

Hybrydowe modele numeryczne
nadprzewodnikowych ograniczników
prądu do wyznaczania zmian prądu
i temperatury podczas zwarcia

POLITECHNIKA LUBELSKA

WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI I INFORMATYKI

ROZPRAWA DOKTORSKA



Politechnika Lubelska
Wydział Elektrotechniki i Informatyki
ul. Nadbystrzycka 38A
20-618 Lublin

mgr Marcin Kafarski

Hybrydowe modele numeryczne nadprzewodnikowych ograniczników prądu do wyznaczania zmian prądu i temperatury podczas zwarcia

Promotor:

dr hab. inż. Sławomir Kozak

prof. Instytutu Elektrotechniki w Warszawie



Politechnika Lubelska
Lublin 2012

Spis treści

1. Wstęp.....	9
2. Materiały nadprzewodnikowe.....	11
2.1. Właściwości nadprzewodników	11
2.1.1. Rezystywność.....	11
2.1.2. Parametry krytyczne.....	11
2.1.3. Efekt Meissnera-Ochsenfelda	12
2.1.4. Nadprzewodniki I i II rodzaju oraz niskotemperaturowe i wysokotemperaturowe.....	12
2.1.5. Przejście nadprzewodzące.....	13
2.2. Właściwości nadprzewodników Bi-2223 i YBCO	15
2.2.1. Struktura.....	15
2.2.2. Parametry elektryczne i cieplne	18
3. Taśmy HSW i SF12050 dla nadprzewodnikowych ograniczników prądu ...	22
3.1. Technologia wytwarzania taśm nadprzewodnikowych	23
3.1.1. AMSC High Strength Wire.....	23
3.1.2. SF12050	25
3.2. Parametry elektryczne taśm	25
3.2.1. Rezystancja	25
3.2.2. Prąd krytyczny	28
3.3. Parametry cieplne	31
3.3.1. Nagrzewanie taśm przez prąd zwarciový	33
3.3.2. Wymiana ciepła pomiędzy powierzchnią chłodzoną, a ciekłym azotem.....	34
3.3.3. Wyznaczanie temperatury taśmy nadprzewodnikowej na podstawie pomiarów wielkości elektrycznych	35
3.4. Przejście nadprzewodzące w taśmach	36
3.4.1. Mechanizm rozprzestrzeniania się strefy rezystywnej.....	36
3.4.2. Metody pomiaru NZPV.....	38
3.4.3. Wartości NZPV dla taśm nadprzewodnikowych	39
3.4.4. Strefa rezystywna w warunkach rzeczywistego zwarcia	40
4. Nadprzewodnikowe ograniczniki prądu	43
4.1. SFCL typu rezystancyjnego.....	43

4.2. SFCL typu indukcyjnego	44
5. Modele numeryczne nadprzewodnikowych ograniczników prądu.....	49
5.1. Założenia do modeli numerycznych	49
5.2. Charakterystyki $R(i)$ taśm HTS 1G i 2G.....	50
5.3. Uniwersalny analityczny model numeryczny	55
5.4. Hybrydowy model numeryczny nadprzewodnikowego ogranicznika prądu	59
5.4.1. Schemat blokowy hybrydowego modelu numerycznego.....	59
5.4.2. Geometria i siatka modelowanego ogranicznika	68
5.4.3. Moduł magnetyczny-przejęciowy sprzężony z obwodem zewnątrznym.....	71
5.4.4. Moduł cieplny i modelowanie właściwości nadprzewodników..	76
6. Badania nadprzewodnikowych ograniczników prądu typu rezystancyjnego	77
6.1. SFCL typu rezystancyjnego z taśmy HTS 1G	77
6.2. SFCL typu rezystancyjnego z taśmy HTS 2G	83
6.3. Podsumowanie badań nadprzewodnikowych ograniczników prądu typu rezystancyjnego.....	87
7. Badania nadprzewodnikowych ograniczników prądu typu indukcyjnego....	88
7.1. SFCL typu indukcyjnego z taśmy HTS 1G	88
7.2. SFCL typu indukcyjnego z taśmy HTS 2G	98
7.3. Podsumowanie badań nadprzewodnikowych ograniczników prądu typu indukcyjnego	105
8. Podsumowanie i wnioski końcowe.....	106
9. Literatura.....	109
Dodatek A	114
Dodatek B	117

Wykaz symboli

1G	–	pierwsza generacja
2G	–	druga generacja
AMSC	–	American Superconductor
B	–	indukcja magnetyczna
c_i	–	ciepło właściwe i -tego elementu
c_p	–	ciepło właściwe
c_p^{sr}	–	średnie ciepło właściwe
E	–	natężenie pola elektrycznego
E_c	–	natężenie krytycznego pola elektrycznego
H_c	–	natężenie krytycznego pola magnetycznego
H_{c1}	–	natężenie dolnego krytycznego pola magnetycznego
H_{c2}	–	natężenie górnego krytycznego pola magnetycznego
HSW	–	<i>ang. High Strength Wire</i>
HTS	–	<i>ang. High Temperature Superconductor</i> (nadprzewodnik wysokotemperaturowy)
i	–	prąd chwilowy
i_p	–	wartość chwilowa prądu w pierwszym maksimum zwarcia
i_c, i_1, i_2, i_3	–	wartości chwilowe prądu w aktualnie obliczanym kroku czasowym
$i_{cc}, i_{11}, i_{22}, i_{33}$	–	wartości chwilowe prądu z poprzedniego kroku obliczeniowego
I	–	prąd
IBAD	–	<i>ang. Ion Beam Assisted Deposition</i>
I_c	–	prąd krytyczny
J	–	gęstość prądu
J_c	–	gęstość prądu krytycznego
L_{zr}	–	indukcyjność własna źródła zasilania
L_1, L_2, L_3	–	indukcyjności własne uzwojeń nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu indukcyjnego
m	–	masa
M	–	indukcyjność wzajemna uzwojeń
n	–	parametru n dla nadprzewodnika (wykładnik prawa potęgowego)
LTS	–	<i>ang. Low Temperature Superconductor</i> (nadprzewodnik niskotemperaturowy)
NZPV	–	<i>ang. Normal Zone Propagation Velocity</i> (prędkość rozprzestrzeniania się strefy rezystywnej)
OPIT	–	<i>ang. Oxide Powder In Tube</i> (skrót używany zamiennie z PIT)
PIT	–	<i>ang. Powder In Tube</i> (metoda „proszku w rurze”)

PLD	–	<i>ang. Pulsed Laser Deposition</i>
PTN	–	Pracownia Technologii Nadprzewodnikowych w Lublinie, Zakład Wielkich Mocy, Instytut Elektrotechniki w Warszawaie
Q	–	ciepło
R	–	rezystancja
R_i	–	rezystancja i -tego elementu
R_B	–	rezystancja materiału bocznikującego nadprzewodnik
R_N	–	rezystancja nadprzewodnika
R_{obc}	–	rezystancja obciążenia
R_{sr}	–	rezystancja średnia
R_{zr}	–	rezystancja wewnętrzna źródła zasilania
R_0	–	rezystancja szczątkowa
R_1, R_2, R_3	–	rezystancje uzwojeń nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu indukcyjnego
s	–	pole powierzchni
s_i	–	pole powierzchni i -tego elementu
SFCL	–	<i>ang. Superconducting Fault Current Limiter</i> (nadprzewodnikowy ogranicznik prądu)
T	–	temperatura
T_c	–	temperatura krytyczna
T_{LN2}	–	temperatura ciekłego azotu
TM	–	<i>ang. Transient Magnetic</i> (magnetyczny-prześciowy moduł programu polowego Flux)
T_s	–	temperatura powierzchni chłodzonej
T_1, T_2	–	temperatura początkowa, temperatura końcowa
T^-	–	temperatura z poprzedniego kroku obliczeniowego
U_c^-	–	napięcie krytyczne
u_s	–	napięcie chwilowe źródła zasilania
U_s	–	napięcie skuteczne źródła zasilania
u_1	–	napięcie chwilowe na ograniczniku
V	–	objętość
Z_{zr}	–	impedancja wewnętrzna źródła zasilania
α	–	współczynnik przejmowania ciepła
Δt	–	przyrost czasowy
ΔT_{ch}	–	różnica temperatur między ciekłym azotem a powierzchnią chłodzonego obiektu
ρ	–	rezystywność
ρ_i	–	rezystywność i -tego elementu
ρ^{sr}	–	rezystywność średnia
ρ_0	–	rezystywność szczątkowa
Φ	–	strumień przekazywanego ciepła

1. Wstęp

Wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną wymusza rozbudowę sieci elektroenergetycznej. To z kolei prowadzi do stopniowego zwiększania się poziomu prądów zwarciovych oraz zwiększa prawdopodobieństwo występowania zwarć elektrycznych. Ciągły rozwój infrastruktury sieci skutkuje tym, że poziom prądów zwarciovych wkrótce przewyższy możliwości elementów zabezpieczających układy elektryczne.

Zwarcia są bardzo niebezpieczne dla kosztownych elementów sieci elektroenergetycznej dlatego stosuje się przeróżne komponenty i metody pozwalające ograniczyć poziom prądów zwarciovych. Jedną z metod jest podział i przekonfigurowanie sieci, co pociąga za sobą zmniejszenie elastyczności operacyjnej i stabilności systemu. Inną metodą jest stosowanie transformatorów o dużym procentowym napięciu zwarciovym oraz szeregowo włączonych dławików [15]. Zwiększa to jednak straty podczas normalnej pracy systemu. Ponadto używane są urządzenia takie jak bezpieczniki czy pirotechniczne zabezpieczenia przeciwzwarciove, które po każdym zwarciu ulegają przepaleniu i wymagają wymiany na nowe.

Wyżej wymienione metody i urządzenia poprawnie spełniają swoje zadanie w chwili wystąpienia zwarcia, jednak ciągły rozwój infrastruktury sieci wymaga znalezienia innych, bardziej niezawodnych urządzeń ograniczających prąd zwarciovoy.

Alternatywą są nadprzewodnikowe ograniczniki prądu (SFCL¹) [18, 26, 51]. Unikalne właściwości materiałów nadprzewodnikowych umożliwiają budowę urządzeń elektrycznych o parametrach nieosiągalnych przy stosowaniu materiałów konwencjonalnych. Nadprzewodnikowe ograniczniki prądu charakteryzują się praktycznie zerową rezystancją lub indukcyjnością w warunkach znamionowych, która gwałtownie rośnie w momencie wystąpienia zwarcia. Największe siły dynamiczne i skutki cieplne występują, gdy prąd osiąga pierwsze maksimum, a więc w pierwszych 5 ms czasu trwania zwarcia. SFCL ogranicza prąd w czasie krótszym niż 5 ms, a więc przed pojawieniem się pierwszego maksimum prądu zwarciovogo.

Wszystkie urządzenia sieci elektroenergetycznej muszą być zaprojektowane tak aby wytrzymać termiczny i mechaniczny stres związany z potencjalnie występującymi zwarciami podczas których prądy mogą osiągać wartości kilkudziesięciokrotnie większe od wartości znamionowej. Ta sama konieczność dotyczy także nadprzewodnikowych ograniczników prądu. O ile wytrzymałość mechaniczną można w prosty sposób poprawić poprzez zastosowanie bardziej wytrzymałych konstrukcji urządzenia o tyle poprawne zaprojektowanie SFCL pod kątem parametrów fizycznych jest zadaniem dużo bardziej skomplikowanym. Materiały nadprzewodnikowe w przeciwieństwie do

¹ SFCL – ang. *Superconductor Fault Current Limiter*

konwencjonalnych (takich jak np. miedź) charakteryzują się silnie nieliniowymi zależnościami parametrów materiałowych (rezystywność, ciepło właściwe itd.) od temperatury. Ponadto charakteryzujące każdy nadprzewodnik parametry krytyczne (temperatura – T_c , gęstość prądu – J_c , natężenie pola magnetycznego – H_c) zależą od siebie nawzajem. Wyżej wymienione właściwości fizyczne nadprzewodników sprawiają, że bardzo trudne jest zbudowanie SFCL o pożądanych parametrach elektrycznych i cieplnych, bazując jedynie na projektach opartych o obliczenia analityczne.

Współzależności właściwości fizycznych materiałów nadprzewodnikowych nie są jedyną trudnością, którą należy pokonać podczas projektowania SFCL. Nadprzewodnikowe ograniczniki prądu typu indukcyjnego składają się z uzwojenia pierwotnego włączonego szeregowo do zabezpieczanego obwodu i zwartego nadprzewodnikowego uzwojenia wtórnego. Konstrukcja takiego ogranicznika musi być bardzo spójna aby jak najbardziej zminimalizować magnetyczny strumień rozproszenia. Zwarte uzwojenie wtórne ogranicznika, wykonane z materiału nadprzewodnikowego o niemal zerowej rezystancji, wyklucza bezpośredni pomiar prądu w tym uzwojeniu, a zmienność tego prądu w czasie ma bardzo istotny wpływ na kształt i amplitudę prądu ograniczanego. Bardzo trudne, a wręcz niemożliwe jest dokonanie pomiaru chwilowych zmian temperatury SFCL podczas zwarcia, której wzrost ma bardzo istotne znaczenie przy ograniczaniu prądu.

Wszystkie poruszone powyżej zagadnienia zostaną dogłębnie wyjaśnione w dalszej części rozprawy, której głównym celem jest:

Opracowanie hybrydowych modeli numerycznych nadprzewodnikowych ograniczników prądu do wyznaczania zmian prądu i temperatury w procesie ograniczania prądów zwarcia oraz przeprowadzenie ich eksperymentalnej weryfikacji.

W dzisiejszych czasach modelowanie numeryczne stanowi jeden z głównych etapów projektowania urządzeń praktycznie w każdej gałęzi przemysłu. Wykonanie modelu numerycznego nadprzewodnikowego ogranicznika prądu pozwala na wirtualne przetestowanie i zbadanie reakcji urządzenia na zadane warunki pracy bez konieczności budowania modeli fizycznych. Jest to rozwiązanie tanie, ponieważ testowanie polega głównie na wprowadzaniu danych do komputera, a urządzenie prototypowe budowane jest praktycznie tylko raz w celu weryfikacji i potwierdzenia poprawności wykonanego modelu numerycznego.

Biorąc pod uwagę coraz większą popularność metod numerycznych oraz fakt, że modelowanie numeryczne wydaje się być jedyną metodą pozwalającą zapanować nad złożonością zależności międzyparametrowych materiałów nadprzewodnikowych, tezę pracy sformułowano następująco:

Hybrydowe modele numeryczne nadprzewodnikowych ograniczników prądu pozwalają określić zmiany prądu i temperatury w procesie ograniczania prądów zwarcia.

2. Materiały nadprzewodnikowe

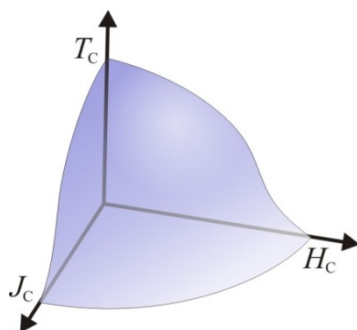
2.1. Właściwości nadprzewodników

2.1.1. Rezystywność

Podstawową cechą charakteryzującą nadprzewodniki w stanie nadprzewodzącym jest zerowa rezystywność. Wykonano eksperyment [36] w którym prąd zaindukowany w pierścieniu nadprzewodnikowym płynął przez dwa i pół roku bez mierzalnego osłabienia co potwierdziło fakt, że rezystywność nadprzewodnika jest na pewno mniejsza niż $10^{-25} \Omega\text{m}$, co jest wielkością o 18 rzędów wielkości mniejszą od rezystywności miedzi w temperaturze pokojowej. Jest to rezystywność określona dla prądu stałego. W przypadku prądu przemiennego rezystywność jest nieco większa co wynika z pojawiania się strat przemiennoprądowych [46].

2.1.2. Parametry krytyczne

Zerowa – lub zbliżona do zera – rezystywność nadprzewodnika występuje jedynie w przypadku gdy materiał znajduje się w odpowiednich warunkach. Gęstość przepływającego przez niego prądu musi mieć wartość poniżej wartości krytycznej J_c , materiał musi być schłodzony poniżej temperatury krytycznej T_c i jeśli nadprzewodnik znajduje się w zewnętrznym polu magnetycznym, wartość tego pola także musi pozostać poniżej wartości krytycznej H_c .



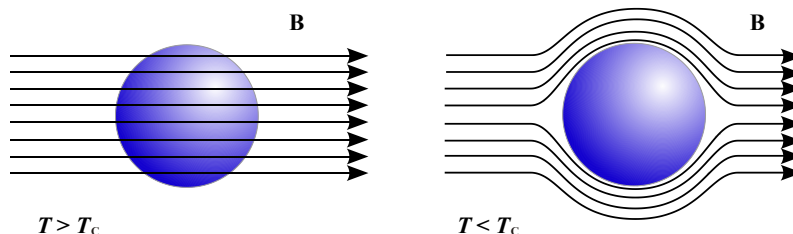
Rys. 2.1 Powierzchnia krytyczna nadprzewodnika

Każdy z wymienionych parametrów krytycznych jest zależny od pozostałych dwóch toteż tworzą one powierzchnię krytyczną poniżej której określony jest stan nadprzewodzący, a powyżej stan rezystywny (Rys. 2.1).

Parametry krytyczne są bardzo różne dla różnych nadprzewodników, a przekroczenie któregokolwiek z nich powoduje natychmiastowe przejście ze stanu nadprzewodzącego do rezystywnego.

2.1.3. Efekt Meissnera-Ochsenfelda

Drugą cechą nadprzewodników jest wypychanie pola magnetycznego z wnętrza nadprzewodnika jeśli znajduje się on w stanie nadprzewodzącym. Wypychanie pola magnetycznego jest spowodowane przepływem nadprzewodzących prądów powierzchniowych. Są to prądy ekranujące płynące w bardzo cienkiej warstwie przypowierzchniowej, powodujące powstawanie pola magnetycznego przeciwdziałającego zewnętrznemu polu. W efekcie wewnątrz nadprzewodnika indukcja magnetyczna ma wartość zerową, a nadprzewodnik zachowuje się jak idealny diamagnetyk [7].



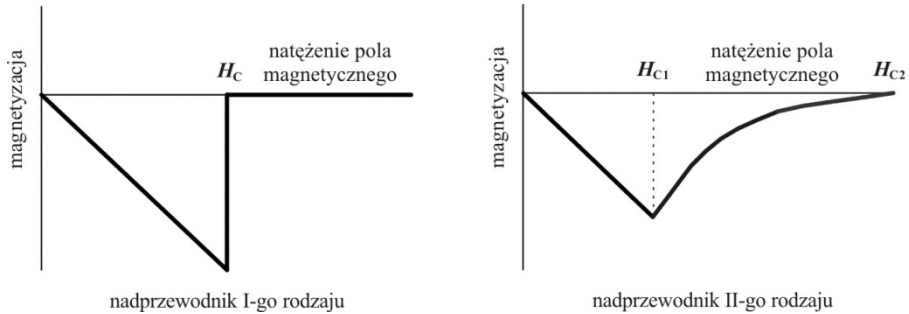
Rys. 2.2 Efekt Meissnera-Ochsenfelda, po lewej stronie nadprzewodnik w stanie rezystywnym, po prawej w stanie nadprzewodzącym (idealny diamagnetyk)

2.1.4. Nadprzewodniki I i II rodzaju oraz niskotemperaturowe i wysokotemperaturowe

Nadprzewodniki I-go rodzaju znajdujące się w stanie nadprzewodzącym i w zewnętrznym polu magnetycznym całkowicie wypychają z wnętrza pole magnetyczne (idealny diamagnetyzm), aż do momentu w którym zewnętrzne pole magnetyczne osiągnie wartość krytyczną (H_c), wówczas pole całkowicie wnika do wnętrza nadprzewodnika.

W przypadku nadprzewodników II-go rodzaju istnieją dwa pola krytyczne: H_{c1} i H_{c2} . Zwiększając pole zewnętrzne do wartości H_{c1} nadprzewodnik jest w stanie nadprzewodzącym. W zakresie zewnętrznego pola o wartości pomiędzy H_{c1} a H_{c2} nadprzewodnik nadal charakteryzuje się zerową rezystancją jednak pole magnetyczne wnika już częściowo w obszar materiału. Natomiast po przekroczeniu pola H_{c2} , strumień magnetyczny całkowicie wnika w obszar nadprzewodnika i pojawia się rezystancja – materiał przechodzi do stanu rezystywnego (Rys. 2.3).

Różnica między nadprzewodnikami nisko- i wysokotemperaturowymi jest jedynie umowna. Nadprzewodniki niskotemperaturowe (LTS²) to te których temperatura krytyczna jest mniejsza niż 25 K, pozostałe to nadprzewodniki wysokotemperaturowe (HTS). Wszystkie nadprzewodniki z rodzaju wysokotemperaturowych są nadprzewodnikami II-go rodzaju.



Rys. 2.3 Zależność magnetyzacji od natężenia pola magnetycznego dla nadprzewodników I-go i II-go rodzaju

2.1.5. Przejście nadprzewodzące

Przejście nadprzewodzące jest zmianą rezystywności z zerowej do wartości skończonej, albo w przeciwnym kierunku. W przypadku np. przekroczenia gęstości krytycznej prądu jest to przejście gładkie, ale bardzo strome dlatego przyjęto umowną wartość pola elektrycznego $E_c = 10^{-4} \frac{V}{m}$ jako kryterium prądu krytycznego. Do przedstawienia zależności pola elektrycznego od gęstości prądu stosuje się empiryczną zależność zwaną prawem potęgowym:

$$E = E_c \left(\frac{J}{J_c} \right)^n \quad (2.1)$$

gdzie wykładnik n jest dobierany eksperymentalnie w zależności od nadprzewodnika i opisuje stromość przejścia nadprzewodzącego. Na Rys. 2.4 przedstawiono graficznie interpretację prawa potęgowego pokazującą wpływ wykładnika n na stromość charakterystyki $E(J)$.

Biorąc pod uwagę, że rezystywność $\rho(J) = \frac{E}{J}$, po przekształceniu wzoru (2.1) otrzymujemy zależność rezystywności nadprzewodnika od gęstości prądu:

$$\rho(J) = \frac{E_c}{J_c} \left| \frac{J}{J_c} \right|^{n-1} \quad (2.2)$$

² LTS – ang. Low Temperature Superconductor
HTS – ang. High Temperature Superconductor

stosuje się jednak postać wzoru:

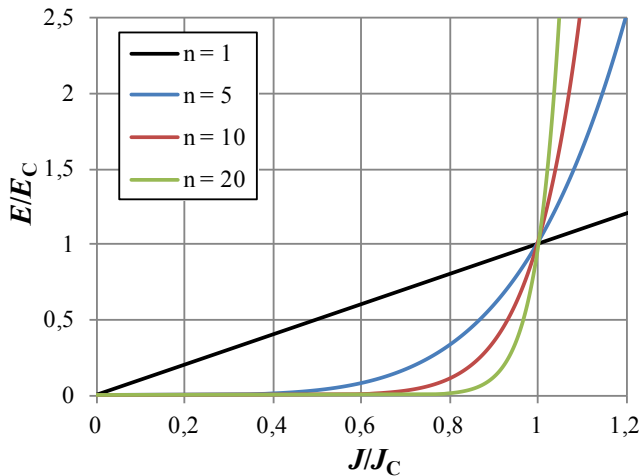
$$\rho(J) = \frac{E_c}{J_c} \left| \frac{J}{J_c} \right|^{n-1} + \rho_0 \quad (2.3)$$

gdzie ρ_0 jest rezystywnością szcztąkową, która podczas obliczeń zapobiega dzieleniu przez zero. Ma ona jednak swoją interpretację fizyczną, ponieważ rezystywność nadprzewodnika pracującego przy prądzie przemiennym nawet w stanie nadprzewodzącym nigdy nie jest zerowa. Jest znikomo mała, ale zawsze jest skończona i zjawisko idealnego przewodzenia nigdy nie jest osiąganane. Kwestię tę szczegółowo wyjaśniono między innymi w [46].

Wzór (2.3) można także zapisać w postaci pozwalającej obliczyć rezystancję:

$$R(I) = \frac{U_c}{I_c} \left| \frac{I}{I_c} \right|^{n-1} + R_0 \quad (2.4)$$

gdzie U_c jest napięciem krytycznym odpowiadającym E_c . Reasumując, jest to wartość napięcia na jednostkowym odcinku nadprzewodnika powodująca przepływ prądu krytycznego.



Rys. 2.4 Interpretacja graficzna prawa potęgowego

Czas trwania przejścia nadprzewodzącego szacowany jest na 10^{-12} sekundy co oznacza, że jest to zjawisko trwające około 1000 razy krócej niż reakcja układów krzemowych na impulsy elektryczne, co sugeruje że nadprzewodnikowe elementy mogłyby być szybsze około 1000 razy niż krzemowe układy zabezpieczające [46].

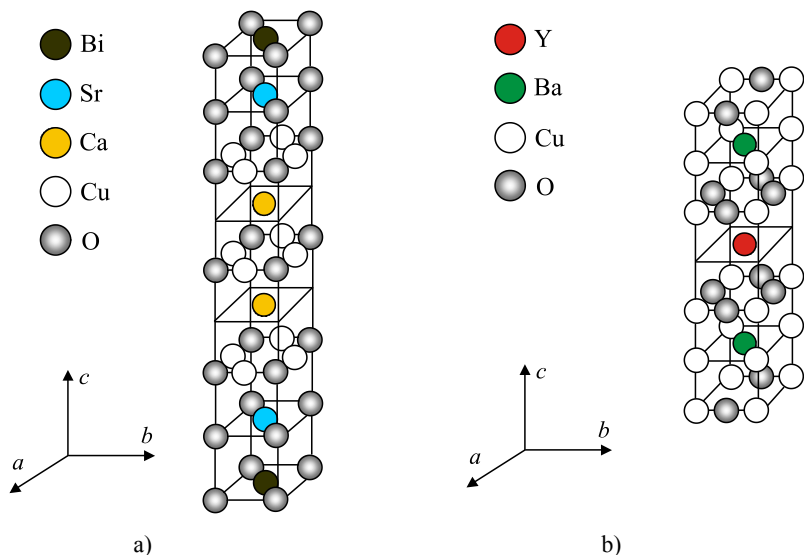
2.2. Właściwości nadprzewodników Bi-2223 i YBCO

Ze uwagi na niskie koszty chłodzenia i dostępność ciekłego azotu, do budowy nadprzewodnikowych ograniczników prądu wykorzystuje się nadprzewodniki wysokotemperaturowe (HTS) o temperaturach krytycznych wyższych od temperatury ciekłego azotu równej 77,3 K. Nadprzewodniki wysokotemperaturowe, które ponadto mają większe wartości pola krytycznego niż niskotemperaturowe, stosuje się do budowy innych nadprzewodnikowych urządzeń silnoprądowych takich jak elektromagnesy, transformatory, generatory, silniki czy kable. Znanych jest wiele różnych wysokotemperaturowych materiałów nadprzewodnikowych jednak najpopularniejszymi są dwa z nich, tak zwane BSCCO oraz YBCO, które kilka lat temu stosowane były w postaci litych cylindrycznych kształtek oraz pierścieni, a obecnie wchodzi w skład struktury taśm nadprzewodnikowych o mniej lub bardziej złożonej budowie (rozdział 3).

