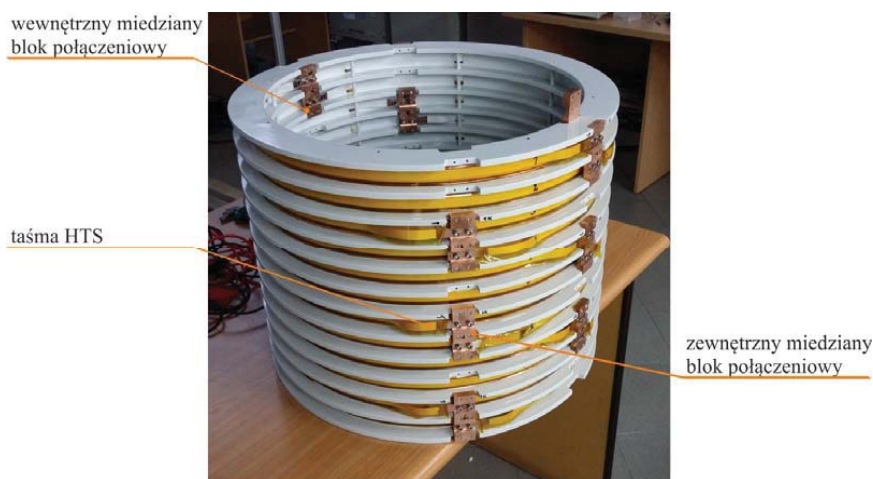
Pomiary rezystancji izolacji uzwojeń ogranicznika prądu

Układ	R	I	DAR 1m / 15s	DAR 1m / 30 s	PI
	G Ω	mA	$R_{po 1 m} / R_{po 15 s}$	$R_{po 1 m} / R_{po 30 s}$	$R_{po 3 m} / R_{po 1 m}$
uzw. HTS I – uzw. HTS II a	5,59	469	1,20	1,07	1,02
uzw. HTS I – uzw. HTS II b	5,16	508	1,23	1,06	1,04
uzw. HTS I – uzw. HTS II c	5,32	493	1,23	1,07	1,04
uzw. HTS I – uzw. HTS II d	5,34	491	1,24	1,12	1,01
uzw. HTS I – uzw. HTS II e	5,49	478	1,25	1,09	1,04
uzw. HTS I – uzw. HTS II f	5,41	485	1,26	1,10	1,04

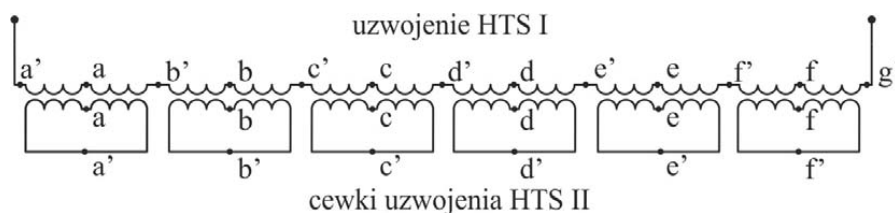
DAR – Dielectric absorption rate; PI – Polarization index

7.3.2. Pomiar rezystancji kontaktów w łączeniowych blokach miedzianych

Poszczególne cewki uzwojeń nadprzewodnikowych łączone są ze sobą za pomocą wewnętrznych i zewnętrznych miedzianych bloków połączeniowych (rys. 7.54). Oznaczenia poszczególnych miedzianych bloków połączeniowych przedstawia rysunek 7.55. Wykonanie pierwotnego uzwojenia HTS I wymagało 13 miedzianych bloków połączeniowych ($a + f + a' + g'$), natomiast wtórne uzwojenie HTS II 12 bloków połączeniowych ($a + f + a' + f'$), co łącznie daje 25 bloków. Apostrof oznacza wewnętrzny blok połączeniowy, brak apostrofu – blok połączeniowy znajdował się na zewnętrznej stronie karkasu.



Rys. 7.54. Wewnętrzne i zewnętrzne miedziane bloki połączeniowe



Rys. 7.55. Oznaczenia miedzianych bloków połączeniowych

Pomiary wykonano w temperaturze pokojowej za pomocą mikroomomierza HIOKI 3541. Wartości rezystancji kontaktów zamieszczono w tabeli 33. Znajomość rezystancji połączeń pomiędzy poszczególnymi cewkami nadprzewodnikowymi jest niezbędna do określenia strat mocy na połączeniach śrubowych końcówek taśm nadprzewodnikowych.

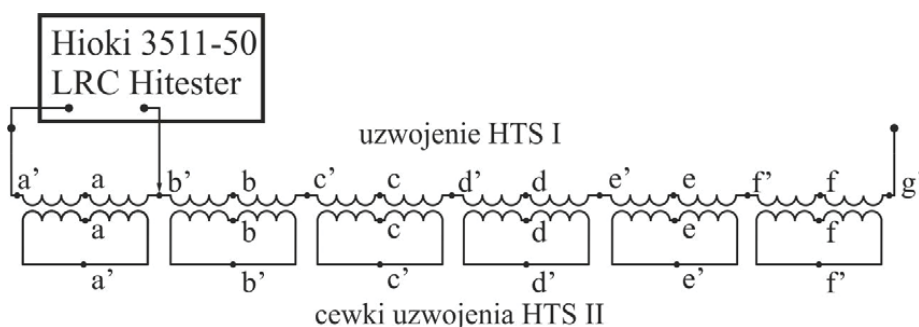
TABELA 33

Pomiary rezystancji kontaktów połączeń śrubowych w blokach miedzianych

Pierwotne uzwojenie nadprzewodnikowe (uzwojenie HTS I)			
bloki zewn.	R , m Ω	bloki wewn.	R , m Ω
a	0,7519	a'	0,5242
b	0,9000	b'	0,9999
c	0,8322	c'	0,8093
d	0,9739	d'	0,8145
e	0,8342	e'	0,7495
f	0,7829	f'	0,8248
		g'	0,4740
Wtórne uzwojenie nadprzewodnikowe (uzwojenie HTS II)			
bloki zewn.	R , m Ω	bloki wewn.	R , m Ω
a	0,7815	a'	1,0400
b	0,7919	b'	0,8507
c	0,7883	c'	0,9698
d	0,7830	d'	0,7051
e	0,7968	e'	0,9660
f	0,7429	f'	0,8185

7.3.3. Pomiar indukcyjności cewek pierwotnego uzwojenia HTS

Pomiary indukcyjności pierwotnego uzwojenia HTS wykonano w układzie przedstawionym na rysunku 7.56. Pomiary wykonano pomiędzy początkiem pierwotnego uzwojenia nadprzewodnikowego (blok a'), a kolejnymi cewkami uzwojenia połączonymi szeregowo (bloki a ÷ g'). Pomiary wykonano za pomocą miernika HIOKI 3511-50 LRC Hitester. Wyniki pomiarów zamieszczono w tabeli 34.