Ze względu na fakt wykorzystania przez autora do badań eksperymentalnych i do analizy numerycznej nadprzewodnikowych ograniczników prądu, których konstrukcja opiera się na wykorzystaniu taśm bazujących na BSCCO i YBCO w niniejszym podrozdziale przedstawiono szczegółowo jedynie te dwa nadprzewodniki.

2.2.1. Struktura

Zarówno BSCCO jak i YBCO są to związki ceramiczne o złożonej strukturze chemicznej i mające kilka odmian. Z materiału BSCCO wytwarzane są taśmy nadprzewodnikowe pierwszej generacji (1G). Ogólny wzór chemiczny BSCCO ma postać $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{x-1}\text{Cu}_x\text{O}_{2x+4}$ gdzie $x = 1, 2, 3$. Taśmy nadprzewodnikowe drugiej generacji (2G) wytwarzane są z YBCO, którego wzór ogólny ma postać $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$ ($0 < x < 1$). Schematy struktur nadprzewodników będących przedmiotem badań pokazano na Rys. 2.5.



Rys. 2.5 Schemat struktury krystalicznej pojedynczej komórki proszku nadprzewodnikowego:

a) $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$

b) $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$

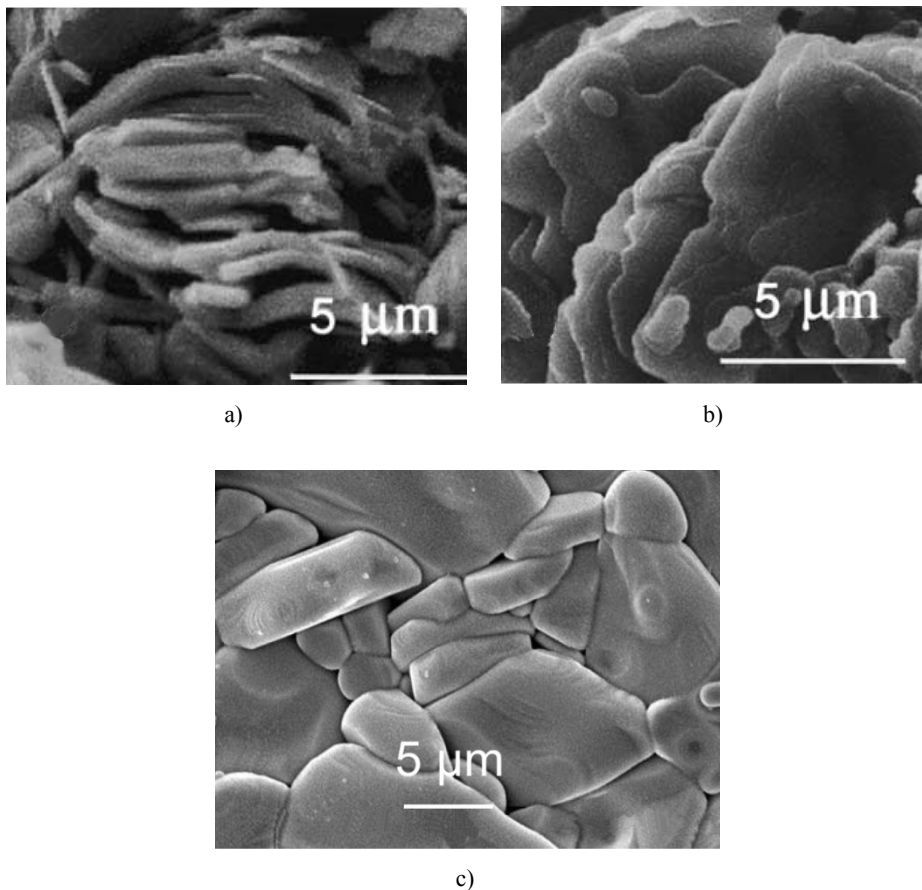
Tab. 2.1 Długości stałych sieci krystalicznej dla Bi-2223 [11] oraz YBCO [26]

		Bi-2223	YBCO
Długości stałych sieci krystalicznej w temp. 300 K, Å	a	5,4	3,81
	b	5,4	3,88
	c	24,6 / 30,9 / 37 dla $x = 1, 2, 3$	11,68
gęstość w temp. 300 K, kg/m^3		6500	6372

Nadprzewodniki Bi-2223 oraz YBCO mają granularną strukturę (Rys. 2.6), krystalizują w postaci ziaren. Każde ziarno ma kształt podobny do płytki krwi w której pojedyncze „cząstki” (Rys. 2.5) układają się tak, że powierzchnia płytki jest równoległa do płaszczyzn ab -, natomiast grubość płytki odpowiada kierunkowi c - cząstek [31]. W przypadku Bi-2223 średni stosunek szerokości pojedynczego ziarna do jego grubości wynosi około 60. Zatem biorąc pod uwagę rozmiary pojedynczej struktury („cząstki”) nadprzewodnika, ich liczba w ziarnie waha się w przedziale od 132700 do 169000.

Proszek składający się z płytko podobnych ziaren nadprzewodnika może być spiekany do postaci litych elementów (np. cylindrycznych kształtek). Do tego

celu bardziej nadają się Bi-2223, ponieważ elementy spiekane z YBCO charakteryzują się małą wytrzymałością mechaniczną (są bardzo kruche).



Rys. 2.6 Obraz ziaren nadprzewodnika z elektronowego mikroskopu skaningowego:

- a) Bi-2223, rzut boczny wzdłuż kierunku płaszczyzny *ab* [31],
- b) Bi-2223, widok wzdłuż kierunku *c* (kierunek upakowania) [31],
- c) YBCO, ziarna nieuporządkowane [33]

Bi-2223 ma podwójną warstwę Bi-O (Rys. 2.5), która jest prawie izolatorem wprowadzając w ten sposób strukturę stosu nadprzewodnik-izolator-nadprzewodnik, co jest bardzo wygodne i pożądane w zastosowaniach elektronicznych.

W przeciwieństwie do BSCCO, skrajne warstwy YBCO są metaliczne, a nie izolacyjne więc YBCO jest mniej anizotropowe wzdłuż kierunku *c*.

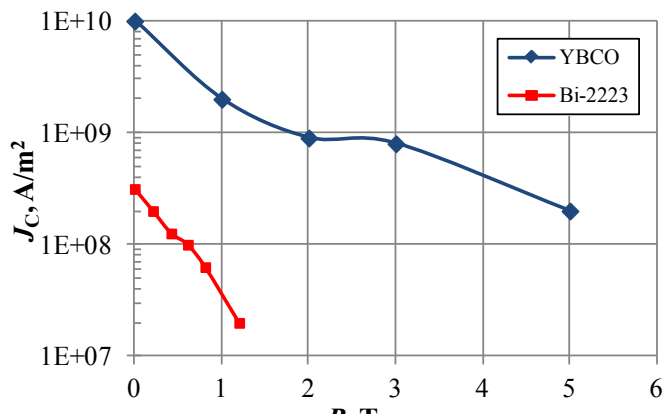
2.2.2. Parametry elektryczne i ciepłe

Wraz ze wzrostem parametru x , a więc wraz ze zwiększeniem się ilości płaszczyzn Cu-O w strukturze krystalicznej nadprzewodnika BSCCO, zwiększa się jego długość stałej sieci w kierunku c (Tab. 2.1) oraz temperatura krytyczna. Struktura z tylko jedną płaszczyzną Cu-O ($x = 1$) ma temperaturę krytyczną w zakresie 7-22 K w zależności od zawartości tlenu. Dla struktury w której $x = 2$ (tak zwane Bi-2212), T_c osiąga wartości między 50 K a 95 K (także zależną od zawartości tlenu). W przypadku $x = 3$ (Bi-2223) temperatura krytyczna waha się między 100 K a 115 K [11].

Podobnie jest w przypadku YBCO gdzie temperatura krytyczna także rośnie w zależności od współczynnika x , z tym że zmienność ta obejmuje mniejszy zakres temperatur (od 90 K do 94 K).

Charakterystyczną cechą nadprzewodników zawierających tlenki miedzi jest obecność płaszczyzn CuO_2 , które determinują ich właściwości fizyczne. Łańcuchy CuO są „źródłem ładunku” dla płaszczyzn. Jony tlenu przyciągają elektrony z płaszczyzn CuO_2 . Zatem wzrost zawartości tlenu prowadzi do wzrostu koncentracji nośników (dziur) w płaszczyznach miedziowo-tlenowych. Ze względu na koncentrację (p) dziur w płaszczyznach CuO_2 , w YBCO nadprzewodnictwo zanika przy $p \sim 0,25 - 0,3$ dziury na atom miedzi. Ze względu na zawartość tlenu, dla $0 < x < 0,4$ związek jest izolatorem natomiast dla $0,4 < x < 1$ związek jest nadprzewodnikiem. Maksymalna temperatura krytyczna jest osiągnięta dla $x = 0,93$ ($p \sim 0,15 - 0,17$) i wynosi $T_c = 94$ K [50].

Przedmiotem rozprawy są ograniczniki prądu zbudowane w oparciu o elementy nadprzewodnikowe Bi-2223 (BSCCO dla $x = 3$) oraz YBCO (dla $x = 1$). Z powodu warstwowej struktury pojedynczych komórek mają one różne właściwości fizyczne wzdłuż kierunków krystalicznych a -, b - i c -. Istotną cechą tych nadprzewodników jest silna anizotropowość gęstości prądu krytycznego w zależności od kierunku przyłożonego pola magnetycznego. W przypadku pola równoległego do kierunku c - gęstość prądu krytycznego (płynącego równoległe do a - i b -) zmniejsza się szybciej niż w przypadku pola równoległego do kierunków a - i b -. Zależność J_c od B jest bardzo trudna do bezpośredniego pomiaru co jest spowodowane istnieniem pola własnego próbki podczas pomiaru [37], dlatego charakterystyki $J_c(B)$ przedstawionych nadprzewodników, dostępne w literaturze, nieznacznie różnią się od siebie. Przykładowe zależności $J_c(B)$ dla Bi-2223 i YBCO pokazano na Rys. 2.7.



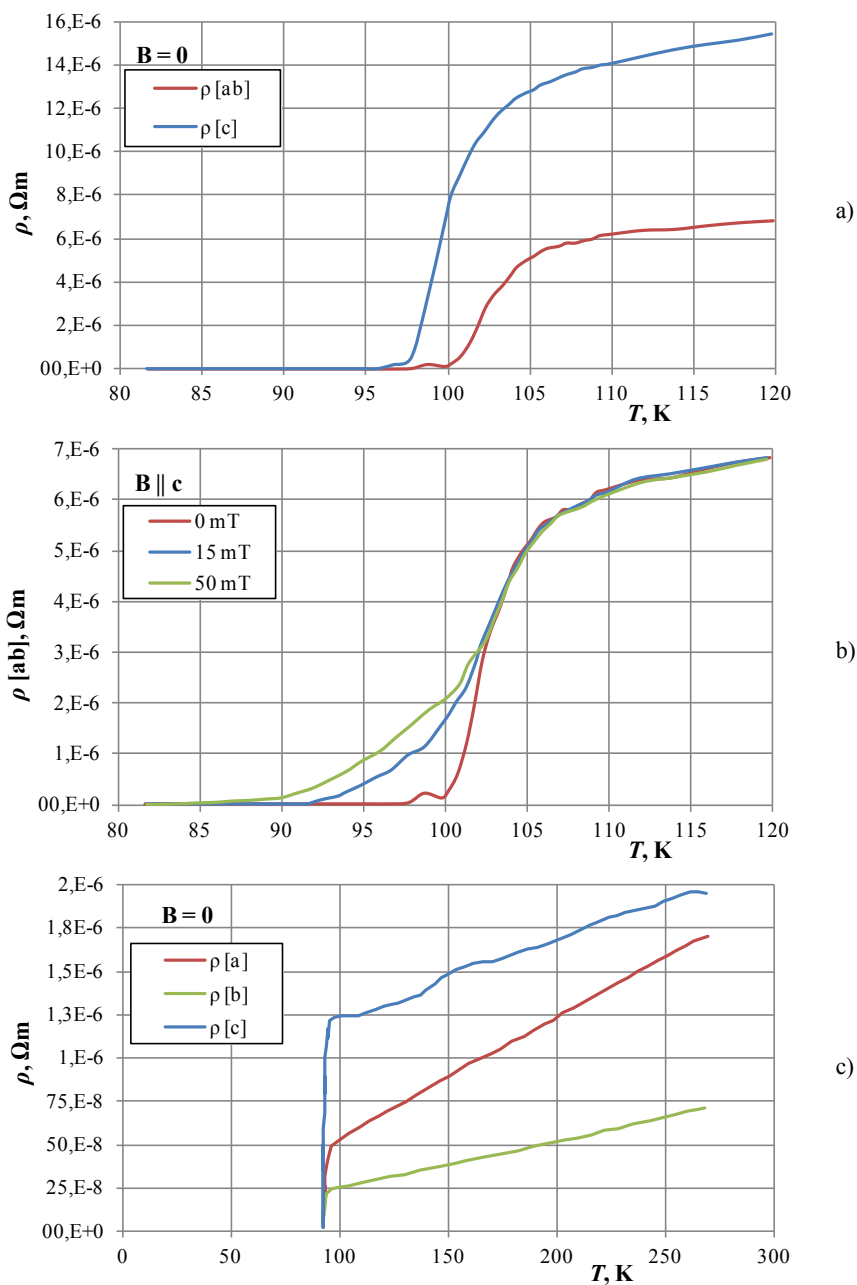
Rys. 2.7 Gęstość prądu krytycznego w zależności od przyłożonego pola magnetycznego ($B \parallel c$ -) dla Bi-2223 i YBCO w temperaturze 77 K [9]

Tab. 2.2 Parametry krytyczne wybranych nadprzewodników HTS [37, 46, 50]

	Bi-2223	YBCO
T_c , K	100	90
J_c (@ 4,2 K), A/mm ²	3000	> 100 000
J_c (@ 77 K), A/mm ²	500	> 10 000
B_{c1} (@ 77 K), T	-	płaszczyzna ab -: 0,1-0,2 kierunek c -: 0,02
B_{c2} (@ 77 K), T	30	płaszczyzna ab -: 150 kierunek c -: 40

Rys. 2.8 b) przedstawia wpływ pola magnetycznego skierowanego równoległe do kierunku krystalograficznego c - na zależność rezystywności wzdłuż płaszczyzny ab ($\rho[ab]$) od temperatury. Jest to efekt silnie zależny od pola magnetycznego i wraz ze zwiększaniem się wartości B powoduje pojawienie się rezystywności w coraz niższych temperaturach charakterystyki $\rho[ab](T)$ [31, 43]. Pole równoległe do kierunku ab - nie powoduje praktycznie żadnych zmian w zależności rezystywności od temperatury.

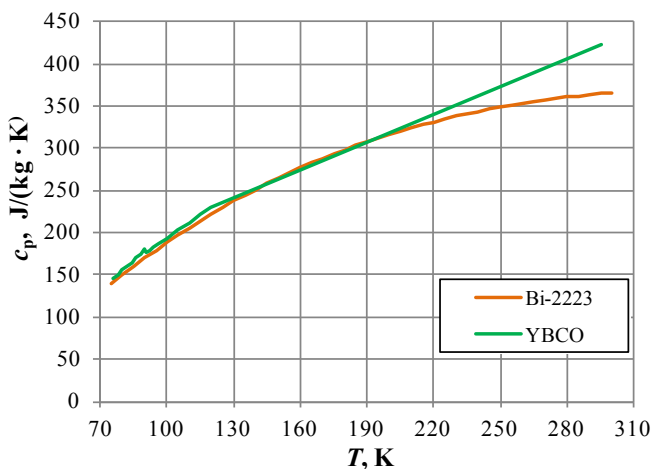
Nadprzewodniki Bi-2223 i YBCO znacznie różnią się właściwościami elektrycznymi. W temperaturze $T = 120$ K średnia rezystywność Bi-2223 jest około 15 razy większa niż YBCO, natomiast YBCO charakteryzuje się blisko 20 razy większą gęstością prądu krytycznego niż Bi-2223.



Rys. 2.8 Zależność rezystywności od temperatury:
 a) rezystywność Bi-2223 w kierunku ab - i c - dla $B = 0$ [31]
 b) rezystywność Bi-2223 w kierunku ab - dla $B \parallel c$ - [31]
 c) rezystywność YBCO w kierunkach a -, b - i c - dla $B = 0$ [38]

Duża różnica w wartości prądu krytycznego w obecności zewnętrznego pola magnetycznego dla wyżej wymienionych nadprzewodników wynika z zastosowania w strukturze nadprzewodnika YBCO komponentów (związków) (Re)BCO zamiast Bizmutu. Nazwa „Re” określa pierwiastki ziem rzadkich (z grupy lantanowców) takich jak itr Y, lantan La czy dysproz Dy.

Najbardziej popularnym związkiem (Re)BCO jest właśnie YBCO, oparte na pierwiastku Itr. YBCO charakteryzuje się lepszym zakotwiczeniem wirów i większym polem nieodwracalności niż BSCCO. YBCO jest w stanie przenosić większe prądy w silnych polach magnetycznych w warunkach chłodzenia ciekłym azotem. Jednak lite elementy wykonane z tego materiału są bardzo kruche i silnie anizotropowe, co powoduje, że prąd elektryczny nie przepływa dobrze z ziarna do ziarna jeżeli ziarna nadprzewodnika nie są perfekcyjnie ustawione. Aby uzyskać jak najlepszą przewodność, YBCO jest nanoszone epitaksjalnie na warstwę metalu. Nadprzewodniki wytwarzane taką metodą nazywane są nadprzewodnikami drugiej generacji (2G) [48]. BSCCO natomiast określany jest jako nadprzewodnik pierwszej generacji (1G), co jest związane z rodzajem procesu technologicznego wykorzystywanego do wytwarzania z niego taśm nadprzewodnikowych [35] (podrozdział 3.1).

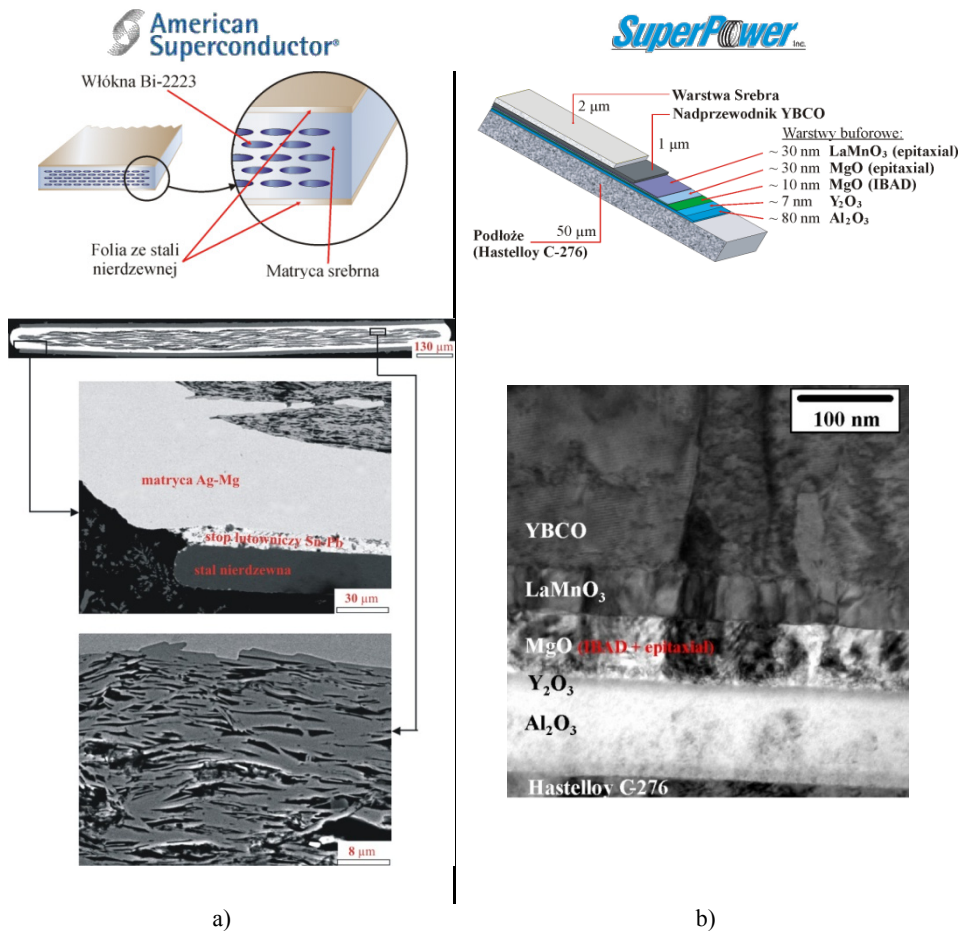


Rys. 2.9 Ciepło właściwe nadprzewodników Bi-2223 [52] i YBCO [49]

Przebieg zmienności ciepła właściwego w funkcji temperatury dla obydwu prezentowanych nadprzewodników, jest bardzo podobny w całym zakresie temperatur (Rys. 2.9), przez co wykazują one bardzo podobne właściwości cieplne.

3. Taśmy HSW i SF12050 dla nadprzewodnikowych ograniczników prądu

Przedmiotem badań w pracy są nadprzewodnikowe ograniczniki prądu zbudowane z taśmy pierwszej generacji High Strength Wire (HSW) firmy American Superconductor o prądzie krytycznym $I_c = 118$ A oraz taśmy drugiej generacji SF12050 firmy SuperPower [48] o prądzie krytycznym $I_c = 270$ A.



Rys. 3.1 Rysunki schematyczne oraz zdjęcia z mikroskopu elektronowego przekroju taśm nadprzewodnikowych:
a) 1G, High Strength Wire (HSW) [41],
b) 2G, SF12050

Taśmy te znacznie różnią się od siebie parametrami jak i budową, a rozgraniczenie na taśmę pierwszej i drugiej generacji wynika z zastosowanej technologii produkcji. Różnice w konstrukcji wyżej wymienionych taśm zestawiono w tabeli (Tab. 3.1) oraz na rysunku (Rys. 3.1).

Tab. 3.1 Parametry prezentowanych taśm nadprzewodnikowych

		taśma HTS 1G	taśma HTS 2G
nazwa katalogowa		High Strength Wire	SF12050
szerokość, mm		4	12
grubość, mm		0,3	0,053
średnia gęstość (@ 300 K), kg/m ³		8620	8900
nadprzewodnik		Bi ₂ Sr ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₁₀	YBa ₂ Cu ₃ O ₇
T_c , K		110	90
I_c , A		118	270
zawartość głównych materiałów składowych w przekroju taśmy, %	nadprzewodnik	31,9	1,9
	srebro	43,5	3,76
	stal nierdzewna	24,7	-
	hastelloy ³	-	94,06

3.1. Technologia wytwarzania taśm nadprzewodnikowych

3.1.1. AMSC High Strength Wire

Taśmę HTS High Strength Wire produkuje się w technologii PIT (OPIT)⁴. Proces ten składa się z następujących kroków [11]:

- 1) Kalcynowanie – polega na kilkukrotnym wygrzewaniu proszku nadprzewodnikowego w temperaturze 820 °C (poniżej temp. topnienia), wtedy zachodzi pierwsza reakcja chemiczna mająca na celu:
 - zredukowanie nieczystości węglowych których obecność ma negatywny wpływ na przewodność elektryczną (podczas wygrzewania węgiel reaguje z tlenem i wyparowuje w postaci CO₂)
 - uzyskanie fazy Bi-2212, która jest konieczna przed procesem deformacji na zimno
 - zmniejszenie rozmiaru ziaren do wielkości w optymalnym zakresie od 2 do 5 mikrometrów, ponieważ większe powodowałyby

³ Hastelloy C276 - niemagnetyczny stop o składzie: Ni - 57%, Mo - 16%, Cr - 15,5%, Fe - 5,5%, W - 4%, Co - 2,5%

⁴ OPIT – ang. Oxide Powder In Tube. W literaturze zamiennie spotykane są nazwy PIT i OPIT.

- niejednorodności w strukturze taśmy, natomiast mniejsze ziarna mogłyby adsorbować zbyt wiele zanieczyszczeń z powietrza
- 2) Zimna deformacja – proces polegający na rozciąganiu srebrnej tuby zawierającej nadprzewodnikowy proszek. Tak uzyskane przewody umieszczane są wewnątrz srebrnej rury (w liczbie 55 dla prezentowanej taśmy HSW) i całość jest ponownie rozciągana, aż do uzyskania pożądanej średnicy. Taki wielowłóknowy przewód jest następnie walcowany do uzyskania taśmy o przekroju około 4 mm x 0,2 mm.
 - 3) Wypiekanie – termiczna obróbka taśmy konieczna do uzyskania fazy nadprzewodnika Bi-2223.
 - 4) Przylutowanie po obu stronach taśmy pasków ze stali nierdzewnej o grubości około 37 μ m.

Produkowane tą metodą taśmy osiągają długości dochodzące do jednego kilometra. Produkuje się także taśmy o różnej liczbie włókien nadprzewodnikowych (np. 1, 7, 19, 37, 61, 91, 127) [11]. Mimo tego, że taśma wyposażona w warstwy folii ze stali nierdzewnej jest bardziej odporna na naprężenia, dostępne są także konstrukcje bez folii stalowej. Wielowłóknowa konstrukcja taśmy charakteryzuje się większą wytrzymałością na deformacje mechaniczne i zmniejsza straty przemiennoprądowe. Potwierdzone eksperymentalnie obliczenia strat AC w zewnętrznym prostopadłym polu magnetycznym pokazują, że straty te są proporcjonalne do współczynnika geometrycznego taśmy (szerokość/grubość). Z tego powodu do zastosowań przemiennoprądowych taśmy HTS produkowane są obecnie z wielu drobnych włókien, które dzięki walcowaniu uzyskują mały współczynnik geometryczny, mniejszy niż cała taśma.

Oprócz zmniejszenia strat AC, walcowanie pozytywnie wpływa także na inne właściwości taśmy HTS. Płaski przewód jest bardziej elastyczny niż okrągły, ma mniejszy promień gięcia (taśma HSW - 3,5 cm) i jest mniej narażony na degradację włókien podczas zginania. Ponadto jak opisano w podrozdziale 2.2.1, BSCCO krystalizuje w postaci płytko-podobnych ziaren, których rezystywność w kierunku *a*- i *b*- jest mniejsza niż w kierunku *c*-. Walcowanie powoduje ułożenie ziaren równoległe do powierzchni taśmy, co wpływa na zwiększenie jej przewodności w stanie rezystywnym oraz zapewnia zmniejszenie niejednorodności w strukturze włókien [11].

Ze względu na liczne deformacje podczas procesu produkcji, matryca taśmy musi być wykonana z bardzo kowalnego metalu. Z tego powodu stosuje się srebro. Jest ono bardzo plastyczne i nie reaguje chemicznie ani z nadprzewodnikiem ani z tlenem, natomiast jest dla tlenu przepuszczalne, może on swobodnie penetrować matrycę i docierając do nadprzewodnika formować fazę nadprzewodnika o odpowiednim składzie tlenowym (stechiometrii).

Można jeszcze bardziej poprawić wytrzymałość mechaniczną matrycy na deformacje poprzez zastosowanie stopów srebra zamiast czystego

pierwiastka. Zwykle stopy te zawierają do kilku procent pierwiastków takich jak: mangan, magnez lub tytan, które prawie wcale nie reagują z fazą nadprzewodnika.

3.1.2. SF12050

Taśma SF12050 wykonana jest w technologii cienkowarstwowej gdzie na podłoże (Hastelloy) napyłona jest cieniutka warstwa YBCO (Rys. 3.1). Ponieważ tekstura YBCO nie pasuje bezpośrednio do podłoża, dlatego pomiędzy nimi potrzebna jest co najmniej jedna warstwa buforowa. Warstwy buforowe są umieszczane na podłożu poprzez napylenie z pomocą działka jonów Ar. Proces ten nosi nazwę IBAD⁵. Wytwarzanie warstwy YBCO odbywa się za pomocą metody PLD⁶ gdzie YBCO jest naporowywane w niskociśnieniowej atmosferze tlenu, a następnie naporowywana jest warstwa stabilizatora, srebra. Procesy te pozwalają na bardzo dokładne ustawienie warstwy nadprzewodnika co poprawia parametry elektryczne taśmy [28].

Podłoże pełni rolę fundamentu dla nadprzewodnika YBCO oraz zapewnia elastyczność jego kruchej strukturze i pomaga w stabilizacji termicznej. Warstwy buforowe wyrównują anizotropowość HTS i izolują nadprzewodnik od chemicznie aktywnych związków. Zadaniem stabilizatora jest redukcja generacji ciepła w nadprzewodniku poprzez przekierowanie prądu (bocznik rezystancyjny) gdy nadprzewodnik przechodzi do stanu rezystywnego, jak również zapobieganie przepięciom podczas przejścia nadprzewodzącego. Stabilizator zwykle wykonany jest z metalu szlachetnego takiego jak srebro lub złoto aby zapobiec reakcji chemicznej z nadprzewodnikiem [38].

Obecnie produkowane tą metodą taśmy osiągają długości 1400 m, a wydajność procesu produkcji wynosi ponad 100 m/h.

3.2. Parametry elektryczne taśm

3.2.1. Rezystancja

Zróznicowana konstrukcja taśm HSW i SF12050 powoduje, że znacznie różnią się one rezystancją w stanie nienadprzewodzącym. Średnią wartość rezystywności taśmy nadprzewodnikowej można wyznaczyć z równania:

$$\rho^{sr}(T) = s \left(\sum_i \frac{s_i}{\rho_i(T)} \right)^{-1} \quad (3.1)$$

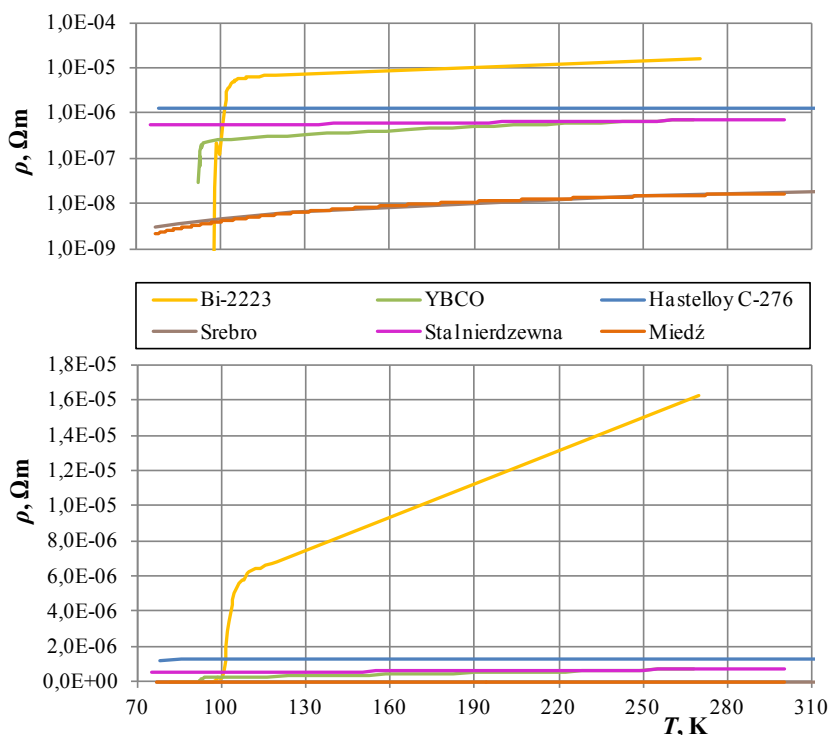
analogicznie, średnią rezystancję jednostkowego odcinka taśmy można policzyć z zależności:

⁵ IBAD – ang. *Ion Beam Assisted Deposition*

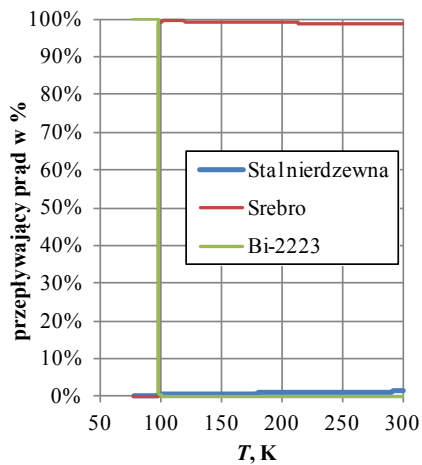
⁶ PLD – ang. *Pulsed Laser Deposition*

$$R^{SF}(T) = \left(\sum_i \frac{1}{R_i(T)} \right)^{-1} \quad (3.2)$$

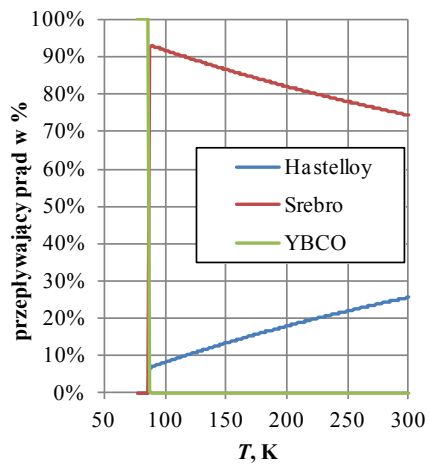
Sumowanie we wzorach (3.1) i (3.2) wykonywane jest dla wszystkich materiałów wchodzących w skład struktury rozpatrywanej taśmy. Zastosowane oznaczenia to: s – całkowite pole powierzchni przekroju poprzecznego taśmy nadprzewodnikowej oraz s_i , ρ_i , R_i , odpowiednio: pole powierzchni przekroju poprzecznego, rezystywność i rezystancja i -tego materiału wchodzącego w skład taśmy nadprzewodnikowej. Rezystywności materiałów składowych rozpatrywanych taśm nadprzewodnikowych oraz miedzi, w funkcji temperatury, zestawiono na Rys. 3.2. Rezystywności materiałów warstw buforowych taśmy SF12050 pominięto, ponieważ mają one właściwości izolatora, ponadto ich łączna grubość jest nie większa niż 160 nm więc można założyć, że prąd płynący przez te obszary jest zaniedbywalnie mały.



Rys. 3.2 Rezystywność w funkcji temperatury materiałów wchodzących w skład taśm nadprzewodnikowych HSW i SF12050 w porównaniu z rezystywnością miedzi [29, 44, 49, 52] (rysunek dolny – skala liniowa, górny – logarytmiczna)

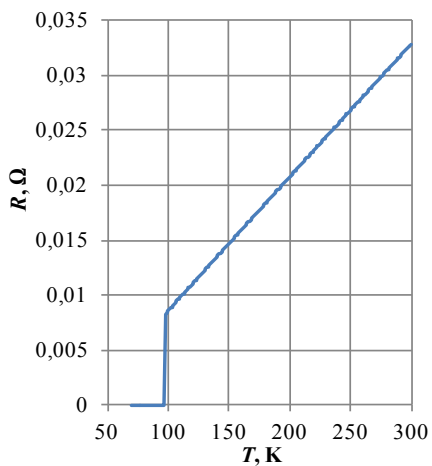


a)

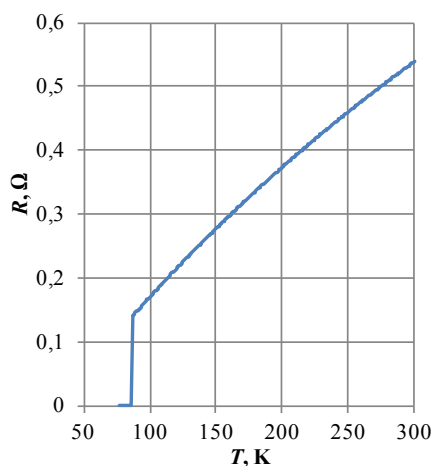


b)

Rys. 3.3 Procentowy rozplw prądów w poszczególnych elementach konstrukcji taśm nadprzewodnikowych [30]: a) HSW, b) SF12050



a)



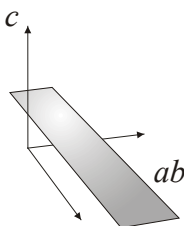
b)

Rys. 3.4 Rezystancja taśm nadprzewodnikowych o długości jednego metra w zależności od temperatury: a) taśma HSW, b) taśma SF12050

Bazując na zależności rezystywności poszczególnych materiałów wchodzących w skład konstrukcji taśmy, można uzyskać procentowy rozptył prądów w poszczególnych warstwach (elementach) taśmy w zależności od temperatury. Z przebiegów tych wynika, że w stanie nadprzewodzącym prąd płynie w całości przez nadprzewodnik, natomiast po przekroczeniu temperatury krytycznej prąd w 98% płynie przez matrycę srebrną (taśma HSW) oraz ponad 74% przez stabilizator (taśma SF12050). Na podstawie zależności rezystywności od temperatury (Rys. 3.2) oraz zawartości procentowej poszczególnych materiałów składowych w taśmie (Tab. 3.1) uzyskano temperaturowe zależności wypadkowych rezystancji metrowych odcinków obu taśm (Rys. 3.4).

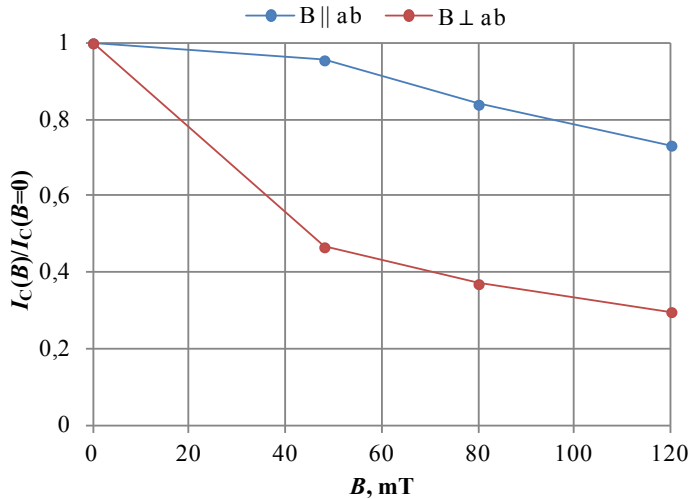
3.2.2. Prąd krytyczny

Prąd krytyczny materiałów nadprzewodnikowych zależy jest (oprócz temperatury) od natężenia i kierunku zewnętrznego pola magnetycznego. Pole magnetyczne skierowane równoległe do płaszczyzny ab taśmy nie powoduje znaczącego zmniejszenia wartości gęstości krytycznej prądu w przeciwieństwie do pola skierowanego prostopadle do powierzchni ab . Na rysunku Rys. 3.5 pokazano kierunek c oraz płaszczyznę ab taśm nadprzewodnikowych. Nie wskazano konkretnych kierunków a i b ponieważ w przypadku taśmy HSW nie ma to znaczenia gdyż rezystywność nadprzewodnika Bi-2223 w tych kierunkach jest jednakowa. Natomiast w przypadku taśmy SF12050 mimo tego, że warstwa YBCO jest nanoszona na podłoże metodą epitaksjalną, kierunek krystalograficzny cząstek nadprzewodnika nie zawsze pokrywa się z kierunkiem wzdłuż długości taśmy. Dlatego nie można ściśle określić kierunków a i b .

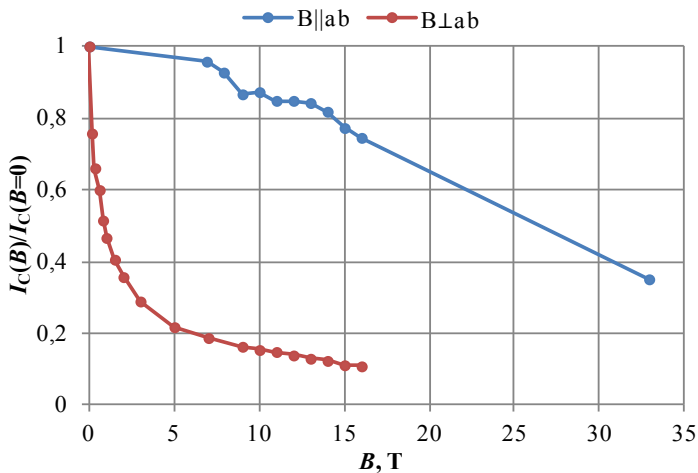


Rys. 3.5 Rysunek obrazujący płaszczyznę ab i kierunek c w taśmie nadprzewodnikowej zgodny ze sposobem ułożenia w niej struktury krystalicznej nadprzewodnika

Na Rys. 3.6 zaprezentowano zależności znormalizowanego prądu krytycznego od kierunku i wartości zewnętrznego pola magnetycznego dla taśmy HSW i SF12050.



a)



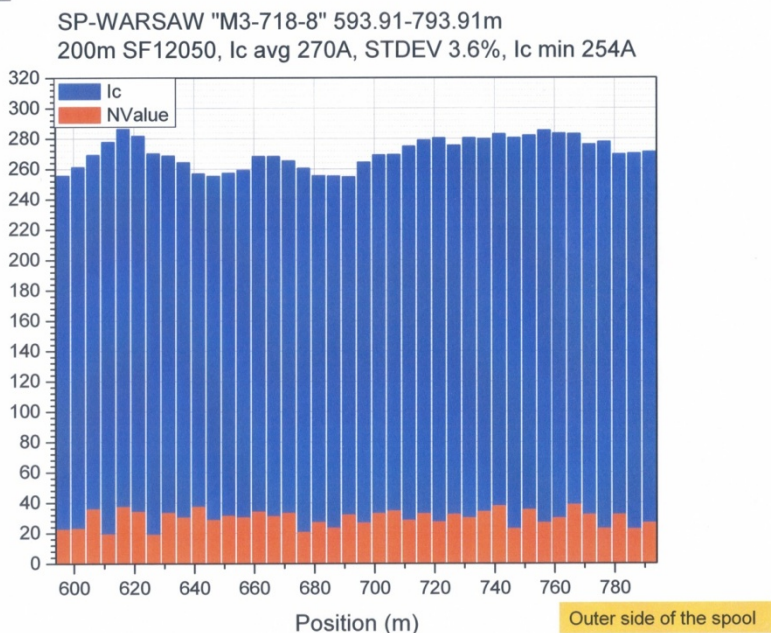
b)

Rys. 3.6 Znormalizowany prąd krytyczny w zależności od wartości i kierunku przyłożonego pola magnetycznego w temperaturze 77 K dla taśm: a) Bi-2223 [54], b) YBCO

Mimo bardzo dobrze opracowanych technologii produkcji taśm nadprzewodnikowych niezwykle trudno jest uzyskać długie odcinki charakteryzujące się jednakowymi parametrami na całej długości. Rys. 3.7 prezentuje jedną ze stron noty katalogowej taśmy SF12050 na której widać zróżnicowanie wartości prądu krytycznego (oraz wykładnika n) mierzonego dla każdego 5 metrów dwustu metrowej szpuli taśmy. Takie zróżnicowanie wartości

I_c jest spowodowane nierównomiernie naniesioną warstwą nadprzewodnika YBCO. Podobna sytuacja dotyczy także warstwy stabilizatora którego grubość wpływa na zróżnicowanie zarówno rezystywności jak i właściwości cieplnych taśmy na poszczególnych odcinkach.

SuperPower



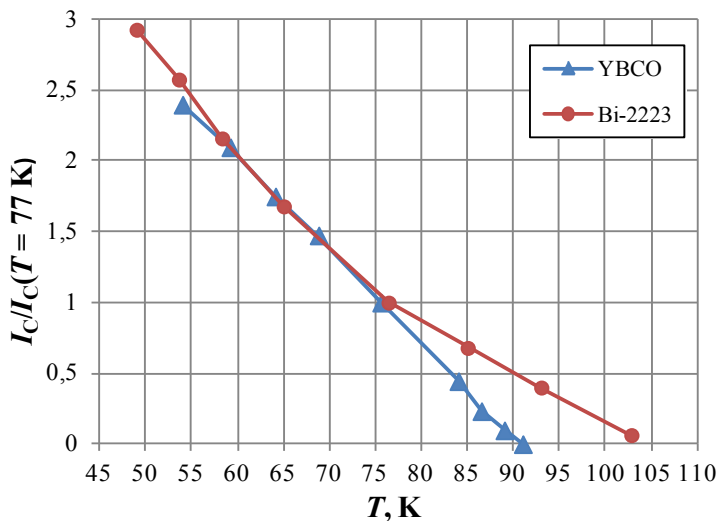
Rys. 3.7 Fragment noty katalogowej taśmy drugiej generacji SF12050⁷

Wartość prądu krytycznego taśm nadprzewodnikowych zależy od temperatury. Zwiększanie temperatury taśmy skutkuje zmniejszaniem się jej prądu krytycznego, a więc taśma będzie przechodziła do stanu rezystywnego przy coraz mniejszym prądzie [10, 53]. Zależność I_c od temperatury przedstawiono na (Rys. 3.8). W zakresie temperatur między temperaturą ciekłego azotu, a T_c , zależności te są z bardzo dobrym przybliżeniem liniowe i wartości prądu krytycznego dla dowolnej temperatury z tego zakresu można oszacować ze wzoru:

$$I_c(T) = I_c(T_0) \frac{T_c - T}{T_c - T_0} \quad (3.3)$$

⁷ PTN – Instytut Elektrotechniki w Warszawie, Zakład Wielkich Mocy, Pracownia Technologii Nadprzewodnikowych w Lublinie

gdzie: $T_0 = 77$ K, T_c – temperatura krytyczna taśmy (Tab. 3.1), a $I_c(T_0)$ – prąd krytyczny taśmy dla $T = 77$ K.



Rys. 3.8 Zależność znormalizowanego prądu krytycznego od temperatury dla taśm z nadprzewodników YBCO i Bi-2223 [53]

Trwała degradacja I_c dla taśmy drugiej generacji jest obserwowana w temperaturze przekraczającej 600 K (327 °C) [38].

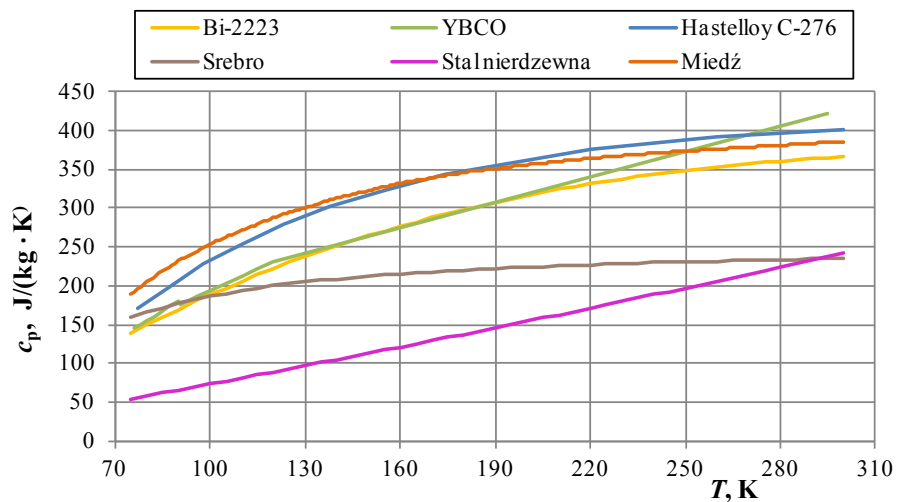
3.3. Parametry cieplne

Mimo zbliżonych wartości ciepła właściwego nadprzewodnika Bi-2223 i YBCO taśmy nadprzewodnikowe HSW i SF12050 znacznie różnią się od siebie parametrami cieplnymi, ponieważ materiały użyte do ich konstrukcji mają różne zależności ciepła właściwego od temperatury. Zależności te oraz $c_p(T)$ dla miedzi, przedstawiono na Rys. 3.9.

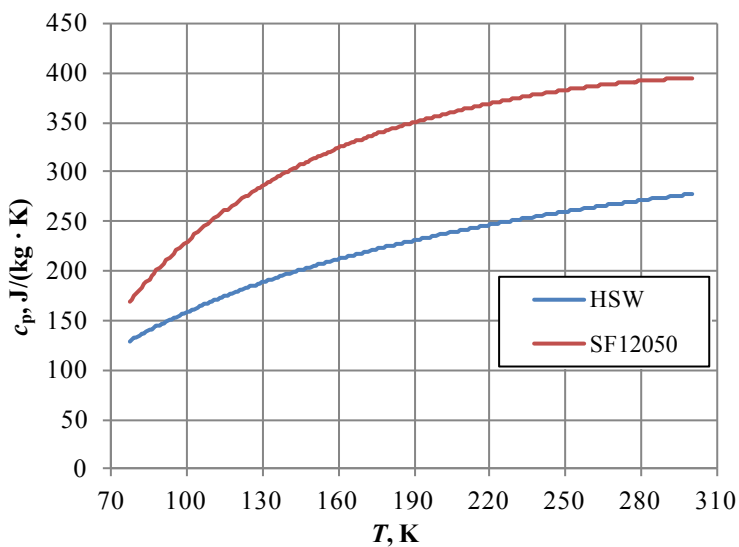
Średnią wartość objętościowego ciepła właściwego taśm można obliczyć z zależności:

$$c_p^{sr}(T) = \frac{1}{s} \sum_i (s_i c_i(T)) \quad (3.4)$$

gdzie: s – całkowite pole powierzchni przekroju poprzecznego taśmy nadprzewodnikowej, oraz s_i , c_i – odpowiednio pole powierzchni przekroju poprzecznego i ciepło właściwe materiału wchodzącego w skład taśmy. Tak uzyskane przebiegi $c_p^{sr}(T)$ pokazano na Rys. 3.10.



Rys. 3.9 Ciepło właściwe materiałów wchodzących w skład taśm nadprzewodnikowych HSW i SF12050 w porównaniu z ciepłem właściwym miedzi [29, 44, 49, 52]



Rys. 3.10 Średnie ciepło właściwe taśm HSW i SF12050 w zależności od temperatury

Średnie ciepło właściwe taśmy 1G osiąga wartości pośrednie, mniej więcej w połowie pomiędzy charakterystyką $c_p(T)$ dla srebra i stali nierdzewnej. Natomiast w przypadku taśmy 2G, $c_p^{sr}(T)$ praktycznie pokrywa się z ciepłem właściwym podłoża hastelloy, ponieważ stanowi ono ponad 94% przekroju poprzecznego taśmy. Z przedstawionych przebiegów wynika, że obie prezentowane taśmy nadprzewodnikowe łatwiej nagrzewają się w niskich temperaturach, ponadto taśma drugiej generacji ma większe ciepło właściwe od taśmy pierwszej generacji w całym zakresie temperatur co świadczy o tym, że aby podgrzać obie taśmy do takiej samej temperatury, do taśmy SF12050 należy dostarczyć więcej energii.

3.3.1. Nagrzewanie taśm przez prąd zwarciovy

Podczas zwarcia, prąd przepływający przez nadprzewodnikowe elementy ogranicznika znajdujące się w stanie rezystywnym powoduje ich nagrzewanie wywołane stratami mocy na rezystancji, zgodnie z prawem Joule'a. Bardzo istotna jest znajomość temperatury nagrzewających się elementów nadprzewodnikowych, która może osiągać setki Kelvinów i przy modelowaniu ogranicznika wykonanego z taśmy konieczne jest uwzględnienie związanych z tym zmian rezystywności oraz ciepła właściwego materiałów wchodzących w skład taśmy nadprzewodnikowej.

Energia wydzielana w elemencie nadprzewodnikowym o rezystancji R w wyniku przepływu prądu I w czasie Δt może być zapisana w postaci:

$$Q = RI^2\Delta t \quad (3.5)$$

Natomiast energię jaką trzeba dostarczyć do ciała o masie m (gęstości d) i ciepłe właściwym c_p^{sr} , aby podnieść jego temperaturę o ΔT wyraża się zależnością:

$$Q = mc_p^{sr}\Delta T \quad (3.6)$$

gdzie: ΔT jest różnicą wartości temperatury po podgrzaniu (T_2) i temperatury początkowej (przed podgrzaniem) T_1 ,

$$\Delta T = T_2 - T_1 \quad (3.7)$$

natomiast m oznacza masę, którą można wyrazić za pomocą gęstości (d) i objętości V odcinka taśmy jako: $m = V \cdot d$. Jeżeli przyrównamy do siebie równanie (3.5) i (3.6) oraz uwzględnimy zależność (3.7) to otrzymamy:

$$T_2 = \frac{RI^2}{mc_p^{sr}}\Delta t + T_1 \quad (3.8)$$

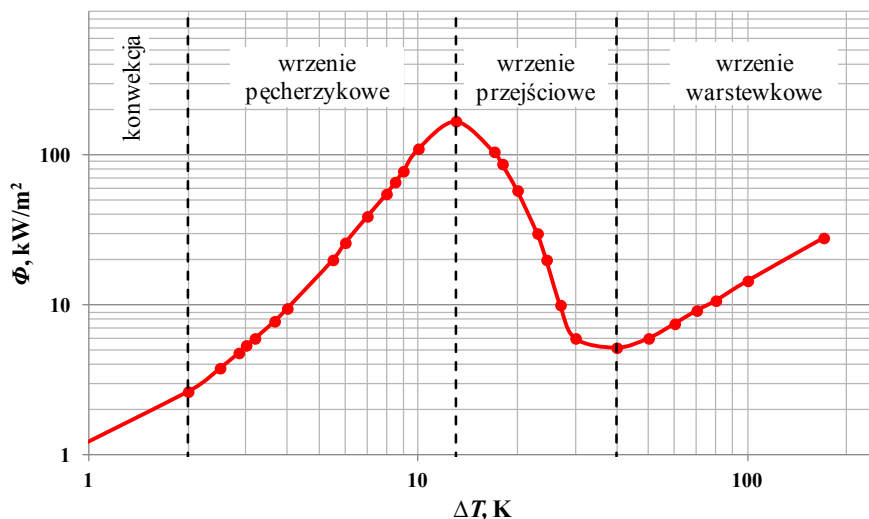
Równanie to jest słuszne przy pominięciu przepływu ciepła wzdłuż taśmy nadprzewodnikowej oraz wymiany ciepła pomiędzy taśmą i otoczeniem zewnętrznym.