Rys. 7.56. Pomiar indukcyjności cewek pierwotnego uzwojenia nadprzewodnikowego

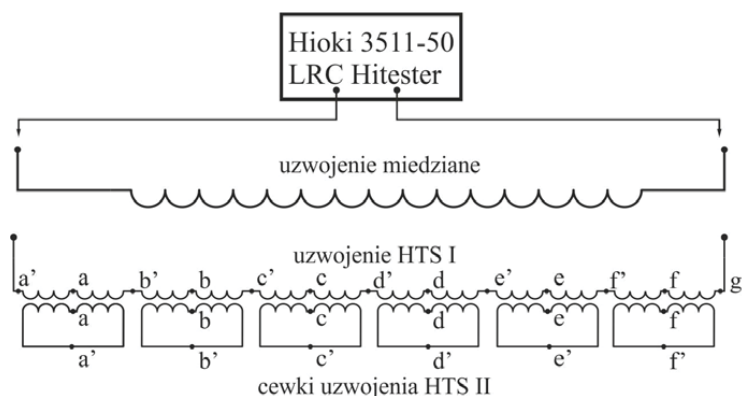
TABELA 34

Wyniki pomiarów indukcyjności cewek pierwotnego uzwojenia nadprzewodnikowego

Punkty pomiarowe	L , mH	Punkty pomiarowe	L , mH
a' – a	0,197	a' – d	3,975
a' – b'	0,571	a' – e'	4,804
a' – b	1,096	a' – e	5,680
a' – c'	1,706	a' – f'	6,560
a' – c	2,410	a' – f	7,500
a' – d'	3,146	a' – g'	8,440

7.3.4. Pomiar impedancji, rezystancji, indukcyjności uzwojeń nadprzewodnikowych i uzwojenia miedzianego

Pomiary parametrów rezystancji, indukcyjności i impedancji uzwojeń ogranicznika wykonane zostały za pomocą miernika HIOKI 3511-50 LRC Hitester, w temperaturze 20°C, w układzie jak na rysunku 7.57 przy zwartych wtórnych uzwojeniach nadprzewodnikowych ogranicznika. Zmierzone wartości impedancji, rezystancji i indukcyjności, uzwojeń nadprzewodnikowych i uzwojenia miedzianego zamieszczono w tabelach 35 – 37.



Rys. 7.57. Pomiar R , L i Z uzwojeń ogranicznika w temperaturze pokojowej

TABELA 35

Pomiar parametrów elektrycznych pierwotnego uzwojenia nadprzewodnikowego przy zwartych cewkach uzwojenia wtórnego (temp. 20°C).

Częstotliwość pomiarowa	120 Hz
Z	116,97 Ω
L	8,3 mH
R	116,81 Ω

TABELA 36

Pomiar parametrów elektrycznych pierwotnego uzwojenia miedzianego (temp. 20°C)

Częstotliwość pomiarowa	120 Hz
Z	12,672 Ω
L	16,75 mH
R	0,951 Ω

TABELA 37

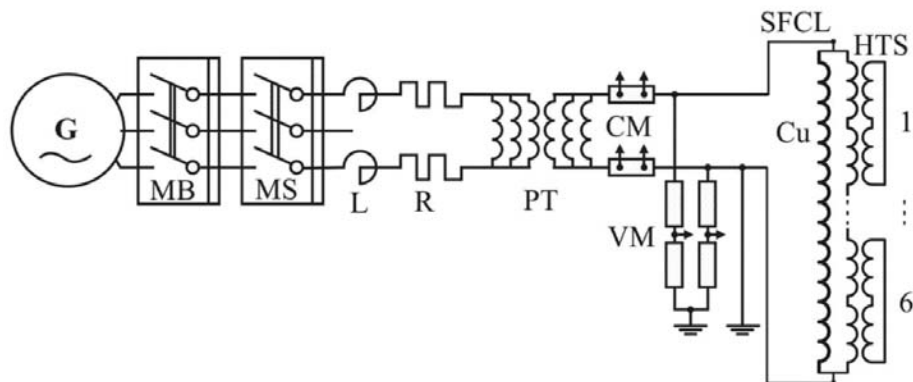
Pomiar parametrów R , L i Z dla zmontowanego ogranicznika prądu (temp. 20°C)

Częstotliwość pomiarowa	120 Hz
Z	12,632 Ω
L	16,68 mH
R	1,189 Ω

7.4. Testy zwarciove ogranicznika 15 kV / 140 A

Badania zwarciove przeprowadzono w Laboratorium Badawczym Aparatury Rozdzielczej Instytutu Elektrotechniki w Warszawie. Obwód testowy (rys. 7.58) składał się z generatora zwarciovego 2500 MVA – G, wyłącznika głównego – MB, załącznika zwarciovego – MS, trzech transformatorów zwarciowych o mocy 750 MVA – PT, dławików – L, rezystorów – R i urządzeń pomiarowych do pomiaru prądu – CM i napięcia – VM.

Przed przystąpieniem do testów zwarciowych ogranicznik został schłodzony do temperatury 77,4 K. Do pierwszego schłodzenia ogranicznika zużyto około 400 litrów ciekłego azotu (rys. 7.60). Po schłodzeniu ogranicznik został podłączony do układu zwarciovego (rys. 7.61). Zmierzona na zaciskach rezystancja ogranicznika w temperaturze 77,4 K wynosiła 2,6 m Ω , a indukcyjność 13 μ H. Zmierzona wartość rezystancji ogranicznika jest sumą rezystancji wszystkich połączeń rezystancyjnych, 25 miedzianych bloków połączeniowych, miedzianych doprowadzeni prądowych i dwóch miedzianych przepustów prądowych. Bardzo niska indukcyjność ogranicznika w stanie nadprzewodzącym została osiągnięta przez bardzo dobre sprzężenie magnetyczne pomiędzy uzwojeniami nadprzewodnikowymi.