3.3.2. Wymiana ciepła pomiędzy powierzchnią chłodzoną, a ciekłym azotem

Nadprzewodnikowe ograniczniki prądu do poprawnego działania wymagają środowiska o temperaturze kriogenicznej. Najprostszą metodą schłodzenia urządzenia do takiej temperatury jest kąpiel w ciekłym azocie, którego temperatura wrzenia wynosi 77,3 K. W zależności od stopnia nagrzania ogranicznika przekazywanie ciepła odbywa się przy zmiennych różnicach temperatur (ΔT_{ch}) między powierzchnią chłodzoną, a ciekłym azotem, sięgających często kilkadziesiąt kelwinów. Przekazywanie ciepła między ogranicznikiem a cieczą kriogeniczną zachodzi głównie na drodze konwekcji naturalnej przy wrzeniu ciekłego azotu (nie ma wymuszonego przepływu ciekłego azotu). Proces ten opisuje prawo Newtona:

$$Q = \alpha s \cdot (T_s - T_{LN2}) \quad (3.9)$$

gdzie: α - współczynnik przejmowania ciepła, s - powierzchnia ciała stałego, T_s - temperatura powierzchni ciała, T_{LN2} - temperatura cieczy chłodzącej. Intensywność chłodzenia (współczynnik przejmowania ciepła α) silnie zależy od różnicy temperatur między ciekłym azotem, a powierzchnią chłodzoną. W procesie tym rozróżnia się cztery fazy: konwekcja, wrzenie pęcherzykowe, wrzenie przejściowe, wrzenie warstwowe [5, 25, 45].



Rys. 3.11 Intensywność chłodzenia w kąpeli ciekłego azotu w funkcji różnicy temperatur ΔT pomiędzy powierzchnią ciała chłodzonego i ciekłym azotem [5]

Wymianę ciepła zwykle opisuje się przez podanie wartości współczynnika przejmowania ciepła α (W/(m²K)), strumienia ciepła Φ (W/m²), oraz różnicy temperatur $\Delta T_{\text{ch}} = T_s - T_{\text{LN}_2}$ przy czym $\Phi = \alpha \cdot \Delta T_{\text{ch}}$.

Wartości strumienia ciepła doprowadzonego do azotu z powierzchni ciała chłodzonego pokazuje Rys. 3.11.

W przypadku najmniejszych strumieni ciepła i najmniejszych różnic temperatur, ciepło przenoszone jest dzięki konwekcji naturalnej, a prądy konwekcyjne są rezultatem różnic gęstości płynu przy powierzchni ciała stałego i w pewnym oddaleniu od niej. W rezultacie nagrzane przy powierzchni ciała masy ciekłego azotu unoszą się ku górze i oddają ciepło na powierzchni cieczy.

W miarę wzrostu ΔT_{ch} zaczyna się wrzenie pęcherzykowe polegające na tym, że przy powierzchni ogrzewanego ciała powstają pęcherzyki pary, które stopniowo zwiększają swoją objętość i odrywają się od powierzchni, ale nie docierają do powierzchni cieczy, ponieważ ulegają kondensacji wewnątrz masy azotu. W tej fazie wrzenia strumień ciepła wzrasta do wartości maksymalnej (odpowiadającej $\Delta T_{\text{ch}} \cong 11$ K), a następnie w stosunkowo wąskim przedziale temperatur (do $\Delta T_{\text{ch}} \cong 14$ K) gwałtownie spada. Ten wąski przedział to wrzenie przejściowe. Na powierzchni ciała powstaje warstewka pary azotu i wskutek tego następuje znaczne pogorszenie odprowadzania ciepła. Wrzenie przejściowe jest niestabilne. Warstwa pary ulega ciągłym fluktuacjom, pojawia się i zanika na skutek przerywania jej przez pęcherzyki pary wydostające się z powierzchni. Powyżej $\Delta T_{\text{ch}} \cong 14$ K w miarę wzrostu różnicy temperatur obserwuje się wejście w stabilny proces wrzenia warstewkowego, przy którym różnica temperatur osiąga znaczne wartości. Wyniki eksperymentalne wrzenia warstewkowego wykazują znacznie mniejsze rozbieżności niż w przypadku wrzenia pęcherzykowego stąd w literaturze można spotkać wiele nieco różniących się od siebie charakterystyk $\Phi(\Delta T)$ [5, 22, 45].

Uwzględniając chłodzenie taśmy nadprzewodnikowej ciekłym azotem, zestawienie równań (3.5), (3.6) i (3.9) przyjmie postać:

$$mc_p^{\text{sr}} \Delta T = RI^2 \Delta t - s\Phi(\Delta T_{\text{ch}})\Delta t \quad (3.10)$$

a wyrażenie na temperaturę końcową, uwzględniając (3.7):

$$T_2 = \frac{RI^2 - s\Phi(\Delta T_{\text{ch}})}{mc_p^{\text{sr}}} \Delta t + T_1 \quad (3.11)$$

3.3.3. Wyznaczanie temperatury taśmy nadprzewodnikowej na podstawie pomiarów wielkości elektrycznych

Wykonanie dokładnego, bezpośredniego pomiaru zmian temperatury taśmy nadprzewodnikowej w czasie trwania zwarcia z wykorzystaniem czujników temperatury jest praktycznie niemożliwe. Pomiaru te obarczone są dużymi błędami, które wynikają z dużej bezwładności czujników uniemożliwiającej

szybką reakcję na zmiany temperatury i jej wielokrotny pomiar w czasie trwania zwarcia oraz z rozmiarów sensorów, które zwykle są wielokrotnie większe od grubości taśm nadprzewodnikowych. Ponadto rozkład temperatury w taśmie podczas zwarcia nie jest jednorodny i nigdy nie wiadomo w jakim punkcie taśmy czujnik został umieszczony (podrozdział 3.4.4).

Dobłą alternatywą są pośrednie pomiary temperatury poprzez pomiary wielkości elektrycznych. Pomiar prądu i napięcia pozwala na obliczenie średniej rezystancji odcinka taśmy nadprzewodnikowej. Znając rezystancję można oszacować średnią temperaturę taśmy korzystając z charakterystyki pokazanej na rysunku (Rys. 3.4). Ponieważ rezystancja taśmy nadprzewodnikowej w stanie przejściowym jest silnie nieliniowa i trudna do jednoznacznego określenia poniżej temperatury krytycznej T_c , sposób ten jest najbardziej użyteczny do określania temperatury po przekroczeniu przez taśmę temperatury krytycznej.

3.4. Przejście nadprzewodzące w taśmach

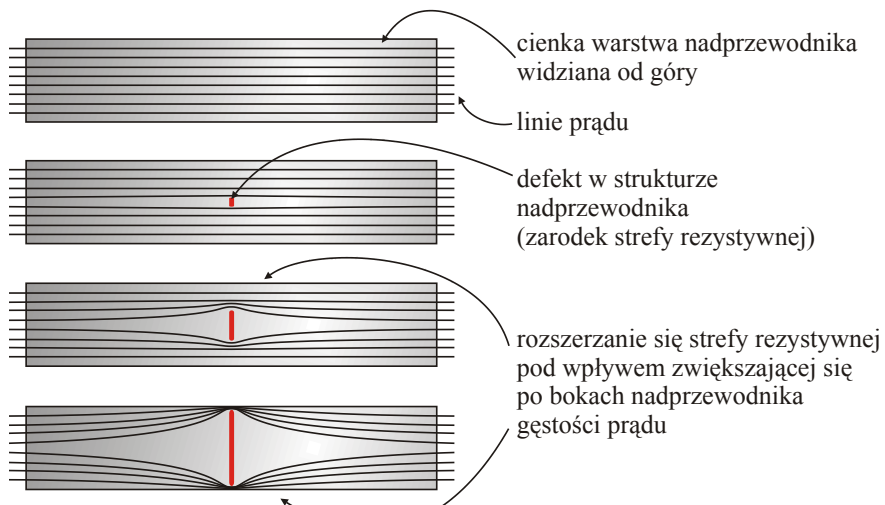
3.4.1. Mechanizm rozprzestrzeniania się strefy rezystywnej

Przejście nadprzewodzące jest to przechodzenie nadprzewodnika ze stanu nadprzewodzącego do stanu rezystywnego i odwrotnie. Proces zanikania nadprzewodzenia w taśmach nadprzewodnikowych związany jest z prędkością propagacji strefy rezystywnej określanej w literaturze skrótem NZPV⁸. Proces ten może przebiegać w różny sposób i z różną prędkością w zależności od budowy wewnętrznej taśmy nadprzewodnikowej. Zjawisko występowania i formowania się stref rezystywnych w taśmach nadprzewodnikowych związane jest z występującymi w nich niejednorodnościami [42].

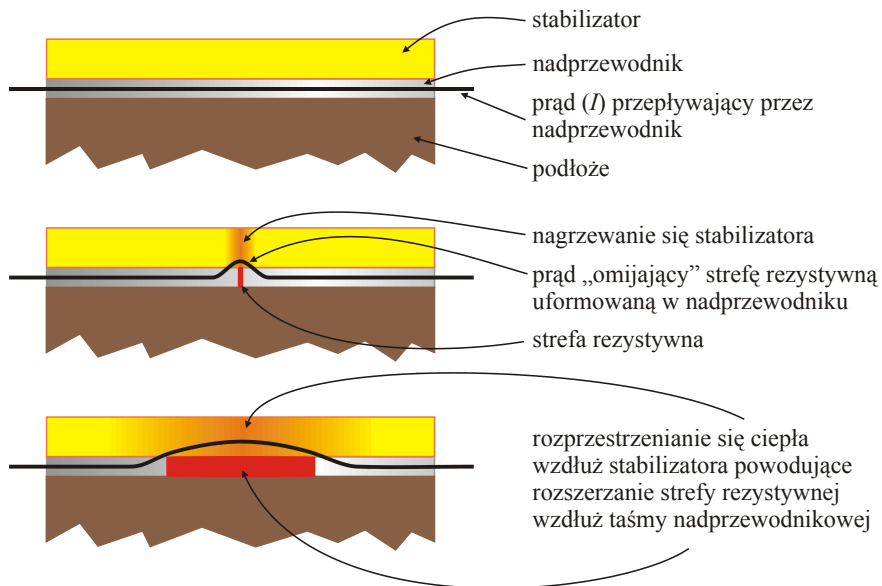
Przy gęstości prądu większej od wartości krytycznej, najsłabszy region przewodu staje się rezystywny przed innymi częściami taśmy i może powodować lokalne generowanie ciepła bez przejścia całej taśmy do stanu rezystywnego. Dla tego zakresu prądu, przejście nadprzewodzące jest silnie zależne od właściwości materiału nadprzewodnikowego zawartego w konstrukcji taśmy. W konsekwencji mechanizm przejścia zależy od tego jak szybko w materiale rozchodzi się ciepło generowane w rezystywnym, najsłabszym punkcie, aby cała taśma przeszła do stanu rezystywnego.

Rozprzestrzenianie się obszaru rezystywnego w poprzek taśmy odbywa się błyskawicznie, ponieważ punktowy defekt w nadprzewodniku powoduje, że po obu jego stronach przepływa prąd o większej gęstości co powoduje rozszerzanie się rezystywnego punktu w następstwie czego płynie obok niego prąd o jeszcze większej gęstości [34]. Efekt jest lawinowy i powoduje uformowanie się strefy rezystywnej (Rys. 3.12).

⁸ NZPV – ang. *Normal Zone Propagation Velocity*



Rys. 3.12 Schemat pokazujący kształtowanie się strefy rezystywnej w poprzek taśmy HTS pod wpływem gęstości prądu



Rys. 3.13 Propagacja strefy rezystywnej wzdłuż taśmy HTS

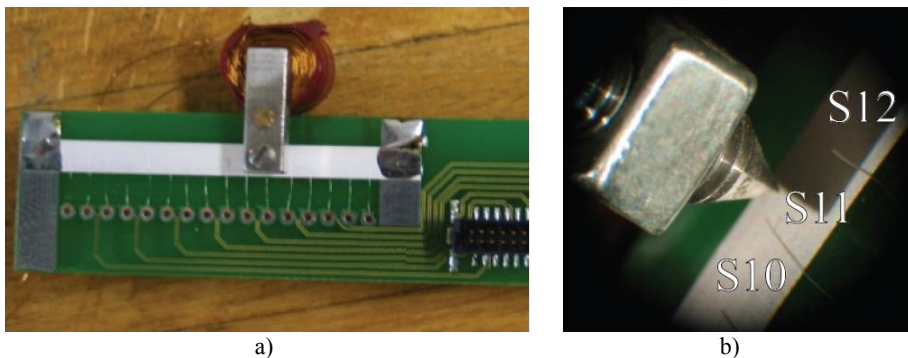
Mechanizm rozchodzenia się strefy rezystywnej wzdłuż taśmy ma inną specyfikę. Kiedy uformuje się strefa rezystywna, prąd przepływa przez warstwę

stabilizatora (taśma SF12050) lub matrycę (taśma HSW). Zarówno stabilizator jak i matryca wykonane są ze srebra, pełnią rolę bocznika dla prądu zwarciowego i mają mniejszą rezystywność w porównaniu ze strefą rezystywną warstwy nadprzewodnika.

Prąd płynący przez srebro generuje ciepło, podnosząc temperaturę w przyległych obszarach. Jeżeli ciepło odprowadzane przez ciecz chłodzącą przewyższa wartość ciepła generowanego, wówczas następuje powrót nadprzewodnika do stanu nadprzewodzącego. Jeżeli natomiast ciepło generowane, przewyższa ciepło oddawane do cieczy chłodzącej, wtedy następuje dyfuzja ciepła generowanego w gorącym punkcie do sąsiednich obszarów co stwarza warunki do dalszego rozprzestrzeniania się strefy rezystywnej wzdłuż taśmy nadprzewodnikowej.

3.4.2. Metody pomiaru NZPV

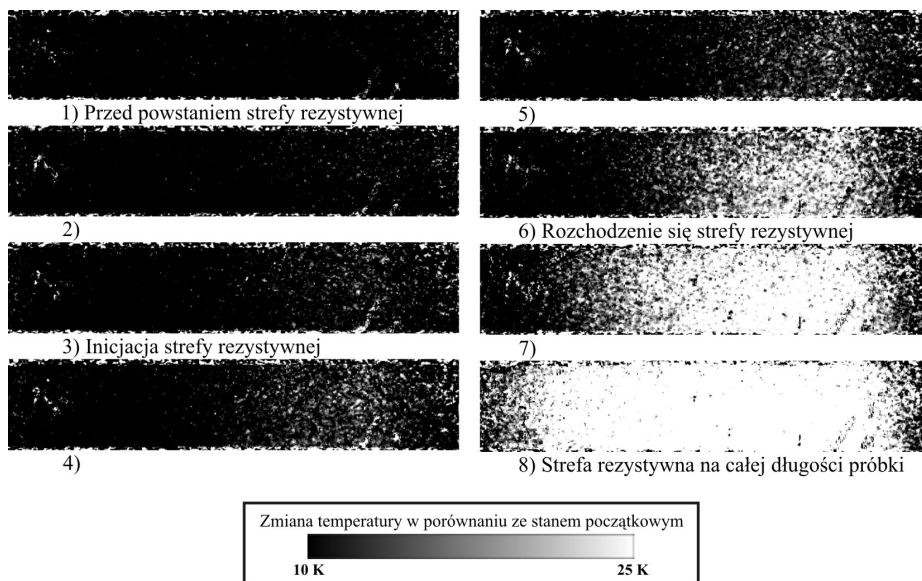
Pomiar prędkości propagacji strefy rezystywnej w taśmie nadprzewodnikowej jest stosunkowo prosty. Jedną z metod jest zaprezentowana w [38], gdzie do taśmy YBCO drugiej generacji o długości 4 cm przylutowano 16 wyprowadzeń napięciowych (Rys. 3.14 a)) tak, że została ona podzielona na 15 równych stref o długości około 2,5 mm każda. W jednej ze stref za pomocą miniaturowego elektromagnesu (Rys. 3.14 b)) zasilanego prądem stałym wywołano lokalne, punktowe obniżenie wartości gęstości krytycznej prądu. Tak uzyskany „defekt” taśmy był zarodkiem strefy rezystywnej.



Rys. 3.14 Schemat układu do pomiaru prędkości propagacji strefy rezystywnej [38]: a) próbka z widocznymi wyprowadzeniami do pomiaru napięcia w poszczególnych sekcjach, b) widok elektromagnesu wywołującego lokalny defekt w strukturze taśmy

Następnie przez taśmę przepuszczano impulsy prądu o różnej amplitudzie i długości. Rejestrowano czas w którym napięcia na poszczególnych strefach osiągały wartość odpowiadającą ustalonej rezystancji. Znając ów czas i długości

poszczególnych stref, można oszacować prędkość propagacji strefy rezystywnej. Powyższa metoda opiera się na obserwacji wielkości elektrycznych i rejestracji czasu w którym zachodzą ich zmiany.



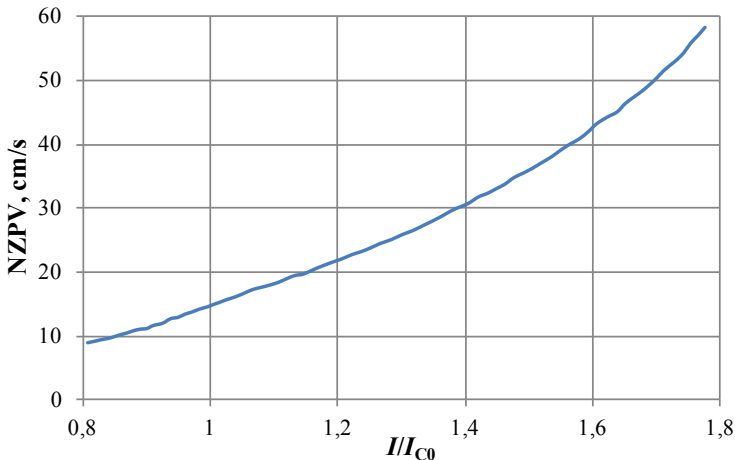
Rys. 3.15 Wyniki obserwacji rozchodzenia się strefy rezystywnej przy użyciu fluorescencji [12]

Inną metodą jest obserwacja rozchodzenia się temperatury wzdłuż taśmy nadprzewodnikowej. W tym celu można użyć fluorescencyjnego pisaka, którego kolor zmienia się wraz ze zmianą temperatury. W [12] próbkę pomalowano fluorescencyjnym flamastrem i oświetlono diodami LED emitującymi promieniowanie ultrafioletowe. Następnie w trakcie przepuszczania przez próbkę impulsów prądu, rejestrowano obraz za pomocą kamery CCD. Z tak uzyskanych zdjęć – na podstawie czasu w którym zostały wykonane – także można oszacować NZPV (Rys. 3.15).

3.4.3. Wartości NZPV dla taśm nadprzewodnikowych

Prędkość rozchodzenia się strefy rezystywnej w taśmach nadprzewodnikowych zależy w głównej mierze od konstrukcji taśmy, od tego z jakich materiałów wykonana jest matryca, podłoże i stabilizator, a także od ich grubości [24]. Zarówno to zagadnienie, jak i sposoby zwiększenia NZPV są szerzej opisane między innymi w [12, 38, 40].

Dla taśmy typu SF12050 umieszczonej w ciekłym azocie, poddanej działaniu impulsu prądowego o amplitudzie równej I_c , trwającego 20 ms $NZPV \cong 14 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$, natomiast dla prądu równego $1,5I_c$, $NZPV \cong 34 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$ (Rys. 3.16).



Rys. 3.16 Zależność prędkości propagacji strefy rezystywnej w taśmie SF12050 chłodzonej ciekłym azotem dla różnych wartości prądu⁹ [38]

W przypadku taśmy pierwszej generacji HSW, warstwa lutowana (mieszanka Sn, Pb i Ag) ma prawie takie same właściwości elektryczne i cieplne jak matryca srebrna oraz małe ciepło właściwe. Ponadto powierzchnia przekroju poprzecznego srebra w taśmie HSW jest prawie 22 razy większa niż w taśmie SF12050. Gwarantuje to szybką dystrybucję ciepła, a więc dużą prędkość propagacji strefy rezystywnej.

Największymi prędkościami rozchodzenia się strefy rezystywnej charakteryzują się taśmy bazujące na nadprzewodnikach niskotemperaturowych. Prędkość ta jest o trzy rzędy wielkości większa niż w przypadku taśm wysokotemperaturowych.

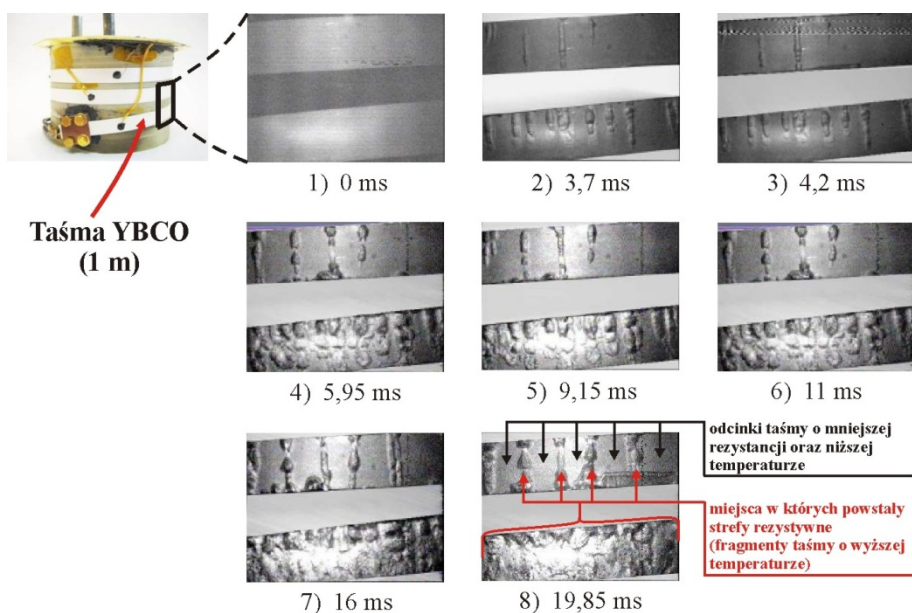
3.4.4. Strefa rezystywna w warunkach rzeczywistego zwarcia

Zaprezentowany w podrozdziale 3.4.1 mechanizm rozprzestrzeniania się strefy rezystywnej z jednego punktu na całą długość taśmy jest wynikiem sztucznie wywołanego, w miarę dużego defektu, który jest jedynym zarodkiem

⁹ Zaprezentowane wartości NZPV są prawie dwa razy większe niż w przypadku taśm o identycznej konstrukcji, ale dodatkowo pokrytych miedzią (taśma SCS12050)

przejścia nadprzewodzącego. W warunkach rzeczywistego zwarcia sytuacja wygląda nieco inaczej.

Mimo pozornie bardzo jednolitej struktury, taśma nadprzewodnikowa nie jest pozbawiona niedoskonałości. W procesie produkcji nie da się całkowicie wyeliminować ryzyka występowania wad w postaci dyslokacji struktury krystalicznej czy zanieczyszczeń w postaci atomów pierwiastków obcych. W rezultacie taśmy nadprzewodnikowe zawierają bardzo dużo takich niedoskonałości, które mogą stać się zarodkami strefy rezystywnej. Z jednej strony jest to efekt pożądaný ponieważ „gorące punkty” – będące efektem nagrzewania się taśmy – rozkładają się dosyć równomiernie na całej długości taśmy przez co zmniejsza się ryzyko jej miejscowego uszkodzenia. Z drugiej natomiast zjawisko to powoduje duże problemy z fizycznym pomiarem temperatury taśmy podczas eksperymentów, ponieważ nigdy nie można być pewnym czy czujnik temperatury przymocowany jest w „gorącym punkcie” czy w miejscu chłodniejszym. Trudno jest także określić gęstość występowania zarodków strefy rezystywnej, ponieważ na jednym kawałku taśmy w jednym miejscu mogą być umieszczone bardzo gęsto, a w innym dosyć rzadko.



Rys. 3.17 Wrzenie ciekłego azotu podczas ograniczania prądu przez 1 m taśmy YBCO (SuperPower SF12100) podczas pierwszych 20 ms czasu trwania zwarcia. Dla napięcia zasilania $U_s = 16 V_{rms}$ [32]

Na Rys. 3.17 przedstawiono metrowy kawałek taśmy YBCO zanurzony w ciekłym azocie i poddany działaniu prądu o wartości większej od krytycznej.

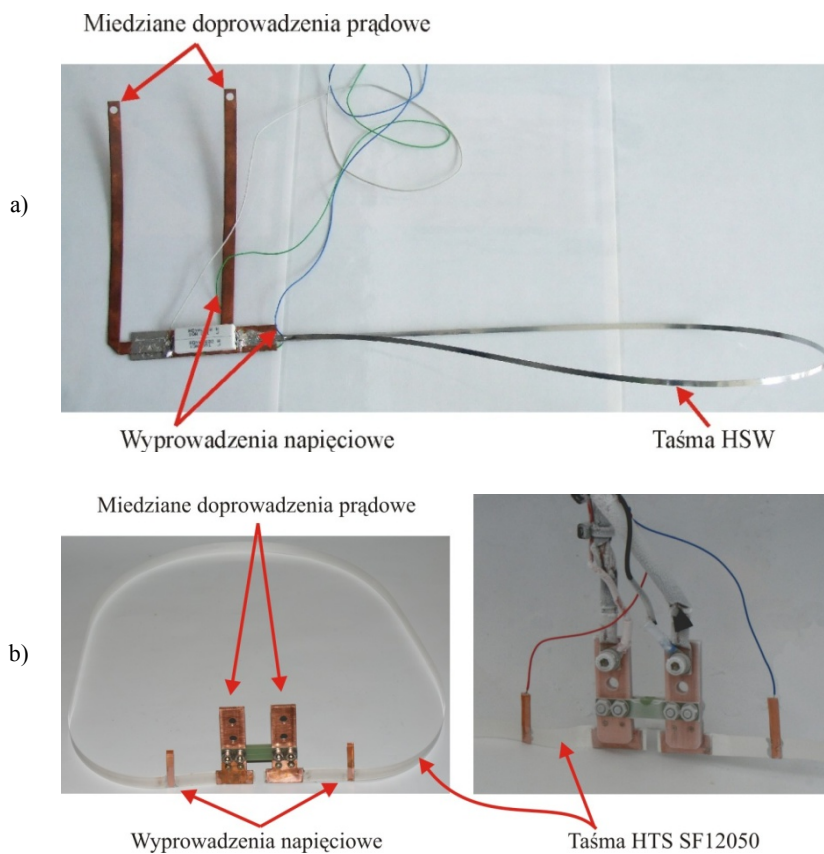
Podczas zwarcia trwającego 20 ms, za pomocą kamery CCD rejestrowano obraz powierzchni taśmy. W miejscach przejścia, taśma nagrzewa się, wówczas obserwujemy wrzenie ciekłego azotu, pęcherzyki gazu. Widać więc miejsca w których powstają strefy rezystywne oraz jak szybko się rozprzestrzeniają w czasie wzdłuż taśmy [32].

Opisane powyżej strefy rezystywne oraz prędkość rozchodzenia się strefy rezystywnej mogłyby sugerować, że w kilkunastu (kilkudziesięciu) miejscach wzdłuż taśmy nadprzewodnikowej taśma jest w stanie rezystywnym, a pomiędzy tymi odcinkami w stanie nadprzewodzącym. Takie założenie jest błędne, ponieważ wypadkowy prąd przepływający przez przekrój poprzeczny taśmy nadprzewodnikowej jest taki sam na całej jej długości. I mimo tego, że konstrukcja nie jest idealnie jednolita to przypadek w którym odcinki rezystancyjne pojawiają się w kilku miejscach, a między nimi mamy stan nadprzewodzący, jest możliwy jedynie przy prądzie o wartości nieznacznie większej od wartości krytycznej. W rzeczywistości przekroczenie prądu krytycznego o kilka (kilkanaście) amperów powoduje, że taśma przechodzi do stanu rezystywnego na całej długości, a poszczególne jej odcinki charakteryzują się różną rezystancją [27].

4. Nadprzewodnikowe ograniczniki prądu

4.1. SFCL typu rezystancyjnego

W nadprzewodnikowych ogranicznikach prądu typu rezystancyjnego, ograniczanie prądu zwarciovego zachodzi na skutek wzrostu rezystancji elementu nadprzewodnikowego włączonego szeregowo w chroniony obwód. Podczas normalnej pracy sieci w obwodzie zabezpieczanym płynie prąd znamionowy, mniejszy od prądu krytycznego elementów nadprzewodnikowych ogranicznika. Ogranicznik lub element nadprzewodnikowy ogranicznika umieszczony jest w kriostacie zapewniającym temperaturę pracy poniżej wartości krytycznej.



Rys. 4.1 Modele nadprzewodnikowych ograniczników prądu typu rezystancyjnego wykonanych z taśm HTS:
a) pierwszej generacji HSW, b) drugiej generacji 12050

Podczas zwarcia, prąd w obwodzie chronionym przekracza wartość prądu krytycznego co powoduje przejście nadprzewodnika ze stanu nadprzewodzącego do rezystywnego. Gwałtowny wzrost rezystancji ogranicznika ogranicza prąd zwarciovowy w zabezpieczanym obwodzie. Element nadprzewodnikowy włączony jest bezpośrednio do obwodu chronionego i jest bezpośrednio narażony na działanie prądu zwarciovowego, tym samym na uszkodzenie. Ryzyko to można zmniejszyć przez zastosowanie konwencjonalnych elementów bocznikujących element nadprzewodnikowy [1, 3, 47].

Zbudowano dwa modele nadprzewodnikowych ograniczników prądu typu rezystancyjnego. Jeden z ograniczników wykonano z metrowego odcinka taśmy nadprzewodnikowej pierwszej generacji HSW – firmy American Superconductor – o prądzie krytycznym $I_c = 118$ A (Rys. 4.1), drugi natomiast z metrowego odcinka taśmy drugiej generacji SF12050 – firmy SuperPower – o prądzie krytycznym $I_c = 270$ A.

Tab. 4.1 Parametry wykonanych modeli ograniczników typu rezystancyjnego

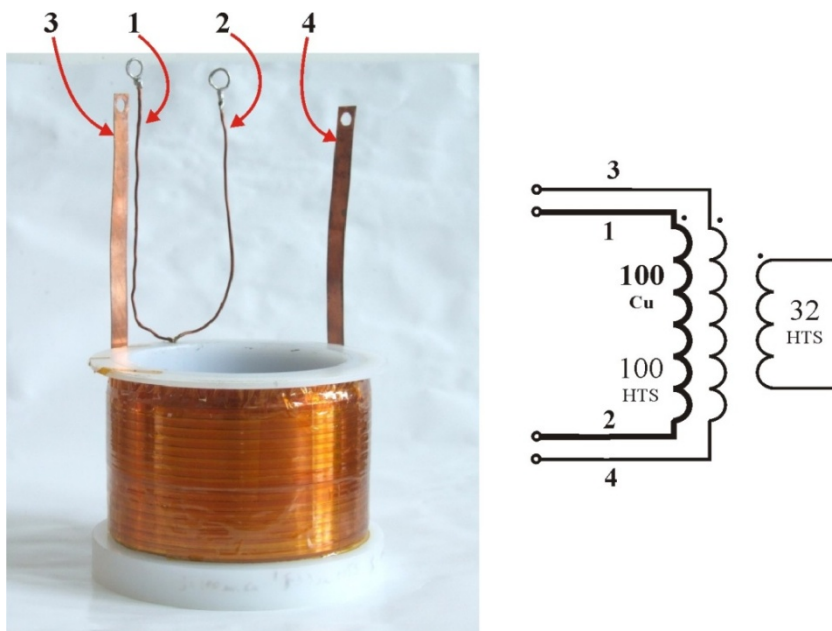
	1G HSW	2G SF12050
długość, m	1	1
I_c , A	118	270
L , μ H	1	1
R (@ 297 K)	33 m Ω	550 m Ω

4.2. SFCL typu indukcyjnego

Nadprzewodnikowe ograniczniki prądu typu indukcyjnego składają się z uzwojenia pierwotnego i wtórnego. Wspólną cechą wszystkich konstrukcji ograniczników indukcyjnych jest to, że niezależnie od rodzaju uzwojenia pierwotnego (włączonego szeregowo do obwodu zabezpieczanego), posiadają one zwarte uzwojenie wtórne wykonane z wysokotemperaturowego nadprzewodnika w postaci kształtki cylindrycznej lub z taśmy nadprzewodnikowej [13, 14, 16, 20, 23]. Taki typ konstrukcji zdeterminowany jest przez zasadę działania ogranicznika. W warunkach znamionowych przez uzwojenie pierwotne płynie prąd indukujący w nadprzewodnikowym uzwojeniu wtórnym prąd o wartości mniejszej niż prąd krytyczny. W takich warunkach uzwojenie wtórne jest w stanie nadprzewodzącym, a strumień magnetyczny wytwarzany przez prąd wtórny w całości równoważy strumień pochodzący od uzwojenia pierwotnego i ogranicznik wykazuje impedancję bliską zeru. Z chwilą wystąpienia zwarcia w obwodzie chronionym, prądy w uzwojeniu wtórnym i pierwotnym gwałtownie rosną. Po przekroczeniu wartości krytycznej we wtórnym uzwojeniu nadprzewodnikowym jego rezystancja gwałtownie rośnie. W rezultacie strumień magnetyczny pochodzący od uzwojenia wtórnego nie

kompensuje w pełni strumienia wywołanego przez prąd pierwotny, a zatem ogranicznik zachowuje się jak dławik, o dużej indukcyjności, ograniczając prąd zwarciowy.

W nadprzewodnikowych ogranicznikach prądu typu indukcyjnego można stosować rdzeń magnetyczny otwarty, zamknięty jak również mogą to być konstrukcje bezrdzeniowe. Można wyróżnić konstrukcje z uzwojeniem pierwotnym miedzianym jak i wykonanym z taśmy nadprzewodnikowej. Nadprzewodnikowe uzwojenie pierwotne w warunkach znamionowych ma praktycznie zerową rezystancję co sprawia, że ogranicznik nie generuje strat, jednak w przypadku zwarcia, prąd zwarciowy przepływa bezpośrednio przez element nadprzewodnikowy co zwiększa ryzyko jego uszkodzenia. Zaletą miedzianego uzwojenia pierwotnego jest to, że płynie przez nie cały prąd zwarciowy, jednak w warunkach znamionowych wprowadza ono straty związane z rezystancją miedzi.



Rys. 4.2 Nadprzewodnikowy ogranicznik prądu typu indukcyjnego wykonany z taśmy HTS pierwszej generacji, HSW (fotografia i schemat uzwojeń)

Zbudowano i przebadano dwa modele bezrdzeniowych, nadprzewodnikowych ograniczników prądu, typu indukcyjnego, których konstrukcje umożliwiają przeprowadzenie eksperymentów z kilkoma konfiguracjami połączeń uzwojeń.

Pierwszym z nich jest ogranicznik wykonany z taśmy pierwszej generacji High Strength Wire firmy American Superconductor. Bezpośrednio na plastikowym karkasie nawinięto cewkę miedzianą z izolowanego drutu o średnicy 1,5 mm o liczbie zwojów równej 100. Następnie nawinięto dwa uzwojenia nadprzewodnikowe (32 i 100 zwojów), z których pierwsze jest zwarte. Każdy zwój taśmy nadprzewodnikowej został odizolowany od reszty folią poliimidową (Rys. 4.4).

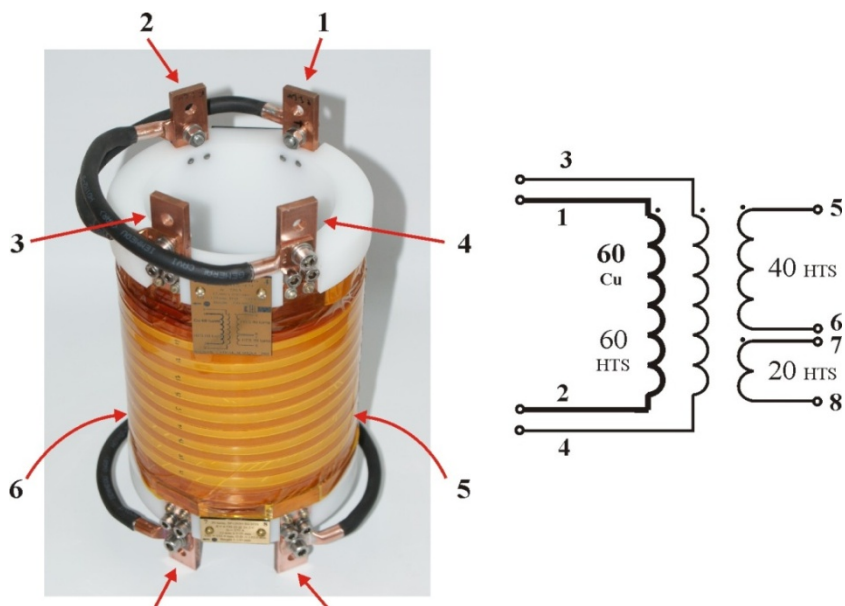
Fotografię opisanego ogranicznika i jego schemat pokazano na Rys. 4.2 natomiast wybrane parametry ogranicznika ujęto w tabeli Tab. 4.2.

Tab. 4.2 Parametry uzwojeń nadprzewodnikowego ogranicznika typu indukcyjnego wykonanego z taśmy 1G, AMSC High Strength Wire

	pierwotne uzwojenie Cu	zwarte, wtórne uzwojenie HTS	pierwotne uzwojenie HTS
	1 - 2		3 - 4
materiał	Cu	1G HSW	1G HSW
wysokość, mm	80	80	80
średnica wewnętrzna, mm	110	116,1	118
średnica zewnętrzna, mm	116	117,9	122,5
liczba zwojów	100	32	100
długość przewodu w uzwojeniu, m	35,8	11,76	37,77
I_c , A	-	118	118
L , μ H	910	116	1110
R (@ 297 K)	355 m Ω	411 m Ω	1,297 Ω
R (@ 77 K)	46,06 m Ω	0,3 $\mu\Omega$	1,34 $\mu\Omega$

Drugą konstrukcją nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu indukcyjnego jest model zbudowany w oparciu o taśmę drugiej generacji SF12050. Ogranicznik składa się z czterech nawiniętych na sobie uzwojeń. Bezpośrednio na karkasie wykonanym z Ertalonu nawinięto cewkę o 60 zwojach izolowanym drutem miedzianym o przekroju 4 mm x 2 mm. Następnie nawinięto trzy uzwojenia z taśmy SF12050 (kolejno: 60, 40 i 20 zwojów), w których każdy zwój został odizolowany od pozostałych taśmą kaptonową (folia poliimidowa).

Tak wykonany model pozwala na przebadanie wielu różnych konfiguracji zwojowych. Fotografię ogranicznika i schemat jego uzwojeń wraz z oznaczeniami zacisków pokazano Rys. 4.3, natomiast jego wybrane parametry zebrano w Tab. 4.3.



Rys. 4.3 Nadprzewodnikowy ogranicznik prądu typu indukcyjnego wykonany z taśmy drugiej generacji SF12050 (fotografia i schemat uzwojeń)

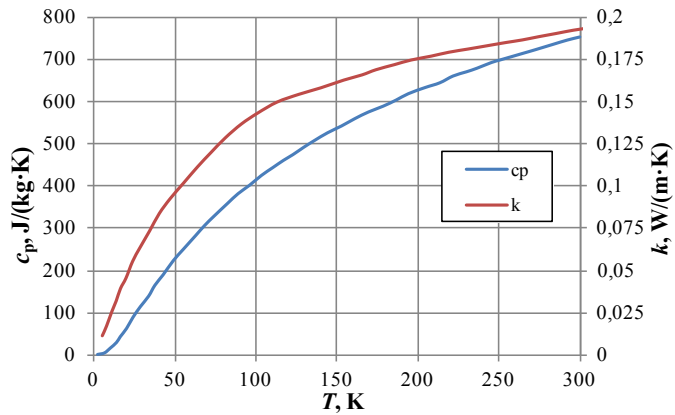
Tab. 4.3 Parametry uzwojeń nadprzewodnikowego ogranicznika typu indukcyjnego wykonanego z taśmy HTS 2G, SF12050

	pierwotne uzwojenie Cu	pierwotne uzwojenie HTS	uzwojenie HTS	uzwojenie HTS
	1 - 2	3 - 4	5 - 6	7 - 8
materiał	Cu	SF12050	SF12050	SF12050
wysokość, mm	130	130	130	130
średnica wewnętrzna, mm	120	129	131	132,4
średnica zewnętrzna, mm	128,8	130,8	132,2	133
liczba zwojów	60	60	40	20
I_c , A	-	270	270	270
L , μ H	286	284	137	33
R (@ 297 K)	53,4 m Ω	13,39 Ω	9,04 Ω	4,53 Ω
R (@ 77 K)	6,55 m Ω	12,7 $\mu\Omega$	11,9 $\mu\Omega$	10,4 $\mu\Omega$

a)



b)



Rys. 4.4 Folia poliimidowa:

a) rolka o szerokości 12 mm

b) parametry cieplne: ciepło właściwe i przewodność cieplna [6]

5. Modele numeryczne nadprzewodnikowych ograniczników prądu

5.1. Założenia do modeli numerycznych

W literaturze naukowej można spotkać wiele przykładów modelowania urządzeń nadprzewodnikowych pod kątem strat AC jak i rozkładu pól za pomocą polowo-obwodowych modeli numerycznych. Zwykle są to jednak publikacje dotyczące symulacji urządzeń pracujących w stałej temperaturze, najczęściej w temperaturze ciekłego azotu [46] oraz przy prądach poniżej wartości krytycznej. W przypadku modelowania nadprzewodnikowych ograniczników prądu w większości przypadków nie można założyć stałej temperatury, co znacznie komplikuje rozwiązanie problemu.

W momencie ograniczania prądu, nadprzewodnikowe elementy ogranicznika przechodzą ze stanu nadprzewodzącego do rezystywnego. Prąd przepływający przez rezystancję ogranicznika powoduje jego nagrzewanie w wyniku wydzielania ciepła Joule'a. Wzrost temperatury powoduje dalsze narastanie rezystancji, a tym samym wpływa na zmniejszenie wartości prądu w zabezpieczanym obwodzie [4].

Opracowano dwa typy modeli numerycznych nadprzewodnikowych ograniczników prądu: modele analityczne oraz modele polowo-obwodowe. W obydwu typach modeli numerycznych obliczenia wykonywane są krok po kroku. Chwilowa wartość prądu przepływającego przez rezystancję elementu nadprzewodnikowego (znaną z poprzedniego kroku obliczeniowego) pozwala obliczyć moc chwilową. Obliczona moc chwilowa, wydzielona w czasie trwania kroku obliczeniowego, powoduje przyrost temperatury elementu nadprzewodnikowego. Na podstawie nowej temperatury elementu i wartości chwilowej prądu płynącego przez ten element, obliczona zostaje nowa wartość rezystancji. Ta wartość rezystancji jest przekazywana do obliczeń wartości chwilowej prądu w kolejnym kroku obliczeniowym i proces powtarza się cyklicznie aż do zakończenia obliczeń. W modelach zastosowano pewne uproszczenia. Przyjęto, że:

- rozkład temperatury w elementach nadprzewodnikowych jest jednolity w całej ich objętości (nie ma przepływu ciepła wewnątrz elementu)
- nie ma wymiany ciepła pomiędzy elementami ogranicznika, np. pomiędzy uzwojeniami
- prąd krytyczny nie zależy od pola magnetycznego

Założenie braku wymiany ciepła pomiędzy uzwojeniami ogranicznika indukcyjnego wynika z jego konstrukcji. Każdy zwój jest odizolowany od pozostałych taśmą poliimidową, która jest dobrym izolatorem elektrycznym jak

i ciepłym (Rys. 4.4), ponadto uzwojenia są od siebie oddzielone warstwą tej taśmy.

Przeprowadzone zwarcia pomiarowe trwały 50 ms, zatem w tak krótkim czasie ilości ciepła przepływające między elementami ogranicznika są znikomo małe i można je zaniedbać. Zaniedbano także wymianę ciepła między ogranicznikiem typu indukcyjnego, a cieczą kriogeniczną ponieważ wewnętrzne uzwojenia nie mają bezpośredniego kontaktu z ciekłym azotem, natomiast uzwojenie zewnętrzne pokryte warstwą izolacyjnej folii poliimidowej. W rzeczywistości omówiona wymiana ciepła występuje, jednak jest ona tak niewielka, że można przyjąć iż proces nagrzewania uzwojeń przez prąd zwarciovowy, jest adiabatyczny.

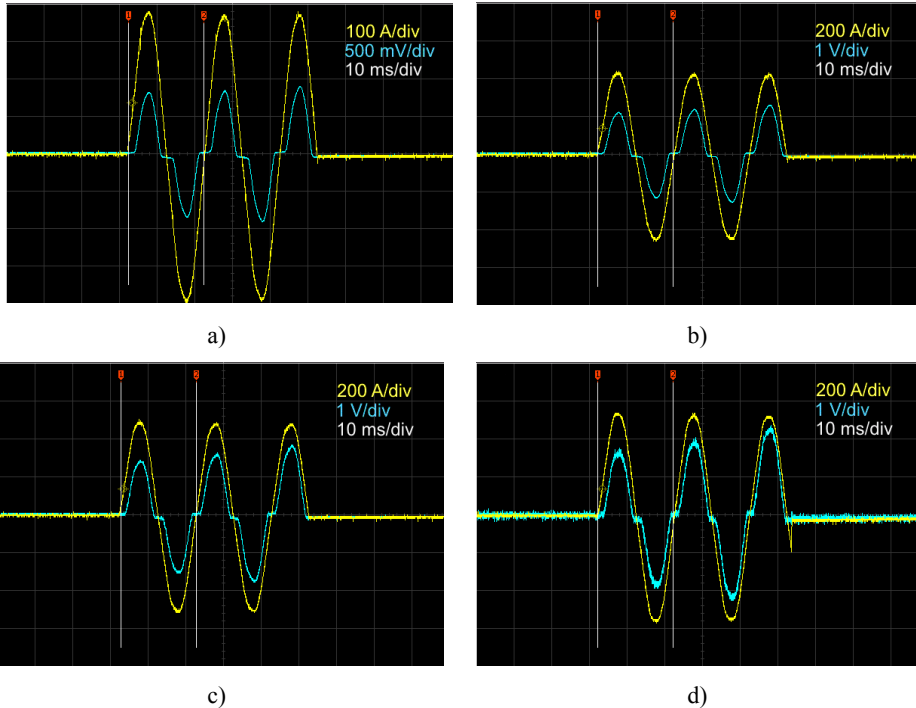
Największy wpływ na wartość prądu krytycznego taśm nadprzewodnikowych ma zewnętrzne pole magnetyczne skierowane prostopadle do powierzchni taśmy. W przypadku pola skierowanego równoległe, jego wpływ jest zanedbywalnie mały i można go pominąć (Rys. 3.6). Przyjęcie w modelu numerycznym braku wpływu pola magnetycznego na wartości krytyczne prądu ograniczników typu rezystancyjnego wynika z tego, że działają one w polu własnym. W przypadku ograniczników typu indukcyjnego uzwojenia znajdują się pod wpływem pola równoległego do powierzchni uzwojeń. Składowa prostopadła występuje jedynie na krawędziach uzwojeń i działa jedynie na skrajne zwoje. Ale jest na tyle mała, że nie powoduje znacznego spadku wartości prądu krytycznego na tych odcinkach taśmy.

5.2. Charakterystyki $R(i)$ taśm HTS 1G i 2G

Aby umożliwić modelowanie numeryczne nadprzewodnikowych ograniczników prądu konieczne było określenie jak zmienia się rezystancja taśmy nadprzewodnikowej w zależności od prądu i od temperatury. Charakterystykę $R(i)$ wyznaczono z przebiegów prądu i napięcia uzyskanych podczas badań eksperymentalnych ograniczników prądu typu rezystancyjnego.

Pomiary prądu zwarciovego realizowane były przez pomiar napięcia na boczniku o rezystancji $1\text{ m}\Omega$ włączonym szeregowo do obwodu, natomiast napięcie na ograniczniku mierzone było na wyprowadzeniach napięciowych przyłutowanych do taśmy w odległości 1 metra od siebie.

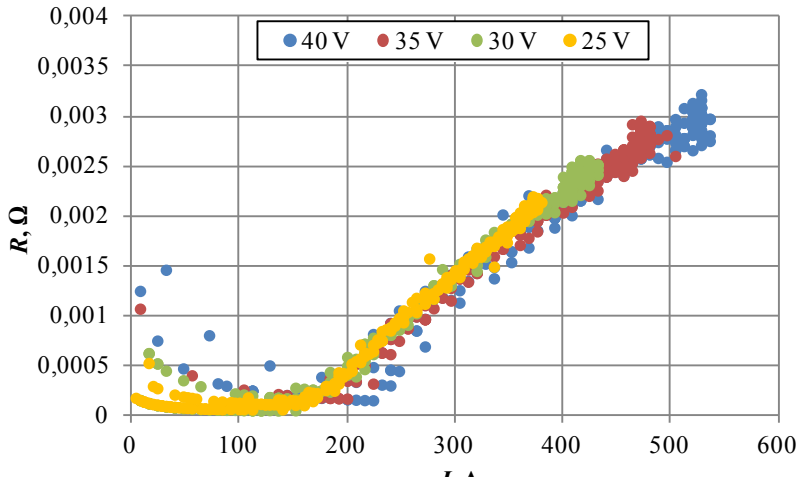
Zbudowane ograniczniki rezystancyjne przebadano dla kilku różnych napięć źródła zasilania U_s . Oscylogramy uzyskane podczas badań eksperymentalnych ogranicznika wykonanego z taśmy 1G HSW zestawiono na Rys. 5.1.



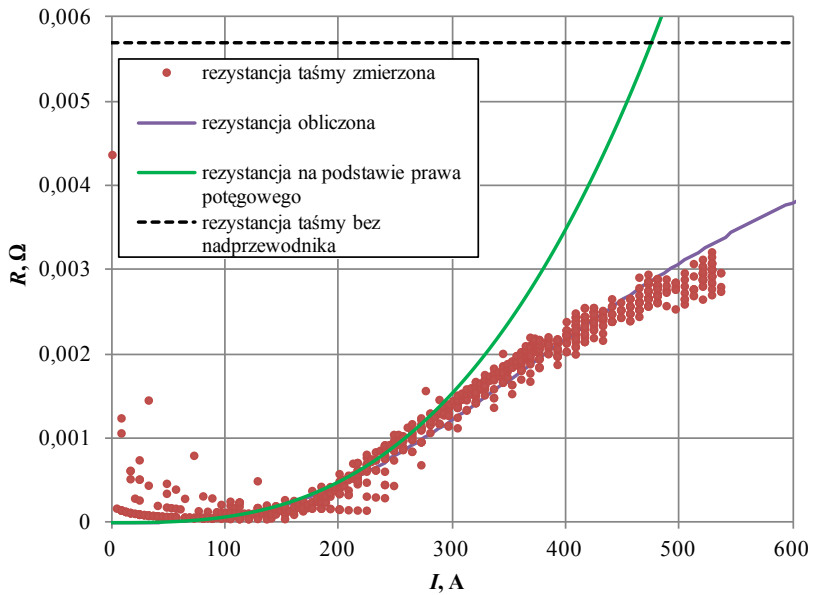
Rys. 5.1 Przebiegi prądu zwarciovego (linia żółta) oraz napięcia (linia niebieska) na ograniczniku rezystancyjnym z taśmy HTS 1G dla różnych napięć U_s : a) $U_s = 25$ V, b) $U_s = 30$ V, c) $U_s = 35$ V, d) $U_s = 40$ V

Celem pomiarów było uzyskanie zależności $R(i)$ jednego metra taśmy dla temperatury $T = 77$ K, dlatego wykorzystano do tego celu przebiegi napięć i prądów z pierwszych 5 ms zwarcia, ponieważ w tak krótkim okresie taśma nagrzewa się bardzo nieznacznie. Zestawienie wykonanych charakterystyk $R(i)$ pokazano na Rys. 5.2. Przebiegi te wykazują bardzo zbliżony kształt i niemal pokrywają się ze sobą, zatem założenie o temperaturze $T = 77$ K jest dobrym przybliżeniem, ponieważ w przypadku nagrzewania się taśmy, jej rezystancja rosłaby i na przykład kształt charakterystyki wykonanej dla $U_s = 40$ V odbiegałby od przebiegu dla $U_s = 25$ V.

Duże wartości rezystancji występujące na początku charakterystyki (dla małych wartości prądu) są wynikiem błędów dyskretyzacji bardzo małych sygnałów w oscyloskopie i powstały w wyniku dzielenia małych (zamiast zerowych) wartości napięcia przez prąd.