Rys. 7.58. Schemat obwodu zwarciovego do testowania nadprzewodnikowego ogranicznika prądu zwarciovego: G – generator zwarciovych 2500 MVA, MB – wylacznik bezpieczenstwa, MS – zalacznik zwarciovych, L – dlawiki, R – rezystory, PT – transformatory zwarciovych 3 x 750 MVA, CM – pomiar pradu, VM – pomiar napiecia, SFCL – badany nadprzewodnikowy ogranicznik pradu



Rys. 7.59. (a) Generator o mocy zwarciovych 2500 MVA, (b) trzy jednofazowe transformatory zwarciovych kazdy o mocy 750 MVA

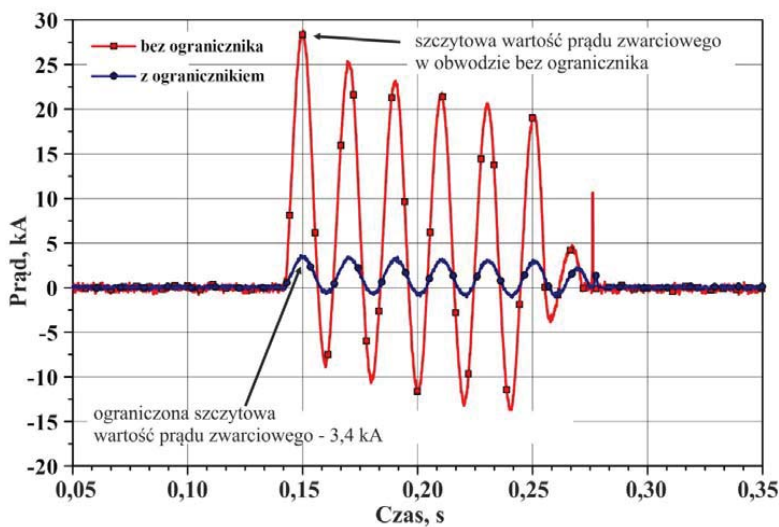


Rys. 7.60. Chlodzenie nadprzewodnikowego ogranicznika pradu przed wykonaniem testow zwarciovych



Rys. 7.61. Łączenie schłodzonego ogranicznika prądu z obwodem zwarciovym

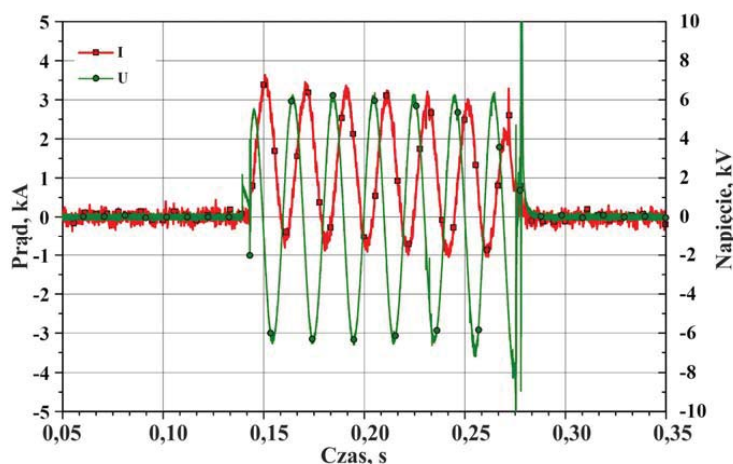
Przed przystąpieniem do prób układ zwarciovym poddano skalowaniu, przy zwartych zaciskach ogranicznika, w celu ustawienia znamionowych parametrów pomiaru. Podczas skalowania układu zwarciovego czas zwarcia został ustawiony na 120 ms. Zarejestrowano przebieg prądu w układzie zwarciovym bez ogranicznika (rys. 7.62).



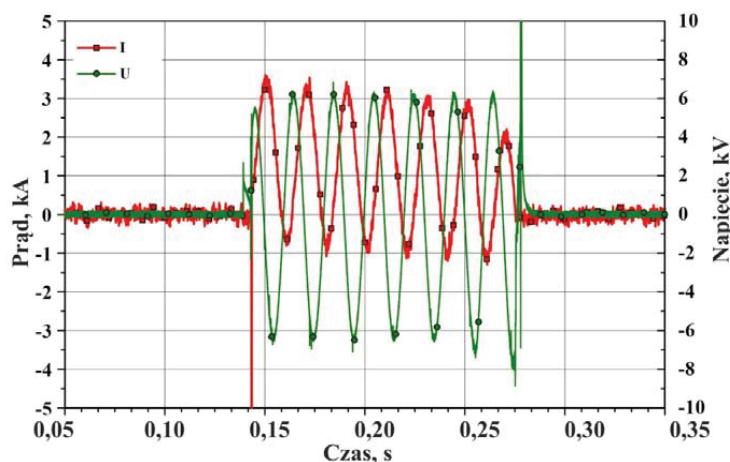
Rys. 7.62. Porównanie przebiegów prądu zwarciovego w obwodzie zwarciovym

Przeprowadzone pomiary eksperymentalne składały się z cyklu trzech prób zwarciovych. Porównanie przebiegów prądu w obwodzie zwarciovym bez ogranicznika oraz z ogranicznikiem przedstawiono na rysunku 7.62. Na rysunkach 7.63 – 7.65 przedstawiono przebiegi prądów w obwodzie zwarciovym

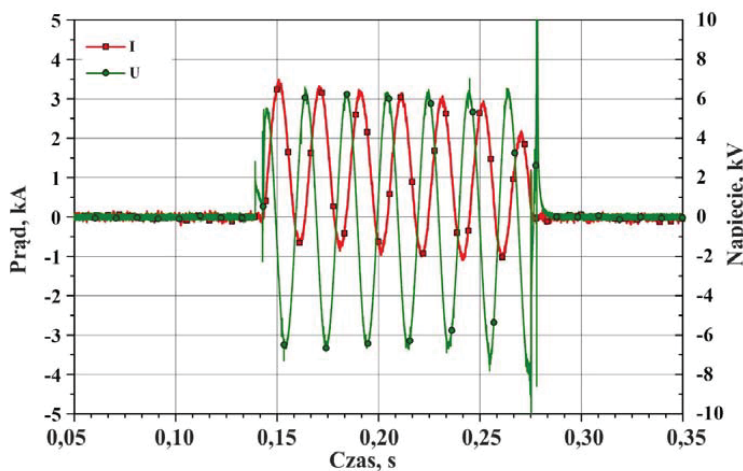
i napięć mierzonych na ograniczniku prądu podczas ograniczania prądu zwarciovego z trzech kolejnych prób. Podczas zwarcia wartość skuteczna na ograniczniku wynosiła 4,24 kV. Wartość szczytowa prądu zwarciovego została ograniczona z 28 kA do 3,4 kA. Analizując otrzymane wyniki, można stwierdzić, że ośmiokrotne ograniczenie szczytowej wartości prądu zwarciovego, w czasie krótszym od $\frac{1}{4}$ okresu prądu, pozwala skutecznie zabezpieczyć transformatory i aparaturę sieciowa przed dynamicznymi skutkami przepływu prądu zwarciovego.