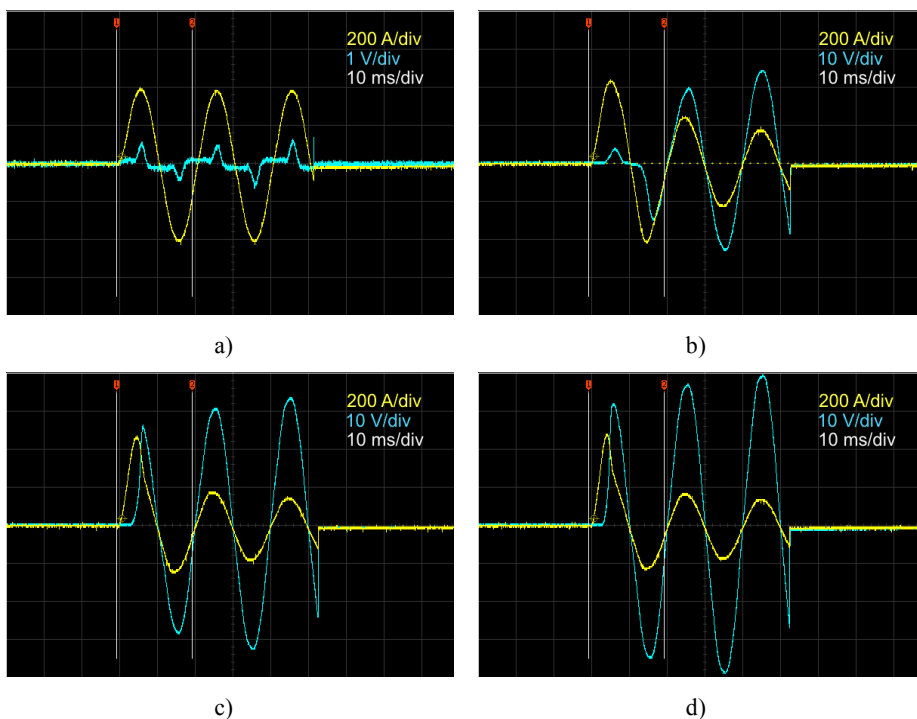
Rys. 5.2 Zależność rezystancji taśmy HSW od prądu dla pierwszego narastającego zbocza prądu oraz dla czterech napięć U_s wynoszących: 25 V, 30 V, 35 V i 40 V



Rys. 5.3 Zależność rezystancji taśmy HSW od prądu w temperaturze 77 K

Do charakterystyki eksperymentalnej dopasowano krzywą $R(i)$ wynikającą z równoległego połączenia rezystancji obszarów bocznikujących nadprzewodnik (rezystancja taśmy bez nadprzewodnika) w taśmie i rezystancji nadprzewodnika opisanej prawem potęgowym (wzór 2.3). Najlepsze dopasowanie uzyskano dla wykładnika prawa potęgowego $n = 3,85$ (Rys. 5.3).

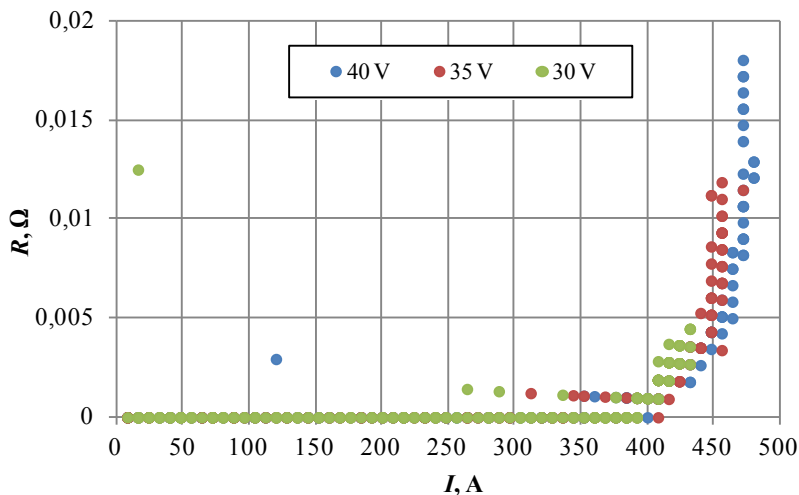
Kolejnym etapem było wyznaczenie charakterystyki $R(i)$ dla taśmy drugiej generacji. W tym celu przebadano ogranicznik typu rezystancyjnego wykonany z taśmy HTS 2G - SF12050. Próby zwarciove przeprowadzono dla takich samych wartości napięć jak w przypadku ogranicznika wykonanego z taśmy HTS 1G.



Rys. 5.4 Przebiegi prądu zwarciovego (linia żółta) oraz napięcia (linia niebieska) na ograniczniku rezystancyjnym z taśmy HTS 2G dla różnych napięć U_s : a) $U_s = 25$ V, b) $U_s = 30$ V, c) $U_s = 35$ V, d) $U_s = 40$ V

W tym przypadku także wykorzystano zależność rezystancji taśmy SF12050 od prądu, wyznaczoną na podstawie pierwszego narastającego zbocza prądu zwarciovego dla każdego z przebadanych przypadków. Pominięto jedynie przypadek gdzie $U_s = 25$ V, ponieważ zarejestrowano sygnał napięciowy

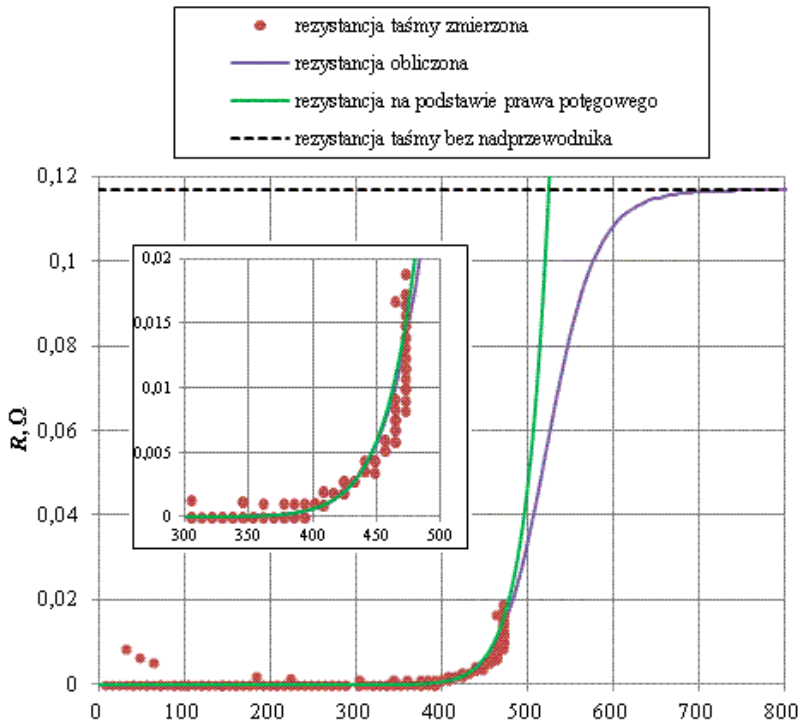
o niewielkiej amplitudzie, zawierający szумы, które wprowadzają duże błędy podczas dzielenia U/I . Uzyskane charakterystyki $R(i)$ mają bardzo zbliżone przebiegi (Rys. 5.5), różnią się jedynie zakresem co jest spowodowane mniejszymi wartościami prądów zwarciovych uzyskanych dla mniejszych napięć źródła zasilania. Widoczne na Rys. 5.5 znaczne wartości rezystancji dla małych prądów są rezultatem dzielenia małych (zamiast zerowych) wartości napięcia przez prąd.



Rys. 5.5 Zależność rezystancji taśmy SF12050 od prądu dla pierwszego narastającego zbocza prądu oraz dla trzech napięć U_s wynoszących: 30 V, 35 V i 40 V

Do charakterystyki eksperymentalnej dopasowano krzywą $R(i)$ wynikającą z równoległego połączenia rezystancji obszarów bocznikujących nadprzewodnik (rezystancja taśmy bez nadprzewodnika) w taśmie i rezystancji nadprzewodnika opisaną prawem potęgowym (wzór 2.3). Najlepsze dopasowanie uzyskano dla wykładnika prawa potęgowego $n = 20$.

Oprócz wyznaczenia charakterystyk $R(i)$ obliczono także pole powierzchni całkowitej metrowych odcinków taśm nadprzewodnikowych, które jest konieczne przy uwzględnieniu warunków chłodzenia ogranicznika w modelach numerycznych (Tab. 5.1).



Rys. 5.6 Zależność rezystancji taśmy SF12050 od prądu w temperaturze 77 K

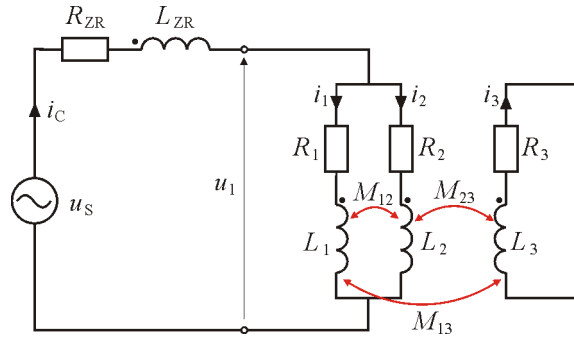
Tab. 5.1 Parametry taśm HTS 1G i 2G wykorzystane w modelach numerycznych nadprzewodnikowych ograniczników prądu

	taśma HTS 1G HSW	taśma HTS 2G SF12050
n	3,8	20
powierzchnia chłodzona, m^2 (/1 mb)	0,0086	0,015
rezystancja taśmy bez nadprzewodnika (@ 77 K), Ω	0,0057	0,117

5.3. Uniwersalny analityczny model numeryczny

W związku z tym, że badano różne konfiguracje zwojowe nadprzewodnikowych ograniczników prądu, opracowany został uniwersalny analityczny model numeryczny, który pozwala, poprzez odpowiedni dobór parametrów modelu, na analizę każdego ogranicznika zarówno typu rezystancyjnego jak i typu indukcyjnego, który został opisany w pracy. Ogólny

schemat obwodowy nadprzewodnikowego ogranicznika prądu z trzema uzwojeniami sprzężonymi magnetycznie ze sobą przedstawiono na Rys. 5.7.



Rys. 5.7 Schemat obwodowy nadprzewodnikowego ogranicznika prądu z trzema uzwojeniami

Wielkości R_{zr} , L_{zr} , u_s i u_1 oznaczają odpowiednio: rezystancję wewnętrzną, indukcyjność własną i napięcie źródła zasilania oraz napięcie na ograniczniku. Natomiast R_1 , R_2 , R_3 oraz L_1 , L_2 , L_3 oznaczają rezystancje i indukcyjności uzwojeń ogranicznika. Indukcyjności własne pomiędzy uzwojeniami oznaczono jako: M_{12} , M_{13} oraz M_{23} . Mamy zatem trzy gałęzie sprzężone ze sobą magnetycznie. Drugie prawo Kirchhoffa dla uzwojenia bocznikowanego ma więc postać [2]:

$$u_1 = i_1 R_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M_{12} \frac{di_2}{dt} + M_{13} \frac{di_3}{dt} \quad (6.1)$$

dla uzwojenia bocznikowanego:

$$u_1 = i_2 R_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M_{12} \frac{di_1}{dt} + M_{23} \frac{di_3}{dt} \quad (6.2)$$

natomiast dla uzwojenia wtórnego:

$$u_3 = i_3 R_3 + L_3 \frac{di_3}{dt} + M_{13} \frac{di_1}{dt} + M_{23} \frac{di_2}{dt} \quad (6.3)$$

Biorąc pod uwagę, że uzwojenie wtórne jest zwarte, napięcie u_3 jest równe zero i równanie (6.3) przyjmie postać:

$$0 = i_3 R_3 + L_3 \frac{di_3}{dt} + M_{13} \frac{di_1}{dt} + M_{23} \frac{di_2}{dt} \quad (6.4)$$

Ponadto:

$$u_1 = u_s - i_c R_{zr} - L_{zr} \frac{di_c}{dt} \quad (6.5)$$

gdzie:

$$i_c = i_1 + i_2 \quad (6.6)$$

natomiast napięcie:

$$u_s = \sqrt{2}U_s \sin(\omega t + \Psi) \quad (6.7)$$

gdzie: U_s – wartość skuteczna napięcia zasilania, $\omega = 2\pi f$ (f – częstotliwość), natomiast Ψ – faza początkowa.

Zależności (6.1), (6.2), (6.4) i (6.5) tworzą układ czterech równań różniczkowych. Różniczki di oznaczają nieskończenie małe przyrosty wartości chwilowych prądu. Z punktu widzenia zastosowania zaprezentowanych równań do symulacji numerycznej, która jest wykonywana metodą „krok po kroku”, różniczki te można zastąpić skończonymi przyrostami:

$$\begin{cases} di_c \equiv \Delta i_c = i_c - i_{cc} \\ di_1 \equiv \Delta i_1 = i_1 - i_{11} \\ di_2 \equiv \Delta i_2 = i_2 - i_{22} \\ di_3 \equiv \Delta i_3 = i_3 - i_{33} \end{cases} \quad (6.8)$$

gdzie i_c , i_1 , i_2 , i_3 oznaczają wartości chwilowe prądu z danego kroku obliczeniowego, natomiast za: i_{cc} , i_{11} , i_{22} , i_{33} przyjęto wartości chwilowe prądów z poprzedniego kroku obliczeniowego. Analogicznie za różniczkę dt podstawiamy wartość kroku czasowego Δt .

$$dt \equiv \Delta t \quad (6.9)$$

Uwzględniając zależności (6.8) i (6.9) we wzorach (6.1), (6.2), (6.4) i (6.5) otrzymujemy układ równań:

$$\begin{cases} u_1 = i_1 R_1 + L_1 \frac{i_1 - i_{11}}{\Delta t} + M_{12} \frac{i_2 - i_{22}}{\Delta t} + M_{13} \frac{i_3 - i_{33}}{\Delta t} \\ u_1 = i_2 R_2 + L_2 \frac{i_2 - i_{22}}{\Delta t} + M_{12} \frac{i_1 - i_{11}}{\Delta t} + M_{23} \frac{i_3 - i_{33}}{\Delta t} \\ 0 = i_3 R_3 + L_3 \frac{i_3 - i_{33}}{\Delta t} + M_{13} \frac{i_1 - i_{11}}{\Delta t} + M_{23} \frac{i_2 - i_{22}}{\Delta t} \\ u_1 = u_s - i_c R_{zr} - L_{zr} \frac{i_c - i_{cc}}{\Delta t} \end{cases} \quad (6.10)$$

Rozwiązanie tego układu równań pozwala na obliczenie wartości chwilowej napięcia na ograniczniku u_1 , oraz wartości chwilowych prądów i_1 , i_2 oraz i_3 , na podstawie wartości prądów policzonych w kroku poprzednim: i_{11} , i_{22} oraz i_{33} . Proces rozwiązywania układu (6.10) jest żmudny, a same wyniki rozwiązania, obszerne dlatego zostały umieszczone w Dodatku A.

Zaprezentowany model bardzo dobrze nadaje się do symulowania takich konstrukcji ograniczników jak pokazano na: Rys. 4.1, Rys. 4.2 i Rys. 4.3 gdzie uzwojenia nawinięte są jedno na drugim, ponieważ uwzględnia sprzężenia magnetyczne między nimi. W przypadku podstawienia wartości zero za M_{12} i M_{13} , otrzymujemy model układu z zewnętrznym obwodem bocznikującym, nie

sprężonym z uzwojeniami ogranicznika. Z kolei zastosowanie wszystkich zerowych indukcyjności wzajemnych, oraz podstawienie za R_1, R_3, L_1, L_3 dużych wartości rzędu 10^{15} powoduje, że otrzymujemy model do symulowania ograniczników typu rezystancyjnego.

Aby jednak model nadprzewodnikowego ogranicznika prądu działał prawidłowo, należy uwzględnić zależność rezystancji elementów nadprzewodnikowych od wartości przepływającego przez niego prądu. Modelowane ograniczniki zbudowane są z taśm nadprzewodnikowych. Nadprzewodnik jest tylko jednym z elementów składowych taśmy więc jej rezystancję wypadkową (R_{tasmy}) można policzyć z połączenia równoległego rezystancji nadprzewodnika R_N i materiału bocznikującego R_B :

$$R_{\text{tasmy}} = \left(\frac{1}{R_N} + \frac{1}{R_B} \right)^{-1} \quad (6.11)$$

Rezystancja R_B zależy od temperatury, a kształt krzywej $R_B(T)$ uzależniony jest od materiału bocznikującego nadprzewodnik. Natomiast rezystancja R_N zależy od temperatury oraz od prądu i jest wyrażona w postaci zależności uzyskanej na podstawie prawa potęgowego (2.3):

$$R_N = \frac{U_c}{i_c(T)} \left| \frac{i_c}{I_c(T)} \right|^{n-1} + R_0 \quad (6.12)$$

Wartości wykładników n dla taśm HSW i SF12050 wyznaczone zostały w badaniach eksperymentalnych i wynoszą odpowiednio: 3,8 i 20 (Tab. 5.1). Rezystancja R_{tasmy} (czyli: R_N i R_B) liczona jest na podstawie wartości chwilowej prądu z danego kroku obliczeniowego (i_c) oraz na podstawie temperatury z kroku poprzedniego (T). Zależność R_N od temperatury nie jest bezpośrednia. Rezystancja nadprzewodnika zależy od wartości prądu krytycznego I_c , która liniowo zmienia się wraz z temperaturą (wzór 3.3). Obliczanie rezystancji ze wzoru 6.11 ma istotną zaletę, ponieważ korzystając z połączenia równoległego eliminuje się błąd prawa potęgowego polegający na tym, że wraz ze wzrostem prądu, rezystancja dąży do nieskończoności. W zastosowanej postaci wzoru rezystancja gładko przechodzi od wartości zerowej (prawie zerowej) do wartości odpowiadającej rezystancji bocznika.

Do obliczenia temperatury wykorzystano zależność 3.11, która po uwzględnieniu nomenklatury kroków obliczeniowych przyjmie postać:

$$T = \frac{R_{\text{tasmy}} i_c^2 - s \Phi (\Delta T_{\text{ch}})}{m c_p^{\text{SF}}(T)} \Delta t + T_- \quad (6.13)$$

W wzorze (6.13) uwzględniono temperaturową zmienność średniego ciepła właściwego (c_p^{SF}) ogranicznika (Rys. 3.10), a także strumień ciepła (Φ) oddawany do ciekłego azotu z powierzchni taśmy (s) zgodnie z (Rys. 3.11).

5.4. Hybrydowy model numeryczny nadprzewodnikowego ogranicznika prądu

Numeryczny model polowo-obwodowy w przeciwieństwie do analitycznego pozwala na wygodne symulowanie indukcyjnych ograniczników prądu, ponieważ wszelkie rozplywy strumienia magnetycznego i sprzężenia uzwojeń wpływające na wypadkową, zmieniającą się indukcyjność ogranicznika, są obliczane w części polowej metodą elementów skończonych. Ponieważ w modelu polowo-obwodowym uwzględniana jest geometria ogranicznika, to dla każdego ogranicznika opisanego w pracy utworzony został oddzielny hybrydowy model numeryczny.

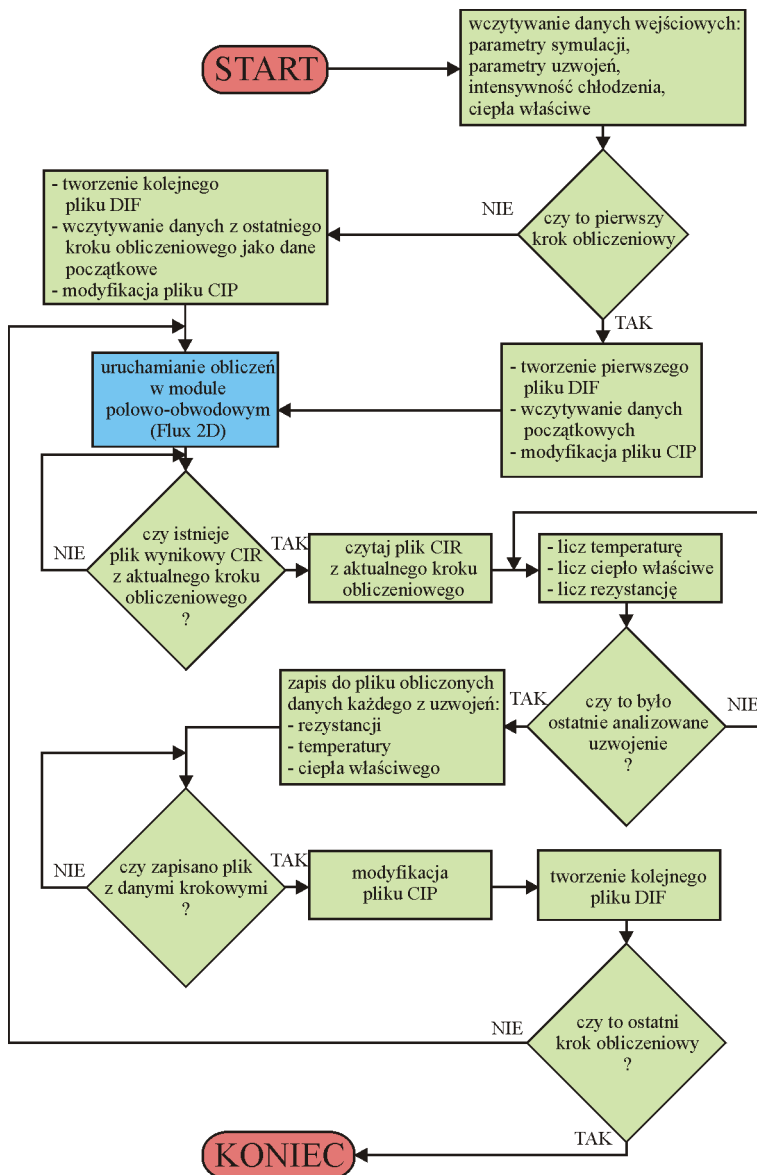
5.4.1. Schemat blokowy hybrydowego modelu numerycznego

Do modelowania ograniczników zastosowano moduł magnetyczno-przejściowy (TM¹⁰) programu Flux2D sprzężony z obwodem zewnętrznym. Moduł ten nie posiada sprzężenia z modułem cieplnym dlatego w języku C++ napisano zewnętrzny program zarządzający, pozwalający na obliczanie temperatury i rezystancji ograniczników, współpracujący z pakietem Flux2D.

Przed napisaniem programu zarządzającego, autor przeanalizował pracę modułu TM Flux2D i jego współpracę z różnymi plikami pomocniczymi tworzonymi w trakcie obliczeń i plikami tworzonymi na początku cyklu obliczeniowego. Autor przeanalizował w jaki sposób można poprzez, wprowadzone z zewnątrz, zmiany w tych plikach ingerować w proces obliczeniowy modułu TM. Architektura plików pomocniczych, zakres i format przechowywanych w nich danych nie jest opisana w dokumentacji programu Flux2D, ani nie jest dostępna inną drogą. Rozszyfrowanie przez autora tej architektury plików pomocniczych i formatu przechowywanych danych pozwoliło na napisanie programu zarządzającego, sterującego obliczeniami w module TM.

Wprawdzie większość obliczeń w hybrydowym modelu numerycznym dokonywanych jest w pakiecie Flux2D, jednak modułem nadrzędnym w modelu hybrydowym jest zewnętrzny program napisany przez autora, który steruje obliczeniami elektromagnetycznymi polowo-obwodowymi w pakiecie Flux2D i w którym autor umieścił moduł termiczny. Obliczenia wykonywane są metodą „krok po kroku” gdzie na podstawie wartości prądu chwilowego i temperatury obliczana jest rezystancja, którą program przekazuje do modułu TM. W module tym wyliczane są prądy i napięcia które z kolei korespondują z modułem termicznym przekazując obliczone wartości prądu na podstawie których moduł termiczny oblicza moc i przyrost temperatury. Sytuacja taka powtarza się cyklicznie, aż do zakończenia obliczeń (ustalona liczba kroków czasowych).

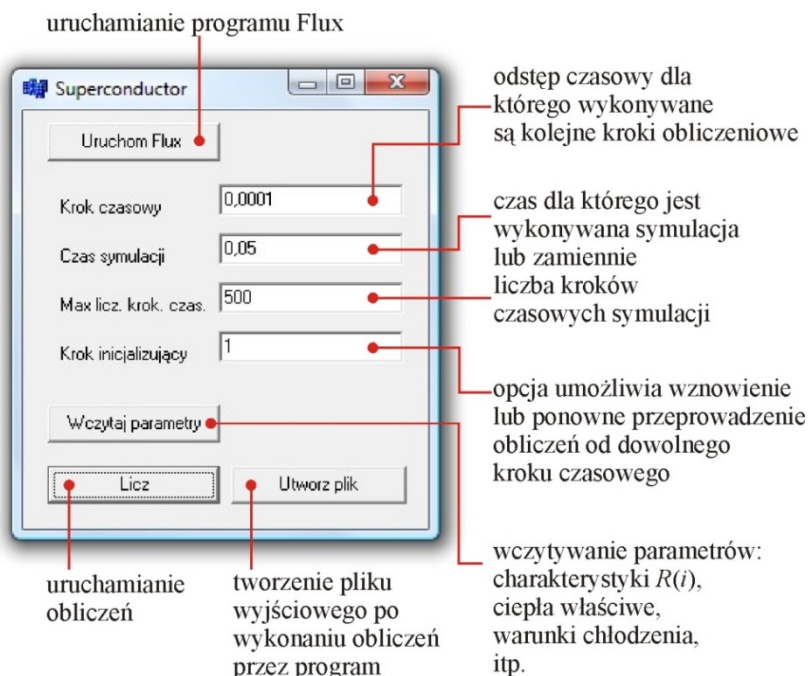
¹⁰ TM – ang. *Transient Magnetic*



Rys. 5.8 Schemat blokowy opracowanego programu zarządzającego

Na Rys. 5.8 umieszczono schemat blokowy opracowanej aplikacji, na którym przedstawiono wszystkie, niezbędne do poprawnego działania, wykonywane przez niego procesy. Oprócz funkcji obliczeniowych oraz odczytujących i zapisujących dane, na schemacie pokazano także funkcje sprawdzające czy

dany plik wynikowy istnieje. Funkcje te są niezbędne do zapewnienia poprawności sprzężenia modułu cieplnego z modułem TM. Mimo zapewnienia możliwości współdziałania programu opracowanego przez autora z programem Flux2D są to nadal dwie niezależne, równoległe działające aplikacje. Każdy z modułów tworzy swoje własne pliki wynikowe. Z tego powodu autor zapewnił zabezpieczenie przed sytuacjami w których np. w wyniku przeciążenia komputera program uruchomi procedury obliczeniowe na podstawie danych z pliku, który jeszcze nie został utworzony przez moduł z nim sprzężony.



Rys. 5.9 Okno programu wraz z opisem funkcji

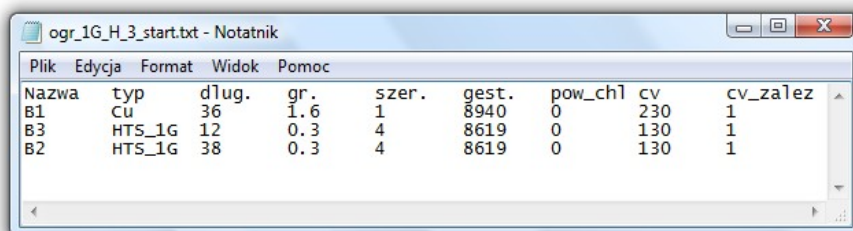
Do napisania programu zarządzającego wykorzystano darmową aplikację C++ Builder 6 w wersji Personal. Na Rys. 5.9 zaprezentowano okno dialogowe wykonanej aplikacji. Charakteryzuje się ono prostą, przejrzystą budową, zawierającą niezbędne elementy. Cztery pola tekstowe służą do określania parametrów symulacji. **Krok czasowy**, jak sama nazwa wskazuje, określa interwał czasowy (w sekundach) używany do obliczania wartości chwilowych, parametrów ogranicznika w kolejnych krokach obliczeniowych. Pola **Czas symulacji** i **Max. licz. krok. czas.** służą do określania długości symulowanych przebiegów prądu, temperatury, itp. Z pól tych można korzystać zamiennie, a program bierze pod uwagę krótszy czas. W przypadku wpisania wartości,

odpowiednio: 0,05 s i 400 przy kroku czasowym równym 0,0001 s, będą obliczone przebiegi trwające 0,04 s. Natomiast pole o nazwie **Krok inicjalizujący** umożliwia wznowienie lub ponowne przeprowadzenie symulacji od dowolnego kroku obliczeniowego.

Przed przystąpieniem do wykonania obliczeń należy uruchomić program Flux. Można to zrobić z poziomu systemu operacyjnego lub za pomocą przycisku **Uruchom Flux**. Przycisk **Wczytaj parametry** pobiera z pliku tekstowego (utworzonego przez użytkownika) dane wszystkich analizowanych uzwojeń ogranicznika (Rys. 5.10). Kolejno są to:

- nazwa - przyporządkowana przez użytkownika podczas tworzenia schematu elektrycznego obwodu zewnętrznego w module obwodowym, używana przez wewnętrzne procedury obliczeniowe programu Flux2D
- typ – określa z czego wykonane jest uzwojenie, parametr wykorzystywany przez moduł cieplny opracowany przez autora (podobnie jak kolejne parametry), dostępne opcje to miedź, taśma nadprzewodnikowa HSW oraz taśma nadprzewodnikowa SF12050
- dług. – długość uzwojenia w metrach
- gr. i szer. – grubość i szerokość przewodów (taśm nadprzewodnikowych) wykorzystanych do budowy określonego uzwojenia podawana w milimetrach
- gest. – średnia gęstość uzwojeń w $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
- pow_chl – powierzchnia styku uzwojenia z ciekłym azotem podana w m^2
- cv – średnia wartość ciepła właściwego uzwojenia w jednostkach $\frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$
- cv_zalez – zmienna logiczna, określa czy w obliczeniach program ma przyjąć stałą, podaną przez użytkownika wartość średniego ciepła właściwego uzwojenia (wartość 0), czy skorzystać z charakterystyki określającej zależność ciepła właściwego od temperatury (wartość 1)

Nazwa pliku z danymi ogranicznika musi mieć postać: „nazwaprojektu_start.txt”. W prezentowanym pliku nazwaprojektu = „ogr_1G_H_3”.



Nazwa	typ	dług.	gr.	szer.	gest.	pow_chl	cv	cv_zalez
B1	Cu	36	1.6	1	8940	0	230	1
B3	HTS_1G	12	0.3	4	8619	0	130	1
B2	HTS_1G	38	0.3	4	8619	0	130	1

Rys. 5.10 Plik z danymi uzwojeń ogranicznika

Zależności ciepła właściwego od temperatury, dla miedzi, taśmy HSW i taśmy SF12050 wczytywane są z plików tekstowych o nazwach odpowiednio: cv_Cu.TXT (Rys. 5.11 b)), cv_HTS_1G.TXT i cv_HTS_2G.TXT. Podobnie jak charakterystyka chłodzenia z pliku chlodzenie.TXT (Rys. 5.11 a)), w których pierwsza kolumna zawiera wartości temperatury (T) lub przyrost temperatury (deltaT) natomiast druga kolumna zawiera wartości ciepła właściwego dla określonej temperatury (cv) lub wartość ciepła oddawanego do ciekłego azotu (str.ciep).

deltaT	str.ciep
0	0
0.1	100
2	2650
2.5	3800
2.85	4800
3	5390
3.19	6000
3.66	7800
4	9500
5.5	20000
6	26000
7	39000
8	55000
8.5	66000
9	78000
10	110000
13	168000
17	105000
18	87000
20	58000
23	30000
24.5	20000
27	10000
30	6000
40	5200
50	6000
60	7500
70	9200
80	10700
100	14500
170	28000
273	52000

a)

T	cv
77	195.839
80	204.775
83	213.217
86	221.198
89	228.749
92	235.898
95	242.671
98	249.095
101	255.191
104	260.981
107	266.486
110	271.722
113	276.708
116	281.459
119	285.989
122	290.312
125	294.440
128	298.365
131	302.185
134	305.905
137	309.525
140	313.045
143	316.565
146	320.085
149	323.605
152	327.125
155	330.645
158	334.165
161	337.685
164	341.205
167	344.725
170	348.245
173	351.765
176	355.285
179	358.805
182	362.325
185	365.845
188	369.365
191	372.885
194	376.405
197	379.925
200	383.445
203	386.965
206	390.485
209	394.005
212	397.525
215	401.045
218	404.565
221	408.085
224	411.605
227	415.125
230	418.645
233	422.165
236	425.685
239	429.205
242	432.725
245	436.245
248	439.765
251	443.285
254	446.805
257	450.325
260	453.845
263	457.365
266	460.885
269	464.405
272	467.925
275	471.445
278	474.965
281	478.485
284	482.005
287	485.525
290	489.045
293	492.565
296	496.085
299	499.605
300	385.126

b)

Rys. 5.11 Pliki z: a) charakterystyką chłodzenia, b) zależnością ciepła właściwego od temperatury dla miedzi

Zaletą wczytywania charakterystyk temperaturowych z plików jest możliwość umieszczenia w nich przebiegów o skomplikowanym kształcie, które

nie zawsze dadzą się poprawnie wyrazić w postaci matematycznego wzoru, gdzie przykładem jest intensywność chłodzenia ciekłym azotem (Rys. 3.11).

Głównym przyciskiem funkcyjnym programu jest przycisk **Licz**. Kliknięcie go rozpoczyna cały skomplikowany proces symulacji w którym oprócz obliczeń odbywa się także przekazywanie obliczonych danych między poszczególnymi modułami. Moduł magnetyczny-przejęciowy™ programu Flux2D przed przeprowadzeniem obliczeń korzysta z plików *.CIP oraz *.DIF (gdzie gwiazdka oznacza nazwę projektu).

The screenshot shows a text-based interface for a Flux2D CIP file. The window title is 'OGR_IG_H_3.CIP - Notatnik'. The content includes a header with 'File created by FLUX' and '10.30'. It lists various parameters such as 'Number of components types', 'Number of meshes', and 'Number of components'. A table of component values follows, with columns for component ID, values, and units. Three components are circled in red and labeled B1, B2, and B3. Below this is a table for 'Description of meshes' and another for 'Description of components'. At the bottom, a 'Connection between component - edge' table lists connections for components V1, R1-R5, L1, B1-B3. Red lines connect the labels B1, B2, B3 to their respective rows in the component values table. Another red line connects R1 to its row. A final red line connects the labels B1, B2, B3 to the 'Connection between component - edge' table.

Component	Value 1	Value 2	Value 3	Value 4	Unit
V1	1.000000	2.000000	5.000000	1.000000	
R1	36.56854	314.0000	0.000000		
R2	1.000000	2.000000	2.000000	0.000000	
R3	0.120000				
R4	3.000000	1.000000	1.000000	0.100000E-14	
R5	1.000000	5.000000	1.000000	0.100000E+16	
L1	2.000000	1.000000	1.000000	0.100000E-14	
B1	1.000000	2.000000	1.000000	0.000000	
B2	1.000000	1.000000	1.000000	4.45E-02	
B3	2.000000	1.000000	1.000000	9.98E-04	
	1.000000	1.000000	1.000000	8.64E-05	

Connection between component - edge

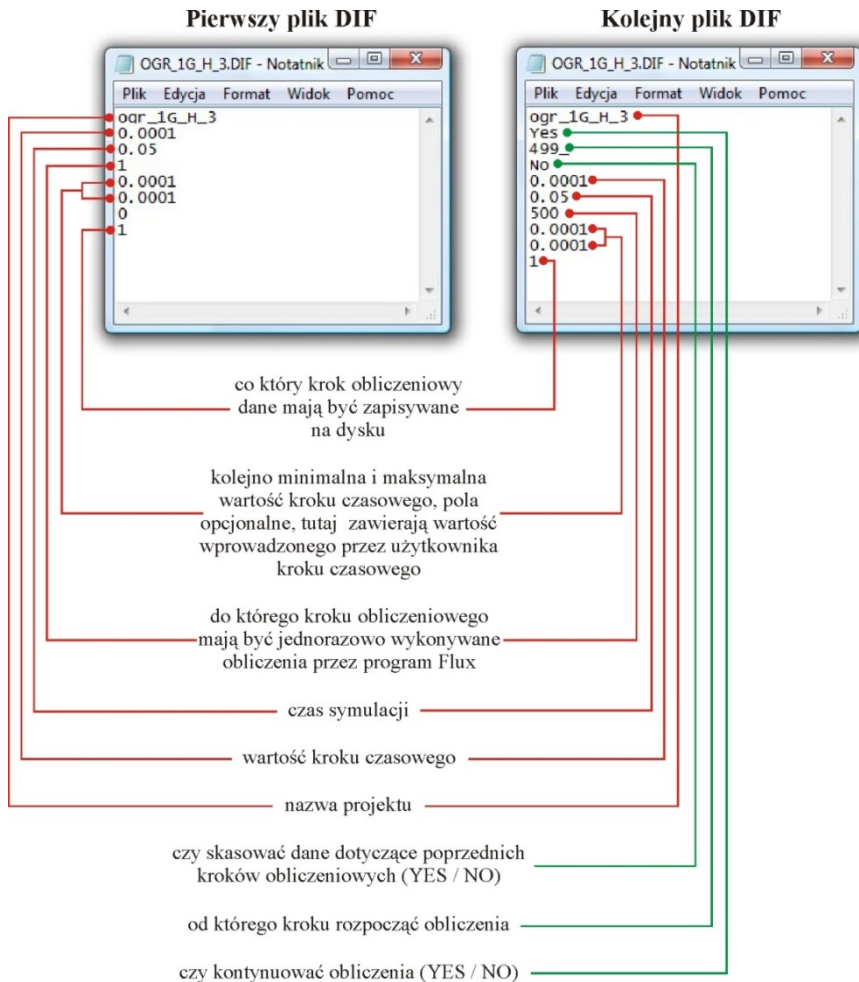
Component	Edge 1	Edge 2
V1	1	6
R1	2	1
R2	3	2
R3	4	3
R4	5	4
R5	6	5
L1	7	6
B1	8	7
B2	9	8
B3	9	9

Rys. 5.12 Zawartość pliku CIP

W pliku CIP (Rys. 5.12) znajdują się parametry elementów modelowanego obwodu elektrycznego, takie jak: rezystancja, indukcyjność, napięcie, a także punkty obwodu o jednakowym potencjale. Ponadto na końcu pliku umieszczony

jest spis nazw elementów obwodu, wraz z odpowiadającymi im numerami dzięki którym program rozpoznaje dany element podczas obliczeń. Wśród tego spisu znajdują się nazwy analizowanych elementów ogranicznika (Rys. 5.10).

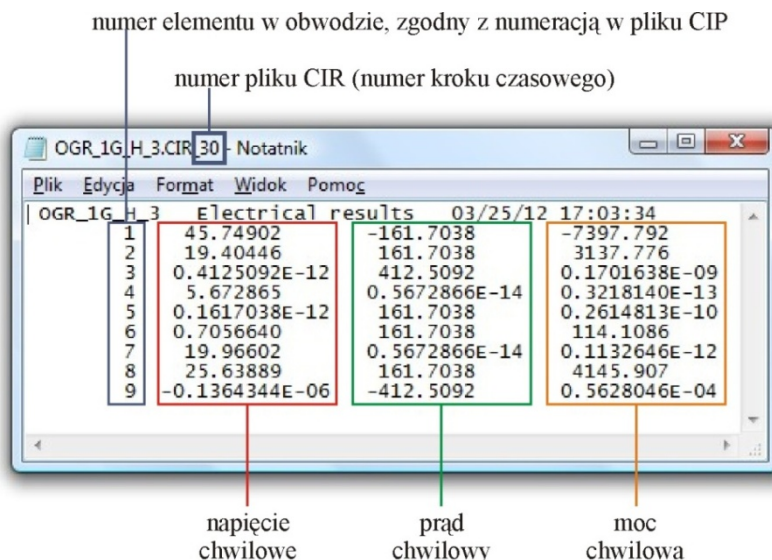
Plik DIF natomiast zawiera informacje dotyczące symulacji takie jak: krok czasowy, czas symulacji, liczba kroków obliczeniowych oraz inicjalizujący krok obliczeniowy. Wartości te są przekazywane do pliku z głównego okna programu (Rys. 5.9).



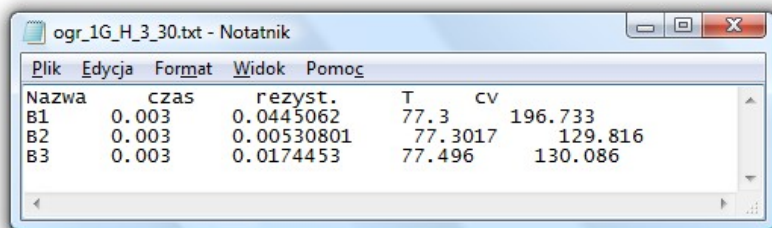
Rys. 5.13 Porównanie pierwszego i kolejnego pliku DIF, niezbędnych do inicjalizacji obliczeń w programie Flux2D

Plik DIF ma dwie wersje. Pierwszą z nich jest wersja tworzona w przypadku gdy obliczenia są rozpoczynane od pierwszego kroku. Druga natomiast jest rozbudowana o trzy wersy niezbędne w przypadku wznawiania lub ponownego wykonania symulacji od kolejnego, dowolnego kroku obliczeniowego. Różnice między plikami pokazano i opisano na Rys. 5.13.

Po każdym wykonanym kroku obliczeniowym program Flux tworzy plik tekstowy o rozszerzeniu w formie CIR_numer_kroku_obliczeniowego (tutaj: CIR_30) (Rys. 5.14). Zawiera on chwilowe wartości napięcia, prądu i mocy dla każdego elementu obwodu. Elementy te są ponumerowane zgodnie z numeracją na końcu pliku CIP (Rys. 5.12).



Rys. 5.14 Zawartość pliku CIR, tworzego przez program Flux po wykonaniu każdego kroku obliczeniowego



Rys. 5.15 Zawartość pliku z danymi obliczeń modułu autorskiego tworzego po wykonaniu każdego kroku obliczeniowego

Jednym z głównych zadań programu jest także obliczanie temperatury uzwojeń ogranicznika, czego nie umożliwiają program Flux2D. Problem ten został rozwiązany w aplikacji opracowanej przez autora. Po każdym kroku obliczeniowym tworzy ona plik tekstowy zawierający obliczoną rezystancję, temperaturę i średnie ciepło właściwe uzwojeń ogranicznika (Rys. 5.15). Na podstawie wartości temperatur uzwojeń z tego pliku oraz na podstawie wartości prądów chwilowych płynących w uzwojeniach pobranych z pliku CIR, obliczana jest rezystancja każdego z uzwojeń. Wartości rezystancji wpisywane są w odpowiednie miejsca pliku CIP (oznaczone na Rys. 5.12) i rozpoczyna się obliczanie kolejnego kroku.

Po ukończeniu obliczeń, na dysku znajduje się zbiór plików o rozszerzeniu CIR, zawierających wartości chwilowe: napięć, prądów i mocy dla każdego z elementów obwodu oraz taka sama liczba plików TXT zawierających: rezystancję, temperaturę i ciepło właściwe analizowanych uzwojeń ogranicznika. Program Flux ma wbudowane narzędzie do analizy danych zawartych w plikach CIR, ponieważ są one wynikiem działania modułu obwodowego. Pliki TXT są natomiast rezultatem działania programu opracowanego przez autora, toteż nie mogą one być obsługane przez Flux-a.

dane wynikowe pierwszego uzwojenia (B1)
dane wynikowe drugiego uzwojenia (B2)
dane wynikowe kolejnych uzwojeń (B3, itd.)

Nazwa	czas	rezyst.	T	CV
B1	0.0001	0.00659351	77.3	196.733
B1	0.0002	0.00659351	77.3	196.733
B1	0.0003	0.00659351	77.3	196.733
B1	0.0004	0.00659351	77.3	196.733
B1	0.0005	0.00659351	77.3	196.733
B1	0.0006	0.00659351	77.3	196.733
B1	0.0007	0.00659351	77.3	196.733
B1	0.0008	0.00659351	77.3	196.733
B1	0.0009	0.00659351	77.3	196.733
B1	0.001	0.00659351	77.3	196.733
B1	0.0011	0.00659351	77.3	196.733
B1	0.0012	0.00659351	77.3	196.733
B1	0.0013	0.00659351	77.3	196.733
B1	0.0014	0.00659351	77.3	196.733
B1	0.0015	0.00659351	77.3	196.733
B1	0.0016	0.00659351	77.3	196.733
B1	0.0017	0.00659351	77.3	196.733
B1	0.0018	0.00659351	77.3	196.733
B1	0.0019	0.00659351	77.3	196.733
B1	0.002	0.00659351	77.3	196.733
B1	0.0021	0.00659351	77.3	196.733
B1	0.0022	0.00659351	77.3	196.733
B1	0.0023	0.00659351	77.3	196.733
B1	0.0024	0.00659351	77.3	196.733
B1	0.0025	0.00659351	77.3	196.733
B1	0.0026	0.00659351	77.3	196.733
B1	0.0027	0.00659351	77.3	196.733
B1	0.0028	0.00659351	77.3	196.733
B1	0.0029	0.00659351	77.3	196.733
B1	0.003	0.00659351	77.3	196.733
B1	0.0031	0.00659352	77.3	196.733
B1	0.0032	0.00659352	77.3	196.733
B1	0.0033	0.00659352	77.3	196.733
B1	0.0034	0.00659353	77.3001	196.733
B1	0.0035	0.00659353	77.3001	196.733
B2	0.0001	2.434e-14	77.3	170.159
B2	0.0003	2.434e-14	77.3	170.159
B2	0.0004	2.434e-14	77.3	170.159
B2	0.0005	2.434e-14	77.3	170.159
B2	0.0006	2.43451e-14	77.3	170.159
B2	0.0007	2.427274e-14	77.3	170.159
B2	0.0008	3.96391e-14	77.3	170.159
B2	0.0009	3.90411e-13	77.3	170.159
B2	0.001	5.92727e-12	77.3	170.159
B2	0.0011	6.92679e-11	77.3	170.159
B2	0.0012	6.25357e-10	77.3	170.159
B2	0.0013	4.53952e-09	77.3	170.159
B2	0.0014	2.73917e-08	77.3	170.159
B2	0.0015	1.41077e-07	77.3	170.159
B2	0.0016	6.335e-07	77.3	170.159
B2	0.0017	2.52337e-06	77.3	170.159
B2	0.0018	9.0421e-06	77.3	170.159
B2	0.0019	2.94785e-05	77.3	170.159
B2	0.002	8.81649e-05	77.3	170.159
B2	0.0021	0.000242884	77.3	170.159
B2	0.0022	0.000614055	77.3002	170.16
B2	0.0023	0.00139847	77.3005	170.161
B2	0.0024	0.00276338	77.3012	170.163
B2	0.0025	0.00447849	77.3028	170.168
B2	0.0026	0.00581771	77.3054	170.176
B2	0.0027	0.00644146	77.3089	170.183
B2	0.0028	0.00663855	77.3127	170.191
B2	0.0029	0.00662016	77.3166	170.204
B2	0.003	0.0064388	77.3205	170.221
B2	0.0031	0.00610246	77.3243	170.233
B2	0.0032	0.00564974	77.3278	170.243
B2	0.0033	0.00512354	77.3311	170.253
B2	0.0034	0.00459363	77.334	170.262
B2	0.0035	0.00409095	77.3366	170.269

Rys. 5.16 Plik wyjściowy z przebiegami rezystancji, temperatury i ciepła właściwego każdego z uzwojeń

W celu zniwelowania tej niedogodności napisano procedurę, która po kliknięciu przycisku **Utworz plik**, gromadzi dane ze wszystkich plików TXT do jednego pliku o nazwie „przebieg_temp.txt”. Jest on skonstruowany tak, aby maksymalnie ułatwić użytkownikowi obróbkę i wizualizację danych w arkuszu kalkulacyjnym. Dane są pogrupowane w bloki. Każdy blok zawiera dane jednego uzwojenia ogranicznika ze wszystkich kroków obliczeniowych. Bloki znajdują się jeden obok drugiego i składają się z pięciu jednakowych kolumn zawierających kolejno: nazwę uzwojenia, czas kroku obliczeniowego, rezystancję, temperaturę oraz ciepło właściwe (Rys. 5.16).

Cały proces przygotowania polowo-obwodowego modelu numerycznego składa się z kilku etapów opisanych w kolejnych podrozdziałach.

5.4.2. Geometria i siatka modelowanego ogranicznika

Pierwszym krokiem jest zbudowanie geometrii modelowanego ogranicznika. Z uwagi na ich osiowosymetryczną konstrukcję, wykorzystano dwuwymiarowy moduł pakietu (Flux 2D) gdzie zamiast tworzenia geometrii trójwymiarowej wystarczy odwzorować przekrój osiowy urządzenia i poszczególnych jego elementów.

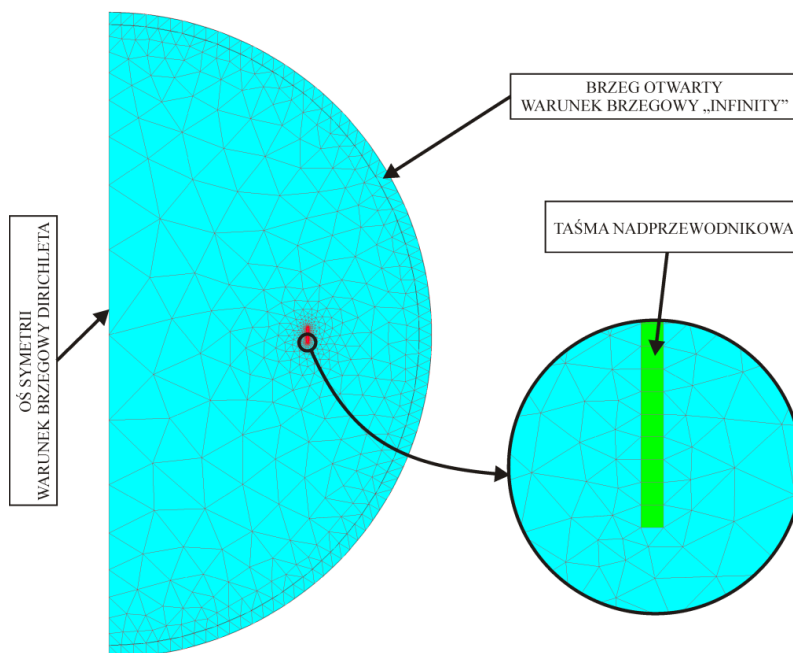
Kolejnym krokiem jest podział stworzonej geometrii na siatkę elementów skończonych. Jakość i gęstość wykonanej siatki ma bardzo duży wpływ zarówno na czas obliczeń jak i poprawność wyników symulacji. Aby otrzymać jak najdokładniejsze wyniki, elementy skończone (elementy siatki) powinny mieć krawędzie o porównywalnej długości, natomiast gęstość siatki powinna być możliwie duża w obszarach, w których spodziewamy się np. dużych zmian i gradientów pola magnetycznego.

W przypadku modelowania taśmy nadprzewodnikowej SF12050 na przykład pod kątem analizy rozptyłu prądu i strat zmiennoprądowych w poszczególnych jej warstwach, należałoby geometrię jej przekroju podzielić na blisko 636000 elementów. Tak duża liczba wynika ze współczynnika geometrycznego (stosunek szerokości do grubości) przekroju poszczególnych warstw taśmy (srebro – 6000, YBCO – 12000, hastelloy – 240). Liczba 636000 jest to liczba elementów kwadratowych o maksymalnej możliwej wielkości.

W rozpatrywanym zagadnieniu, gdzie modelowany metrowy odcinek taśmy nadprzewodnikowej w postaci jednego zwoju pełni rolę rezystancyjnego ogranicznika prądu, istotny jest całkowity prąd płynący przez taśmę i można potraktować jej przekrój jako jednolity, co pozwoli diametralnie zmniejszyć liczbę elementów skończonych. Tak więc geometrię taśmy SF12050 o współczynniku geometrycznym 226,4 podzielono na 226 niemal kwadratowych elementów skończonych.

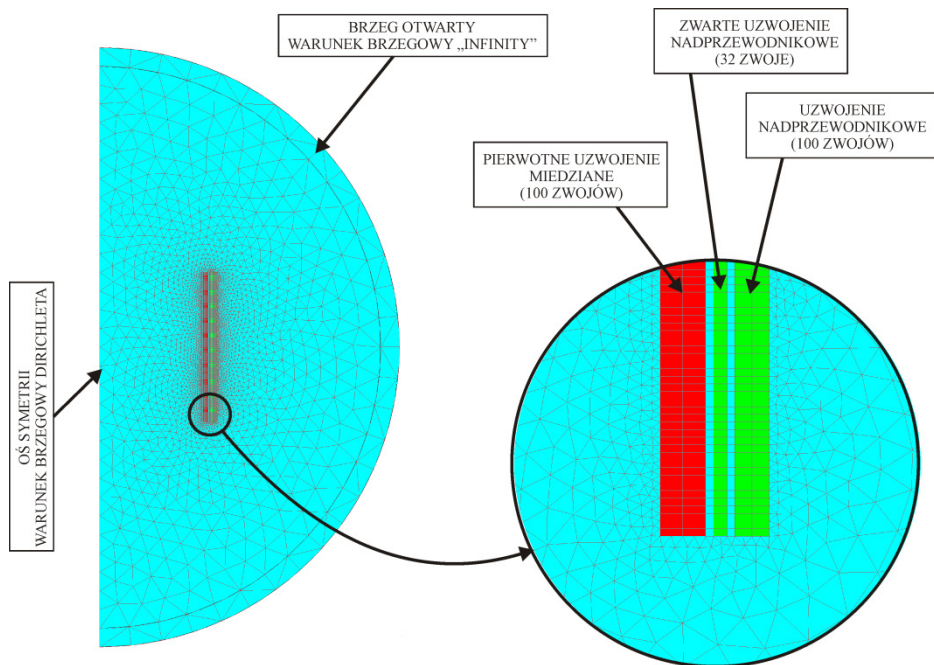
Na rysunku (Rys. 5.17) zaprezentowano posiatkowaną geometrię obszaru symulacji ogranicznika rezystancyjnego z powiększonym fragmentem taśmy nadprzewodnikowej.

Obszary geometryczne symulacji badanych ograniczników rezystancyjnych wykonanych z taśm HSW i SF12050 różnią się jedynie wymiarami przekroju taśmy, który w przypadku taśmy HSW podzielony jest na 13 elementów z uwagi na współczynnik geometryczny równy 13,33.