Rys. 7.63. Przebieg prądu w obwodzie zwarciovym oraz napięcia mierzonego na ograniczniku – próba zwarciovowa nr 1



Rys. 7.64. Przebieg prądu w obwodzie zwarciovym oraz napięcia mierzonego na ograniczniku – próba zwarciovowa nr 2



Rys. 7.65. Przebieg prądu w obwodzie zwarciovym oraz napięcia mierzonego na ograniczniku – próba zwarciova nr 3

7.5. Podsumowanie

W rozdziale przedstawiono kolejne etapy realizacji projektu trójzwojowego bezrdzeniowego nadprzewodnikowego ogranicznika prądu zwarciovego na napięciu 15 kV. W pierwszej konstrukcji ogranicznika na napięciu 6,9 kV uzwojenia ogranicznika nagrzewały się nierównomiernie podczas ograniczania prądu zwarciovego. Jak wynika z przeprowadzonych symulacji numerycznych pierwotne uzwojenie nadprzewodnikowe ogranicznika w momencie wyłączenia zwarcia osiągało temperaturę 3 razy wyższą od temperatury wtórnego uzwojenia nadprzewodnikowego. Przed wykonaniem projektu technicznego ogranicznika wykonano model numeryczny ogranicznika i przeprowadzono analizę wpływu liczby zwojów poszczególnych uzwojeń ogranicznika na temperaturę końcową w chwili wyłączenia zwarcia. Przeprowadzona analiza pozwoliła na dobranie parametrów ogranicznika takich jak liczba zwojów poszczególnych uzwojeń i koniecznej długości taśmy nadprzewodnikowej. Po sformułowaniu założeń do projektu ogranicznika wykonano kolejny model numeryczny ogranicznika uwzględniający budowę modułową ogranicznika, otrzymując przebiegi prądu w poszczególnych cewkach ogranicznika, zmiany rezystancji uzwojeń oraz zmiany temperatury poszczególnych cewek ogranicznika podczas przepływu prądu zwarciovego.

Po przeprowadzeniu szczegółowej analizy otrzymanych wyników symulacji pracy ogranicznika, zaprojektowano ogranicznik prądu, kriostat azotowy z izolacją próżniową i miedziane przepusty prądowe. Zaprojektowano i wykonano sterowaną

komputerowo nawijarkę umożliwiającą wykonanie ogranicznika. Po wykonaniu ogranicznika prądu przeprowadzono laboratoryjne badania parametrów poszczególnych uzwojeń ogranicznika, a następnie po schłodzeniu ogranicznika w kąpeli ciekłego azotu wykonano trzy kolejne próby zwarciove, podczas których szczytowa wartość prądu zwarciovego została ograniczona z 28 kA do 3,4 kA.

8. WNIOSKI KOŃCOWE

W pracy przedstawiono problematykę dotyczącą nadprzewodnikowych ograniczników prądu zwarciovego typu indukcyjnego. Przedstawiono nową bezrdzeniową koncepcję nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu indukcyjnego opracowaną w Pracowni Technologii Nadprzewodnikowych Instytutu Elektrotechniki. Zasadniczą część pracy stanowi opis zrealizowanych dwóch prototypowych ograniczników bezrdzeniowych, które zostały poprzedzone opisem wykonanych badań wstępnych dotyczących badań taśm nadprzewodnikowych w stanach przejściowych i opracowanej metody wykonywania lutowanych połączeń taśm nadprzewodnikowych drugiej generacji.

Wykonany bezrdzeniowy nadprzewodnikowych ogranicznik prądu zwarciovego typu indukcyjnego jest konstrukcją trójuzwojeniową złożoną z dwóch uzwojeń nadprzewodnikowych i jednego uzwojenia miedzianego, które są sprzężone magnetycznie między sobą. Oba uzwojenia nadprzewodnikowe nawijane są jednocześnie na jeden karkas, co pozwala uzyskać bardzo duży współczynnik sprzężenia magnetycznego pomiędzy uzwojeniami, zminimalizować reaktancję rozproszenia ogranicznika, co z kolei minimalizuje napięcie na ograniczniku w stanie wyczekiwania. Zastosowane równoległe miedziane uzwojenie pierwotne połączone równoległe z pierwotnym uzwojeniem nadprzewodnikowym pozwala zmniejszyć moc wydzielaną w uzwojeniach nadprzewodnikowych podczas przepływu prądu zwarciovego, jak również zabezpiecza obwód zwarciovy przed otwarciem w przypadku uszkodzenia taśmy HTS 2G uzwojenia nadprzewodnikowego lub układu chłodzenia ogranicznika. Ogranicznik ma małą masę dzięki zastosowaniu konstrukcji bezrdzeniowej i kriogenicznego chłodzenia uzwojenia miedzianego. Ze względu na wzrost temperatury uzwojeń nadprzewodnikowych ogranicznika w bardzo krótkim czasie podczas przepływu prądu zwarciovego, zwarcie powinno być wyłączone przez konwencjonalny wyłącznik zwarciovy przed osiągnięciem maksymalnej dopuszczalnej temperatury przez uzwojenia nadprzewodnikowe ogranicznika. Wyłącznik może być jednak dobrany na znacznie mniejszy prąd znamionowy wyłączalny.

Do najważniejszych osiągnięć zawartych w pracy można zaliczyć:

- opracowanie i wykonanie stanowiska pomiarowego do automatycznego wyznaczenia rezystancji taśm HTS 2G w funkcji temperatury,
- opracowanie oprogramowania „RT IEL” w środowisku LabView, umożliwiającego sterowanie stanowiskiem do wyznaczenia rezystancji taśm HTS 2G,
- eksperymentalne wyznaczenie zależności $R = f(T)$ dla taśm HTS 2G firmy SuperPower,
- opracowanie i wykonanie stanowiska pomiarowego wraz z oprogramowaniem w środowisku LabView do badania taśm HTS 2G w stanach przejściowych,
- przeprowadzenie badań eksperymentalnych taśm HTS 2G w stanach przejściowych,
- opracowanie modelu numerycznego w programie Flux2D umożliwiającego wyznaczenie charakterystyk nagrzewania taśm HTS 2G podczas przepływu prądu zwarciovego,
- wyznaczenie dopuszczalnych wartości napięć na jednostkę długości taśmy HTS 2G zapewniających niezawodną pracę nadprzewodnikowych ograniczników prądu,
- opracowanie metody wykonywania połączeń lutowanych taśm HTS 2G,
- eksperymentalne wyznaczenie rezystancji połączeń lutowanych taśm HTS 2G chłodzonych ciekłym azotem z przepływem prądu o wartościach 100 A, 150 A i 200 A,
- opracowanie bezrdzeniowej konstrukcji nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu indukcyjnego,
- opracowanie projektów, wykonanie i przeprowadzenie testów zwarciovych dwóch konstrukcji bezrdzeniowych nadprzewodnikowych ograniczników prądu typu indukcyjnego na napięcie znamionowe 6,9 kV i 15 kV,
- wykonanie modeli numerycznych dwóch bezrdzeniowych nadprzewodnikowych ograniczników prądu typu indukcyjnego,
- wykonanie modelu numerycznego oraz przeprowadzenie analizy wpływu liczby zwojów uzwojeń ogranicznika na temperaturę końcową w chwili wyłączenia zwarcia.

Praca dotyczy ważnej, aktualnej i rozwijającej się problematyki nadprzewodnikowych ograniczników prądu zwarciovego, które mają duże szanse na wdrożenie w sieciach elektroenergetycznych. Intensywne prace nad rozwojem nadprzewodnikowych ograniczników prądu prowadzone są w wielu światowych ośrodkach naukowych. Wszystkie zagadnienia związane z pracą nadprzewodnikowych ograniczników prądu są intensywnie badane w Pracowni Technologii Nadprzewodnikowych Instytutu Elektrotechniki. Efektem prowadzonych badań są nowe konstrukcje ograniczników, których parametry użytkowe są coraz bliższe

wymaganiom stawianym przez współczesne systemy elektroenergetyczne. Dotychczasowe prace doprowadziły do opracowania nowej skutecznie działającej bezrdzeniowej konstrukcji nadprzewodnikowego ogranicznika typu indukcyjnego. Podczas ostatnich trzech lat opracowano również pierwszą na świecie nowatorką konstrukcję nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu rezystancyjnego dla sieci 6 kV chłodzonego kontaktowo z użyciem kriochłodziarki. Zmiana sposobu chłodzenia ogranicznika pozwala na zwiększenie prądu znamionowego ogranicznika poprzez chłodzenie uzwojeń do niższych temperatur oraz skuteczne ograniczenie kilku następujących po sobie zwarć.

LITERATURA

1. Angeli G., Bocchi M., Serri L., Martini L.: Short-Circuit Current Limitation Through 2G YBCO Resistive-Type SFCL Devices: A Model for Technical and Economic Comparison With Traditional Air-Core Reactors, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, t. 28, nr 4, strony 1–5, 2018.
2. Badel A., Escamez G., Tixador P.: REBCO FCL Modelling: Influence of Local Critical Current Non-Uniformities on Overall Behavior for Various Tape Architectures, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, t. 25, nr 3, strony 1–4, 2015.
3. Baldan C. A., Lamas J. S., Shigue C. Y., Filho E. R.: Test results of fault current limiter using YBCO tapes with shunt protection, *Journal of Physics: Conference Series*, t. 234, nr 3, strona 032002, 2010.
4. Balshaw N. H.: *Practical cryogenics: an introduction to laboratory cryogenics*. Oxford Instruments, Scientific Research Division, Witney, 1996.
5. Batista de Sousa W. T., Mariano Lessa Assis T., Polasek A., Monteiro A. M., de Andrade R.: Simulation of a Superconducting Fault Current Limiter: A Case Study in the Brazilian Power System With Possible Recovery Under Load, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, t. 26, nr 2, strony 1–8, 2016.
6. Beldowski T., Markiewicz H.: *Stacje i urządzenia elektroenergetyczne*. WNT, Warszawa, 1998.
7. Bin Shu i in.: Behaviors and Application Prospects of Superconducting Fault Current Limiters in Power Grids, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, t. 24, nr 5, strony 1–4, 2014.
8. Bock J. i in.: CURL 10: Development and Field-Test of a 10 kV/10 MVA Resistive Current Limiter Based on Bulk MCP-BSCCO 2212, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, t. 15, nr 2, strony 1955–1960, 2005.
9. Bock J., Hobl A., Schramm J., Kramer S., Janke C.: Resistive Superconducting Fault Current Limiters Are Becoming a Mature Technology, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, t. 25, nr 3, strony 1–4, 2015.
10. Cieśla A.: *Nadprzewodnictwo w stulecie odkrycia: wybrane przykłady zastosowań*, *Przegląd Elektrotechniczny*, strony 1–6, 2011.
11. Colangelo D., Dutoit B.: MV Power Grids Integration of a Resistive Fault Current Limiter Based on HTS-CCs, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, t. 23, nr 3, strony 5600804–5600804, 2013.

12. Cyrot M., Pavuna D., Skośkiewicz T., Wiśniewski A.: Wstęp do nadprzewodnictwa: nadprzewodniki wysokotemperaturowe. Wydaw. Naukowe PWN, Warszawa, 1996.
13. Czerwiński D.: Modelling the critical parameters of high temperature superconductor devices in transient states. Politechnika Lubelska, Lublin, 2013.
14. Dul'kin I. N., Fisher L. M., Ivanov V. P., Kalinov A. V., Sidorov, V. A., Yeysin D. V.: Temperature rise in a model of resistive HTS element of a fault current limiter, *Journal of Physics: Conference Series*, t. 97, strona 012035, 2008.
15. Ekin J.: *Experimental Techniques for Low-Temperature Measurements*. Oxford University Press, 2006.
16. Eladawy M., Metwally I. A.: A Novel Five-Leg Design for Performance Improvement of Three-Phase Presaturated Core Fault-Current Limiter, *IEEE Transactions on Magnetics*, t. 54, nr 7, strony 1–10, 2018.
17. Gandioli C., Tixador P., Alvarez-Herault M.-C., Hadjsaid N.: Impact of the superconducting fault current limiters in distribution network architecture, 2013, strony 1–6.
18. Hayakawa N., Maeno Y., Kojima H.: Fault Current Limitation Coordination in Electric Power Grid With Superconducting Fault Current Limiters, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, t. 28, nr 4, strony 1–4, 2018.
19. Hobl A., Goldacker W., Dutoit B., Martini L., Petermann A., Tixador P.: Design and Production of the ECCOFLOW Resistive Fault Current Limiter, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, t. 23, nr 3, strony 5601804–5601804, 2013.
20. Hong H. i in.: Design, Fabrication, and Operation of the Cryogenic System for a 220 kV/300 MVA Saturated Iron-Core Superconducting Fault Current Limiter, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, t. 24, nr 5, strony 1–4, 2014.
21. Hong Y.-J., In S., Yeom H.-K., Kim H., Kim H.-R.: Performance test of the cryogenic cooling system for the superconducting fault current limiter, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, t. 101, strona 012030, 2015.
22. Janowski T. i in.: *Superconducting Devices for Power Engineering*, *Acta Physica Polonica A*, t. 130, nr 2, strony 537–544, 2016.
23. Janowski T. i in.: *Nadprzewodnikowe ograniczniki prądu*. Wydawnictwo Liber Duo, Lublin, 2002.
24. Janowski T., Wojtasiewicz G., Kondratowicz-Kucewicz B., Kozak S., Kozak J., Majka M.: Superconducting Winding for Inductive Type SFCL Made of HTS Tape With Increased Resistivity, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, t. 19, nr 3, strony 1884–1887, 2009.
25. Jin J. X. i in.: Enabling High-Temperature Superconducting Technologies Toward Practical Applications, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, t. 24, nr 5, strony 1–12, 2014.
26. Kacejko P., Machowski J.: *Zwarcia w systemach elektroenergetycznych*. WNT, Warszawa, 2002.
27. Kalsi S. S.: *Applications of High Temperature Superconductors to Electric Power Equipment: Kalsi/Applications of High Temperature Superconductors*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA, 2011.
28. Kang H., Ahn M. C., Kim H. J., Chang H.-M., Ko T. K.: Design and Cooling Characteristic Results of Cryogenic System for 6.6 kV/200 A Inductive Fault Current Limiter, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, t. 14, nr 2, strony 883–886, 2004.

29. Kar S., Rao V. V.: Step-by-step design of a single phase 3.3 kV/200 a resistive type superconducting fault current limiter (R-SFCL) and cryostat, *Physica C: Superconductivity and its Applications*, t. 550, strony 107–116, 2018.
30. Kozak J., Majka M., Blazejczyk T., Berowski P.: Tests of the 15-kV Class Coreless Superconducting Fault Current Limiter, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, t. 26, nr 3, strony 1–4, 2016.
31. Kozak J., Majka M., Janowski T., Kozak S.: Design and Development of the First Polish Superconducting Fault Current Limiter For MV Distribution Systems, *Physics Procedia*, t. 36, strony 845–848, 2012.
32. Kozak J., Majka M., Janowski T., Kozak S.: Nadprzewodnikowy bezrdzeniowy indukcyjny ogranicznik prądu zwarcowego średniego napięcia, *Przegląd Elektrotechniczny*, t. 88, nr 9b/2012, strony 245–248, 2012.
33. Kozak J., Majka M., Janowski T., Kozak S., Wojtasiewicz G., Kondratowicz-Kucewicz B.: Tests and Performance Analysis of Coreless Inductive HTS Fault Current Limiters, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, t. 21, nr 3, strony 1303–1306, 2011.
34. Kozak J., Majka M., Kozak S.: Experimental Results of a 15 kV, 140 A Superconducting Fault Current Limiter, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, t. 27, nr 4, strony 1–4, 2017.
35. Kozak J., Majka M., Kozak S., Janowski T.: Design and Tests of Coreless Inductive Superconducting Fault Current Limiter, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, t. 22, nr 3, strony 5601804–5601804, 2012.
36. Kozak J., Majka M., Kozak S., Janowski T.: Comparison of Inductive and Resistive SFCL, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, t. 23, nr 3, strony 5600604–5600604, 2013.
37. Kozak J., Majka M., Kwoka R.: Badania taśm nadprzewodnikowych (2G HTS) bez stabilizatora, *Przegląd Elektrotechniczny*, t. 1, nr 3, strony 187–190, 2017.
38. Kozak S.: Modelowanie elektrycznych urządzeń nadprzewodnikowych, *Prace Instytutu Elektrotechniki*. Warszawa, 2005.
39. Kujszczyk S.: Elektroenergetyczne sieci rozdzielcze: praca zbiorowa. T. 1 T. 1. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2004.
40. Kurdziel R.: Działania cieplne i dynamiczne prądów zwarcowych, *Państwowe Wydawnictwa Techniczne*. Warszawa, 1957.
41. Kwoka R., Kozak J., Majka M.: Tests of HTS 2G Superconducting Tapes Using the Labview Environment, *Applied Computer Science*, nr Vol. 14, No. 1, strony 64–72, 2018.
42. Lech W.: Metody chłodzenia elektromagnesów nadprzewodnikowych, t. zeszyt 125. *Prace Instytutu Elektrotechniki*, Warszawa, 1983.
43. Lee H.-Y., Asif M., Park K.-H., Lee B.-W.: Feasible Application Study of Several Types of Superconducting Fault Current Limiters in HVDC Grids, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, t. 28, nr 4, strony 1–5, 2018.
44. Leon Garcia W. R., Tixador P., Raison B., Bertinato A., Luscan B., Creusot C.: Technical and Economic Analysis of the R-Type SFCL for HVDC Grids Protection, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, t. 27, nr 7, strony 1–9, 2017.
45. Liang F. i in.: Experimental Test of Two Types of Non-Inductive Solenoidal Coils for Superconducting Fault Current Limiters Use, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, t. 27, nr 4, strony 1–5, 2017.
46. Majka M.: Ograniczenia w budowie nadprzewodnikowych ograniczników dużych prądów zwarcowych. *Praca doktorska, Instytut Elektrotechniki*, 2011.

47. Majka M., Kozak J.: Superconducting Fault Current Limiter for the Electric Power System, *Acta Physica Polonica A*, t. 130, nr 2, strony 581–584, 2016.
48. Majka M., Kozak J., Janowski T., Kozak S.: Analiza skuteczności działania bezrdzeniowych indukcyjnych nadprzewodnikowych ograniczników prądu wykonanych z taśmy nadprzewodnikowej pierwszej i drugiej generacji, *Przegląd Elektrotechniczny*, t. 88, nr 8/2012, strona 4, 2012.
49. Majka M., Kozak J., Kozak S., Wojtasiewicz G., Janowski T.: Design and Numerical Analysis of the 15 kV Class Coreless Inductive Type SFCL, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, t. 25, nr 3, strony 1–5, 2015.
50. Majka M., Kozak S.: Zastosowanie taśm I i II generacji do budowy nadprzewodnikowych ograniczników prądu, *Przegląd Elektrotechniczny*, t. 85, nr 5/2009, strony 183–185, 2009.
51. Majka M., Surdacki P.: Magnetic Field Diffusion in the HTS Ring for the Fault Current Limiter Application, *Przegląd Elektrotechniczny*, t. 81, nr 12/2005, strony 118–120, 2005.
52. Majka Michał, Kozak Janusz: Technologia łączenia taśm HTS 2G w uzwojeniach nadprzewodnikowych urządzeń elektrycznych, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 03/2014, strony 157–160, 2014.
53. Markiewicz H.: Urządzenia elektroenergetyczne. WNT, Warszawa, 2001.
54. Martini L. i in.: The first Italian Superconducting Fault Current Limiter: Results of the field testing experience after one year operation, *Journal of Physics: Conference Series*, t. 507, nr 3, strona 032003, 2014.
55. Martini L. i in.: Development, Testing and Installation of a Superconducting Fault Current Limiter for Medium Voltage Distribution Networks, *Physics Procedia*, t. 36, strony 914–920, 2012.
56. Morandi A.: State of the art of superconducting fault current limiters and their application to the electric power system, *Physica C: Superconductivity*, t. 484, strony 242–247, 2013.
57. Moriconi F., De La Rosa F., Darmann F., Nelson A., Masur L., Development and Deployment of Saturated-Core Fault Current Limiters in Distribution and Transmission Substations, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, t. 21, nr 3, strony 1288–1293, 2011.
58. Näckel O.: Development of an Air Coil Superconducting Fault Current Limiter, strona 220.
59. Nackel O., Noe M., Conceptual Design Study of an Air Coil Fault Current Limiter, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, t. 23, nr 3, strony 5602404–5602404, 2013.
60. Naeckel O. i in.: Power Hardware-in-the-Loop Testing of an Air Coil Superconducting Fault Current Limiter Demonstrator, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, t. 25, nr 3, strony 1–7, 2015.
61. Naeckel O., Noe M.: Design and Test of an Air Coil Superconducting Fault Current Limiter Demonstrator, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, t. 24, nr 3, strony 1–5, 2014.
62. Najafi S., Sood V. K., Hosny A.: EFFECT OF SFCL ON DISTRIBUTION POWER QUALITY, strona 19.
63. Naresh M., Singh N. K., Singh A. K.: Superconducting fault current limiter for grid connected power system protection, 2016, strony 576–581.
64. Nikulshin Y., Wolfus Y., Friedman A., Yeshurun Y.: Dynamic core length in saturated core fault current limiters, *Superconductor Science and Technology*, t. 26, nr 9, strona 095013, 2013.
65. Nishijima S. i in.: Superconductivity and the environment: a Roadmap, *Superconductor Science and Technology*, t. 26, nr 11, strona 113001, 2013.

66. Noe M., Hobl A., Tixador P.: Martini L., Dutoit B., Conceptual Design of a 24 kV, 1 kA Resistive Superconducting Fault Current Limiter, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, t. 22, nr 3, strony 5600304–5600304, 2012.
67. Noe M., Steurer M.: High-temperature superconductor fault current limiters: concepts, applications, and development status, *Superconductor Science and Technology*, t. 20, nr 3, strony R15–R29, 2007.
68. Paul W. i in.: Test of 1.2 MVA high- superconducting fault current limiter, *Superconductor Science and Technology*, t. 10, nr 12, strony 914–918, 1997.
69. Rogalla H., Kes P. H., Red.: 100 years of superconductivity. CRC Press/Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2012.
70. Sakurai A., Shiotsu M., Hata K.: Boiling heat transfer characteristics for heat inputs with various increasing rates in liquid nitrogen, *Cryogenics*, t. 32, nr 5, strony 421–429, 1992.
71. Schettino H. J., Andrade Jr R. de, Polasek A., Kottonau D., de Sousa W. T. B.: A strategy for protection of high voltage systems using resistive superconducting fault current limiters, *Physica C: Superconductivity and its Applications*, t. 544, strony 40–45, 2018.
72. Schlabbach J.: Short-circuit currents. Institution of Electrical Engineers, London, 2005.
73. Scott R.: Technika niskich temperatur. WNT, Warszawa, 1963.
74. Smith A. C., Oliver A., Pei X., Husband M., Rindfleisch M.: Experimental testing and modelling of a resistive type superconducting fault current limiter using MgB₂ wire, *Superconductor Science and Technology*, t. 25, nr 12, strona 125018, 2012.
75. Solovyov V. F., Li Q.: Application of active quenching of second generation wire for current limiting, *Physica C: Superconductivity and its Applications*, t. 519, strony 130–136, 2015.
76. Sosnowski J.: Instytut Elektrotechniki, Materiały nadprzewodnikowe: modelowanie własności i zastosowania. Wydawnictwo Książkowe Instytutu Elektrotechniki, Warszawa, 2008.
77. Sosnowski J.: Instytut Elektrotechniki, Kriokable nadprzewodnikowe. Wydawnictwo Książkowe Instytutu Elektrotechniki, Warszawa, 2012.
78. de Sousa W. T. B., Dias R., da Silva F. A., Polasek A., de Andrade R.: Comparison Between the Fault Current Limiting Performance of Bi-2212 Bifilar Components and 2G YBCO Coils, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, t. 23, nr 3, strony 5602204–5602204, 2013.
79. de Sousa W. T. B., Dicler F. N. F., Martins F. G. dos R.: Simulations of the Recovery Process of an Air-Coil SFCL, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, t. 26, nr 1, strony 1–6, 2016.
80. de Sousa W. T. B., Nackel O., Noe M.: Transient Simulations of an Air-Coil SFCL, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, t. 24, nr 4, strony 1–7, 2014.
81. de Sousa W. T. B., Polasek A., Assis T. M. L., de Andrade R., Noe M.: Simulations of Resistive and Air Coil SFCLs in a Power Grid, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, t. 25, nr 3, strony 1–5, 2015.
82. de Sousa W. T. B., Polasek A., Dicler F. N. F., de Andrade R.: Application of the FDM-ADI Method for Simulating SFCL Under Inrush Conditions, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, t. 26, nr 3, strony 1–5, 2016.
83. de Sousa W. T. B., Polasek A., Silva F. A., Dias R., Jurelo A. R., de Andrade R.: Simulations and Tests of MCP-BSCCO-2212 Superconducting Fault Current Limiters, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, t. 22, nr 2, strony 5600106–5600106, 2012.

84. Staniszewski B.: Wymiana ciepła. PWN, Warszawa, 1979.
85. Stryczewska H. D., Janowski T.: Wac-Włodarczyk A., Technologie nadprzewodnikowe i plazmowe w energetyce. Lubelskie Towarzystwo Naukowe, Lublin, 2009.
86. Szewczyk A., Szymczak H., Puźniak R., Wiśniewski A.: Wydawnictwo Naukowe PWN, Magnetyzm i nadprzewodnictwo. PWN, Warszawa, 2017.
87. Timmerhaus K. D., Reed R. P., Red.: Cryogenic engineering: fifty years of progress. Springer, New York, 2007.
88. Tixador P., Vialle J., Badel A.: Operation of an SCFCL at 65 K, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, t. 28, nr 4, strony 1–5, 2018.
89. Tleis N. D.: Power systems modelling and fault analysis: theory and practice, 1. publ. Elsevier, Amsterdam, 2008.
90. Vilhena N., Taillacq A., Pronto A., Murta-Pina J., Alvarez A.: Analysis of Electromagnetic Forces in Superconducting Fault-Current Limiters Under Short-Circuit Condition, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, t. 26, nr 3, strony 1–4, 2016.
91. Weitering H. H., Wu J. Z.: Superconductivity: how the unconventional became the new norm, Superconductor Science and Technology, t. 30, nr 4, strona 040301, 2017.
92. Xin Y. i in.: Development of a 220 kV/300 MVA superconductive fault current limiter, Superconductor Science and Technology, t. 25, nr 10, strona 105011, 2012.
93. Zhang C., Tang Y., Xu Y., Ren L., Wang Z., Liang S.: Analysis of Magnetic Circuit and Leakage Magnetic Field of a Saturated Iron-Core Superconducting Fault Current Limiter, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, t. 27, nr 4, strony 1–5, 2017.
94. Zhang X., Ruiz H. S., Geng J., Coombs T. A.: Optimal location and minimum number of superconducting fault current limiters for the protection of power grids, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, t. 87, strony 136–143, 2017.
95. Zhang X., Ruiz H. S., Zhong Z., Coombs T. A.: Implementation of Resistive Type Superconducting Fault Current Limiters in Electrical Grids: Performance Analysis and Measuring of Optimal Locations, arXiv:1508.01162 [cond-mat, physics:physics], 2015.
96. Low Temperature Physics: Applications of superconductivity, Physics Bulletin, t. 35, nr 4, strony 140–141, 1984.
97. PN-IEC 60050-815:2002 - Międzynarodowy Słownik Terminologiczny Elektryki – Część 815: Nadprzewodnictwo.
98. PN-EN 61788-1 Nadprzewodnictwo - Część 1: Pomiar prądu krytycznego. Prąd krytyczny dla prądu stałego nadprzewodników kompozytowych Cu/Nb-Ti.
99. PN-EN 61788-2 Nadprzewodnictwo - Część 2: Pomiar prądu krytycznego. Prąd krytyczny dla prądu stałego nadprzewodników kompozytowych Nb₃Sn.
100. The Applied Superconductivity Center <http://fs.magnet.fsu.edu/~lee/plot/plot.htm>
101. Materiały informacyjne firmy Sumitomo: http://global-sei.com/super/hts_e/ [Online].
102. Materiały informacyjne firmy SuperPower: <http://www.superpower-inc.com/content/2g-hts-wire> [Online].
103. Materiały informacyjne firmy American Superconductor: http://www.amsc.com/solutions-products/hts_wire.html [Online].
104. Materiały informacyjne firmy Bruker: https://www.bruker.com/fileadmin/user_upload/8-PDF-Docs/BEST/DataSheets/HTS.pdf [Online].
105. Materiały informacyjne firmy Theva: <https://theva.com/superconductors/theva-pro-line/> [Online].

106. Materiały informacyjne firmy SuperOx: <http://www.superox.ru/en/products/998-2ghs/> [Online].

Przyjęto do druku dnia 26.11.2018 r.

CORLESS INDUCTIVE SUPERCONDUCTING FAULT CURRENT LIMITERS

Michał MAJKA

ABSTRACT *The electrodynamic forces occurring during the course of a fault current may damage the devices of the electric power system within tens of milliseconds. Every such failure of an electric power network entails expensive and time-consuming repairs. Therefore, it is vital that the network's operation be secured with a reliable protection system. A superconducting fault current limiter (SFCL) is an electrical device with a negligible impedance in normal operating conditions that switches to a high impedance state during fault, limiting short circuit current. SFCLs react very rapidly by limiting the first, the most dangerous, surge current during a current fault condition, thus protecting the devices of the electric power network from the dynamic effects of current faults.*

This paper discusses the main issues concerning the new coreless constructions of inductive type fault current limiters with rated parameters 6.9 kV / 600 A and 15 kV / 140 A. Compact design of the coreless superconducting fault current limiter consists of three magnetically coupled windings cooled in liquid nitrogen. The presented coreless constructions of current limiters have low weight and the voltage on the limiter during the normal operation is negligible. The paper presents the designs and numerical models of the limiters and presents the results of tests performed at a high-power test facility. The paper also contains the results of experimental research on second generation superconducting tapes, they are necessary to make numerical models of superconducting current limiters.

Keywords: *superconducting fault current limiter, coreless, superconducting tapes, short-circuit test, liquid nitrogen*

Dr inż. Michał MAJKA ukończył studia inżynierskie o kierunku elektrotechnika na Wydziale Elektrycznym Politechniki Lubelskiej uzyskując dyplom inżyniera elektryka w 2002 roku. W 2005 roku ukończył studia magisterskie na Wydziale Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej. W latach 2005 – 2009 był uczestnikiem studiów doktoranckich w zakresie elektrotechniki prowadzonych na Wydziale Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej. Podczas studiów magisterskich pracował na stanowisku Inżyniera budowy i Asystenta projektanta w Przedsiębiorstwie „Kerimiks” sp. z o.o. gdzie zajmował się projektowaniem instalacji elektrycznych w dużych obiektach przemysłowych.



Działalność naukową rozpoczął w 2006 roku w Pracowni Technologii Nadprzewodnikowych Zakładu Wielkich Mocy Instytutu Elektrotechniki, gdzie obecnie pracuje na stanowisku adiunkta. Stopień naukowy doktora nauk technicznych w dyscyplinie elektrotechnika uzyskał z wyróżnieniem w dniu 15 grudnia 2011 roku w Instytucie Elektrotechniki.

Od 1 października 2014 roku prowadzi zajęcia dydaktyczne na Wydziale Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej, a od 1 października 2016 roku do chwili obecnej pracuje dydaktycznie i naukowo na stanowisku adiunkta.

Jest laureatem XXX i XXXIII konkursu na najlepszą pracę naukową i naukowo-techniczną wykonaną w Instytucie Elektrotechniki w 2012 i 2015 roku. Jest współautorem dwóch monografii i ponad pięćdziesięciu artykułów, w tym 31 z listy filadelfijskiej. Brał udział w szesnastu konferencjach, dwukrotnie był członkiem komitetu organizacyjnego międzynarodowej konferencji „International Conference Electromagnetic Devices and Processes in Environment Protection ELMECO”. Recenzował publikacje dla międzynarodowych czasopism naukowych m.in. IEEE Transaction on Applied Superconductivity, International Journal of Electrical Power and Energy Systems i Acta Physica Polonica A. Jest współautorem dwóch patentów. Brał udział w realizacji dziewięciu projektów badawczych. Jest promotorem pomocniczym dwóch otwartych przewodów doktorskich na Wydziale Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej.

IEI, Warszawa 2018. Nakład: 135 egz. Ark. wyd. 15.56. Ark. druk. 11,5. Pap. of. kl. III. 80 g.

Oddano do druku w grudniu 2018 r. Druk ukończono w grudniu 2018 r.

Redakcja – Instytut Elektrotechniki, Dział Marketingu i Informacji Naukowej