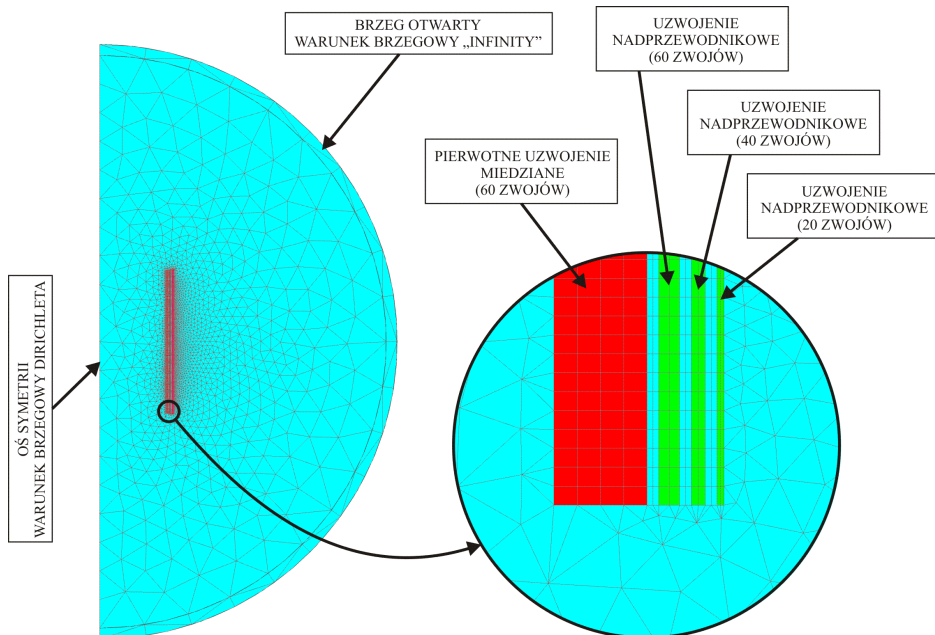
Rys. 5.17 Geometria nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu rezystancyjnego w postaci jednego zwoju wykonanego z jednego metra taśmy nadprzewodnikowej oraz powiększony fragment geometrii taśmy

Ponieważ ogranicznik charakteryzuje się znikomą małą rzeczywistą indukcyjnością, oraz nieskomplikowaną budową, siatka jest mocno zagęszczona jedynie wokół obszaru taśmy nadprzewodnikowej. W pozostałym obszarze elementy siatki są znacznie większe, a całkowita liczba elementów siatki obszaru symulacji dla taśmy HSW wynosi 1049, natomiast dla taśmy SF12050 – 4116. W tym modelu takie rozwiązanie nie wpływa na przekłamanie wiarygodności wyników, natomiast znacznie wpływa na skrócenie czasu obliczeń.



Rys. 5.18 Geometria nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu indukcyjnego bazującego na taśmie pierwszej generacji HSW

W przypadku ograniczników typu indukcyjnego w obszarze symulacji zastosowano dużo gęstszą siatkę. Liczba elementów siatki dla całego obszaru symulacji ogranicznika 1G wynosi 6766, natomiast dla ogranicznika 2G - 7250 elementów. Przekroje uzwojeń przedstawiono jako prostokąty o wymiarach odpowiadających wymiarom przekrojów poszczególnych uzwojeń ograniczników rzeczywistych. Podobnie jak w przypadku ograniczników typu rezystancyjnego, obszary uzwojeń przedstawione są w postaci jednolitej struktury, ponieważ istotny jest całkowity prąd płynący w uzwojeniu, a nie jego rozplątanie w poszczególnych warstwach taśmy z której jest wykonany. Na rysunkach: Rys. 5.18 i Rys. 5.19 przedstawiono geometrię modelowanych nadprzewodnikowych ograniczników prądu typu indukcyjnego wykonanych z taśm HSW i SF12050.



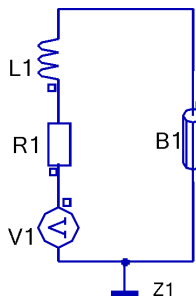
Rys. 5.19 Geometria nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu indukcyjnego bazującego na taśmie drugiej generacji SF12050

5.4.3. Moduł magnetyczny-przejęciowy sprzężony z obwodem zewnętrznym

Po wykonaniu geometrii układu i wygenerowaniu siatki, kolejnym krokiem jest wybór odpowiedniego modułu. Jak napisano na wstępie, do modelowania nadprzewodnikowych ograniczników prądu wykorzystano moduł magnetyczny-przejęciowy. Moduł TM umożliwia przyporządkowanie właściwości elektromagnetycznych każdemu z wydzielonych obszarów geometrycznych. Ponadto program Flux2D umożliwia sprzężenie wybranych obiektów polowych z modułu TM z zewnętrznym obwodem elektrycznym.

Schematy obwodów elektrycznych wykonano w module ELECTRIFLUX programu Flux2D. Na Rys. 5.20 pokazano schemat obwodu zewnętrznego do modelu ograniczników typu rezystancyjnego. W obwodzie uwzględniono zarówno rezystancję wewnętrzną źródła zasilania jak i jego indukcyjność. Rysunki Rys. 5.21 i Rys. 5.22 przedstawiają schematy obwodów zewnętrznych dla ograniczników indukcyjnych, odpowiednio: pierwszej i drugiej generacji. Schematy te oprócz elementów opisujących parametry źródła zasilania, zawierają przełączniki których odpowiednie ustawienie w pozycji włączonej

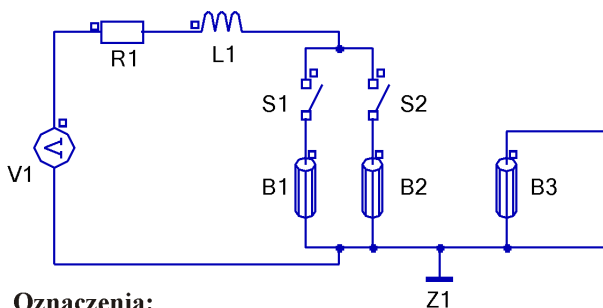
badź wyłączonej umożliwia zasymulowanie wielu konfiguracji zwojowych ogranicznika, bez konieczności wykonywania wielu schematów, indywidualnie dla każdej konfiguracji.



Oznaczenia:

- V1 - napięcie zasilania (U_s)
- R1 - rezystancja wewnętrzna źródła zasilania (R_w)
- L1 - indukcyjność wewnętrzna źródła zasilania (L_w)
- B1 - taśma nadprzewodnikowa (1 zwoj)
- Z1 - uziemienie

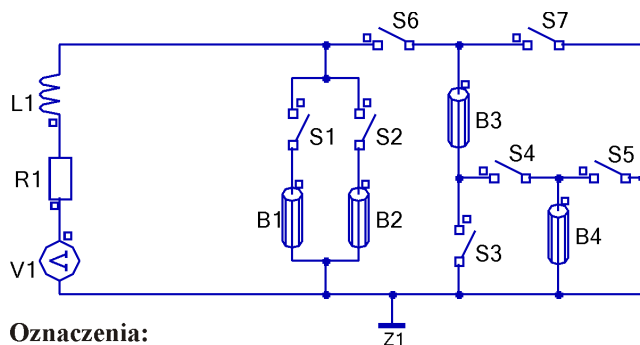
Rys. 5.20 Schemat zewnętrznego obwodu elektrycznego dla modelu numerycznego ogranicznika rezystancyjnego



Oznaczenia:

- V1 - napięcie zasilania (U_s)
- R1, L1 - rezystancja i indukcyjność wewnętrzna źródła zasilania (R_w, L_w)
- B1 - uzwojenie miedziane (100 zwojów)
- B2 - uzwojenie HTS 1G (100 zwojów)
- B3 - zwarte uzwojenie HTS 2G (32 zwoje)
- Z1 - uziemienie
- S1, S2 - załączniki

Rys. 5.21 Schemat zewnętrznego obwodu elektrycznego dla modelu numerycznego ogranicznika indukcyjnego pierwszej generacji



Oznaczenia:

V1 - napięcie zasilania (U_s)

R1, L1 - rezystancja i indukcyjność wewnętrzna źródła zasilania (R_w, L_w)

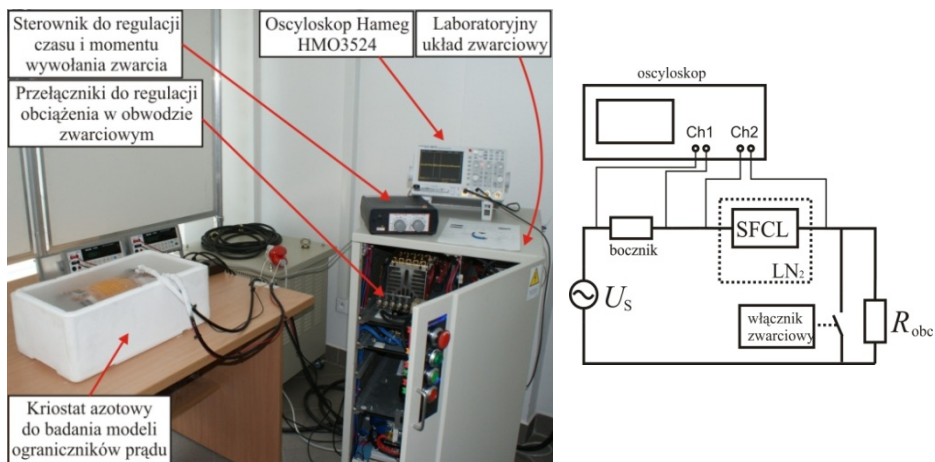
B1 - uzwojenie miedziane (60 zwojów)

B2, B3, B4 - uzwojenia HTS 2G (odpowiednio: 60, 40 i 20 zwojów)

Z1 - uziemienie

S1, ... , S7 - załączniki

Rys. 5.22 Schemat zewnętrznego obwodu elektrycznego dla modelu numerycznego ogranicznika indukcyjnego drugiej generacji



Rys. 5.23 Widok stanowiska do badania nadprzewodnikowych ograniczników prądu (PTN)⁷ oraz uproszczony schemat układu pomiarowego

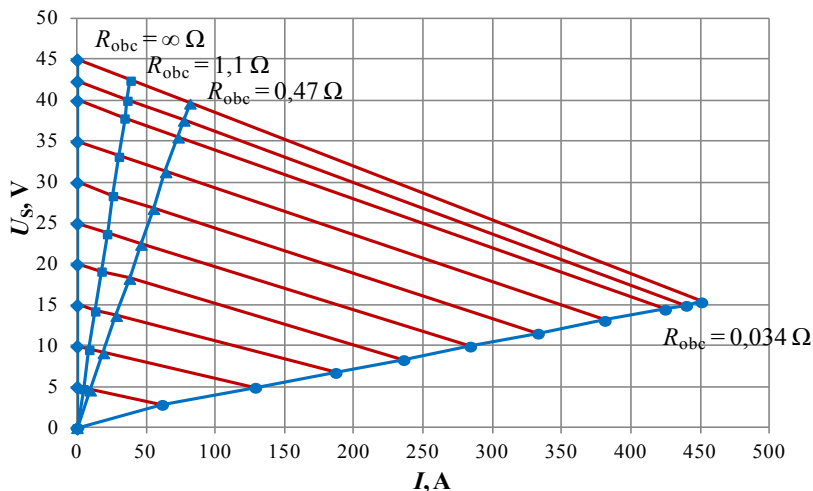
Ważnym aspektem przy modelowaniu numerycznym, polowo-obwodowym nadprzewodnikowych ograniczników prądu jest poprawne odwzorowanie źródła zasilania. Do wykonania pomiarów nadprzewodnikowych ograniczników prądu został wykorzystany układ pomiarowy (PTN)⁷ zaprezentowany na Rys. 5.23.

Układ składa się z regulowanego – za pomocą pokrętła autotransformatora – źródła napięcia ($\max U_s = 40 \text{ V}$), regulowanego obciążenia rezystancyjnego i oscyloskopu do rejestrowania przebiegu napięcia na ograniczniku oraz prądów zwarciovych, których pomiar realizowany był przez pomiar napięcia na boczniku o rezystancji $R_{\text{bocz}} = 1 \text{ m}\Omega$.

Do kontroli czasu (oraz chwili wystąpienia) zwarcia wykorzystano elektroniczny sterownik obwodu zwarciovego. Sterownik posiada układ detekcji przejścia sygnału przez zero, układ do regulacji czasu opóźnienia i czasu trwania zwarcia [19].

Zwarcia pomiarowe trwały 50 ms i wykonywane były w chwili przejścia napięcia zasilającego U_s przez zero (tzw. „najgorszy przypadek”).

Źródło napięciowe, którym dysponuje laboratorium PTN wykazuje znaczny spadek napięcia w przypadku podłączenia do niego obciążenia. Na Rys. 5.24 przedstawiono charakterystyki prądowo-napięciowe źródła, które posłużyły do wyznaczenia jego impedancji wewnętrznej.



Rys. 5.24 Charakterystyki laboratoryjnego źródła zasilania

Charakterystyki oznaczone liniami niebieskimi pokazują zależności napięcia od prądu w zależności od przyłączonego obciążenia o określonej wartości. Charakterystyka nachylona pod najmniejszym kątem w stosunku do osi prądu oznaczona „ $R_{\text{obc}} = 0,034 \Omega$ ” wykonana była przy zwartych zaciskach źródła. Na podstawie wyżej wymienione. wykresów wykreślono charakterystyki (linie czerwone) pokazujące w jaki sposób spada napięcie w zależności od wzrostu obciążenia (tym samym od wzrostu prądu w obwodzie).

W Tab. 5.2 umieszczono dane liczbowe z Rys. 5.24. Analizując te dane można wyznaczyć tangensy kątów nachylenia każdej z danych charakterystyk

$U_s(I)$, które odpowiadają impedancji wewnętrznej źródła (Z_{zr}) dla poszczególnych obciążeń. Z danych eksperymentalnych zawartych w Tab. 5.2 wynika, że Z_{zr} nie jest stała, jej wartość bezwzględna rośnie wraz ze wzrostem napięcia U_s . Jest to związane ze zmianą impedancji autotransformatora podczas regulacji napięcia U_s .

Tab. 5.2 Wartości skuteczne prądów i napięć w zależności od wybranych wartości napięcia zasilania i wartości obciążenia.

$R_{obc} = \infty \Omega$		$R_{obc} = 1,1 \Omega$		$R_{obc} = 0,47 \Omega$		$R_{obc} = 0,034 \Omega$		
U_s, V	I, A	U_s, V	I, A	U_s, V	I, A	U_s, V	I, A	i_p, A
5	0	4,77	4,71	4,59	9,56	2,85	61,53	87,02
10	0	9,55	8,88	9,14	19,1	4,94	128,81	182,16
15	0	14,26	13,2	13,69	28,35	6,75	186,85	264,25
20	0	19,13	17,75	18,23	37,89	8,32	235,91	333,63
25	0	23,7	21,75	22,39	46,22	9,97	284,04	401,72
30	0	28,35	25,98	26,76	55,23	11,55	332,99	470,92
35	0	33,15	30,32	31,25	64,06	13,11	381,2	539,1
40	0	37,83	34,35	35,49	73,05	14,48	424,77	600,71
42,35	0	40	36,44	37,55	77,15	14,95	440	622,25
45	0	42,45	38,76	39,64	81,6	15,37	451	637,81

Tab. 5.3 Wartości impedancji wewnętrznej źródła (Z_{zr}) zasilania w zależności od wartości U_s

U_s, V	Z_{zr}, Ω
5	0,035
10	0,039
15	0,044
20	0,05
25	0,053
30	0,055
35	0,057
40	0,06
42,35	0,062
45	0,066

5.4.4. Moduł cieplny i modelowanie właściwości nadprzewodników

Podstawowe różnice w modelowaniu numerycznym zagadnień cieplnych w niskich temperaturach poniżej 150-200 K, a modelowaniem zjawisk cieplnych w temperaturach pokojowych i podwyższonych, wynikają ze znacznych zmian wartości parametrów elektrycznych i cieplnych, materiałów z których zbudowane są ograniczniki prądu. Poza dużymi zmianami wartości parametrów, również przebiegi tych zmian w funkcji temperatury odbiegają często znacznie od przebiegów zmian w wyższych temperaturach, przewidzianych w komercyjnych programach polowych, w tym we Flux-ie [21]. Ponadto program Flux2D nie umożliwia uwzględnienia w modelu numerycznym podstawowej właściwości nadprzewodników jaką jest nieliniowa zależność rezystancji od prądu oraz od temperatury.

Możliwość taką daje natomiast zewnętrzny program opracowany przez autora. Pozwala on na obliczanie rezystancji w zależności od prądu korzystając z prawa potęgowego (wzór 2.4), które uwzględnia zależność prądu krytycznego od temperatury (wzór 3.3).

Temperatura natomiast obliczana jest ze wzoru 3.11. Zależność ta pozwala na uwzględnienie zmian średniego ciepła właściwego taśm nadprzewodnikowych w funkcji temperatury (Rys. 3.10), a także na uwzględnienie wymiany ciepła ogranicznika z ciekłym azotem (Rys. 3.11).

Cały proces obliczeń (sprzężenie modułu cieplnego z modulem magnetycznym-prześciowym) został opisany w podrozdziale 5.4.1 natomiast kompletny kod opracowanego programu zawierającego moduł cieplny umieszczono w Dodatku B.

6. Badania nadprzewodnikowych ograniczników prądu typu rezystancyjnego

W niniejszym rozdziale porównano przebiegi prądu, napięcia i rezystancji w ogranicznikach rezystancyjnych, uzyskane eksperymentalnie z przebiegami uzyskanymi w badaniach modeli numerycznych. Ponadto zaprezentowano przebiegi zmian temperatury ogranicznika dla każdego przypadku uzyskane w badaniach modeli numerycznych. W celach porównawczych i dla zachowania jednolitości w całym rozdziale użyto jednolitego, następującego systemu kolorów wykresów:

- niebieski – przebieg uzyskany w badaniach eksperymentalnych
- czerwony – przebieg obliczony w badaniach z wykorzystaniem modelu analitycznego
- zielony – przebieg obliczony w badaniach z wykorzystaniem hybrydowego modelu połowo-obwodowego

Podobny system kolorów zastosowany został w następnym rozdziale dotyczącym nadprzewodnikowych ograniczników prądu typu indukcyjnego.

6.1. SFCL typu rezystancyjnego z taśmy HTS 1G

Dla przypadku $U_s = 25$ V (Rys. 5.1) zarówno maksymalne wartości prądu jak i maksymalne wartości napięcia w kolejnych półokresach są jednakowe. Jednak w miarę wzrostu napięcia U_s , a co za tym idzie w miarę wzrostu wartości prądu zwarciovego, w kolejnych półokresach obserwujemy nieznaczne zmniejszanie się maksymalnych wartości prądu, a także zwiększanie maksymalnych wartości napięcia co ewidentnie świadczy o zwiększającej się rezystancji ogranicznika¹¹ podczas zwarcia, które jest wynikiem wzrostu temperatury.

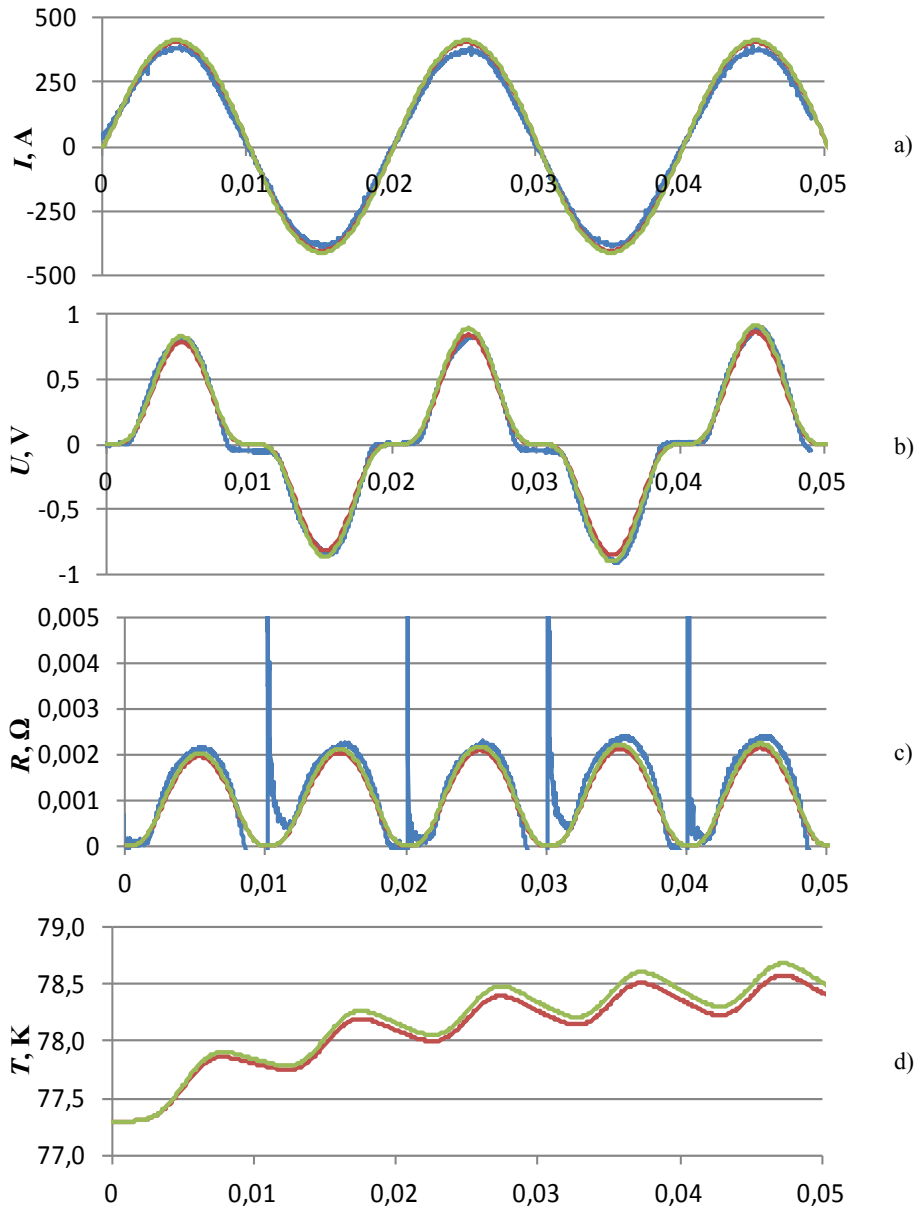
Obserwując przebiegi napięć widać, że w okolicach każdego przejścia prądu przez zero, napięcie na ograniczniku spada do wartości zerowej. Jest to spowodowane tym, że wartość prądu spada poniżej wartości krytycznej i nadprzewodnik cyklicznie powraca do stanu nadprzewodzącego. Ponadto świadczy to o tym, że pomimo wzrostu temperatury ogranicznika, ma ona wartość mniejszą od temperatury krytycznej.

Pokazane na rysunkach: Rys. 6.2, Rys. 6.3 oraz Rys. 6.4, uzyskane numerycznie, przebiegi temperatury potwierdzają tę tezę. W pierwszym przypadku (dla $U_s = 25$ V) szczytowa wartość temperatury osiąga 78,8 K, natomiast dla przypadku $U_s = 40$ V taśma HSW nagrzewa się maksymalnie do temperatury 82,6 K. Tak więc temperatura krytyczna ($T_c = 110$ K) nie jest osiągnięta i nadprzewodnik może cyklicznie powracać do stanu

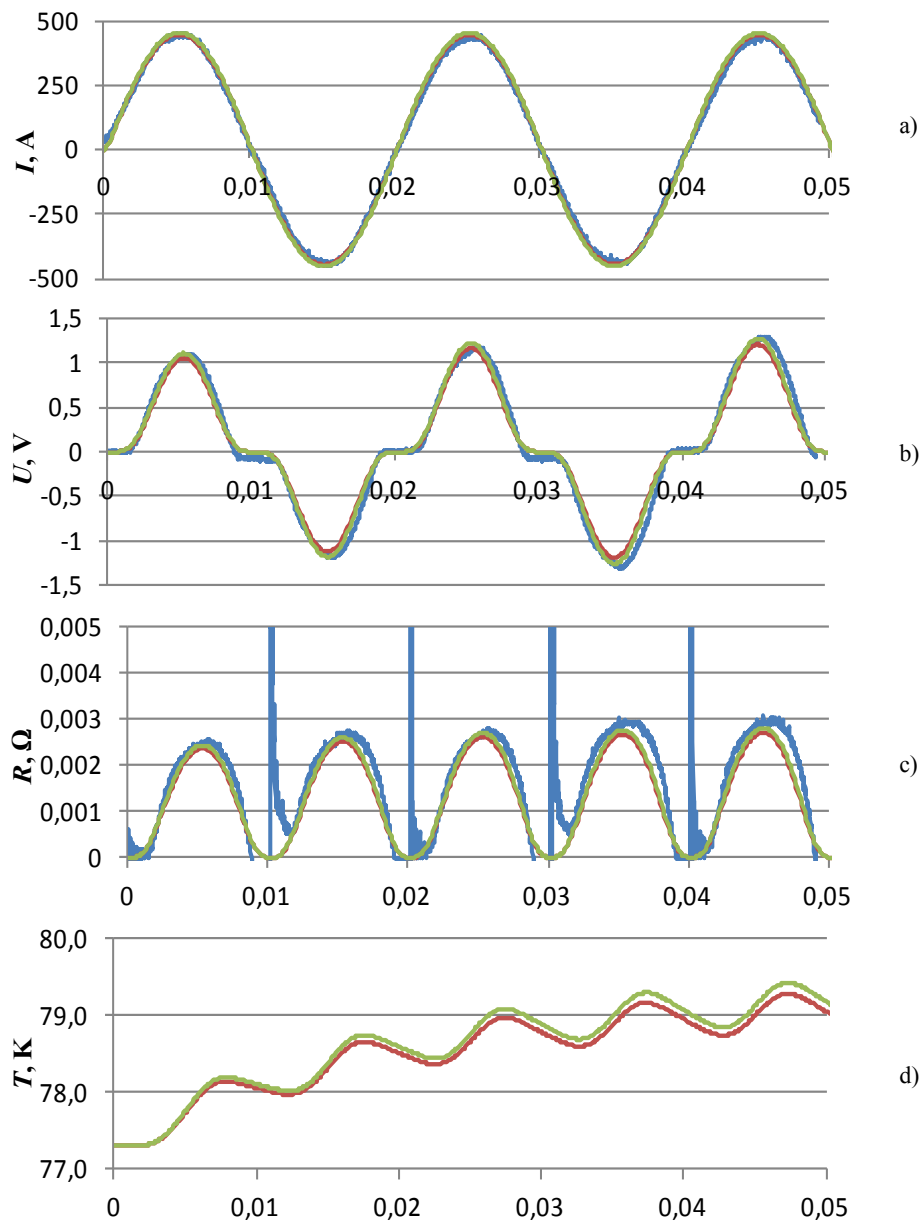
¹¹ Szpilki na wykresach ukazujących przebiegi rezystancji pojawiające się co 10 ms są wynikiem błędów pomiarowych napięcia i powstają w wyniku dzielenia małych (zamiast zerowych) wartości napięcia przez prąd.

nadprzewodzącego, jednak wzrost temperatury powoduje zmniejszenie wartości prądu krytycznego charakteryzującego taśmę i nadprzewodnik z każdym półokresem wychodzi ze stanu nadprzewodzącego przy coraz mniejszym prądzie.

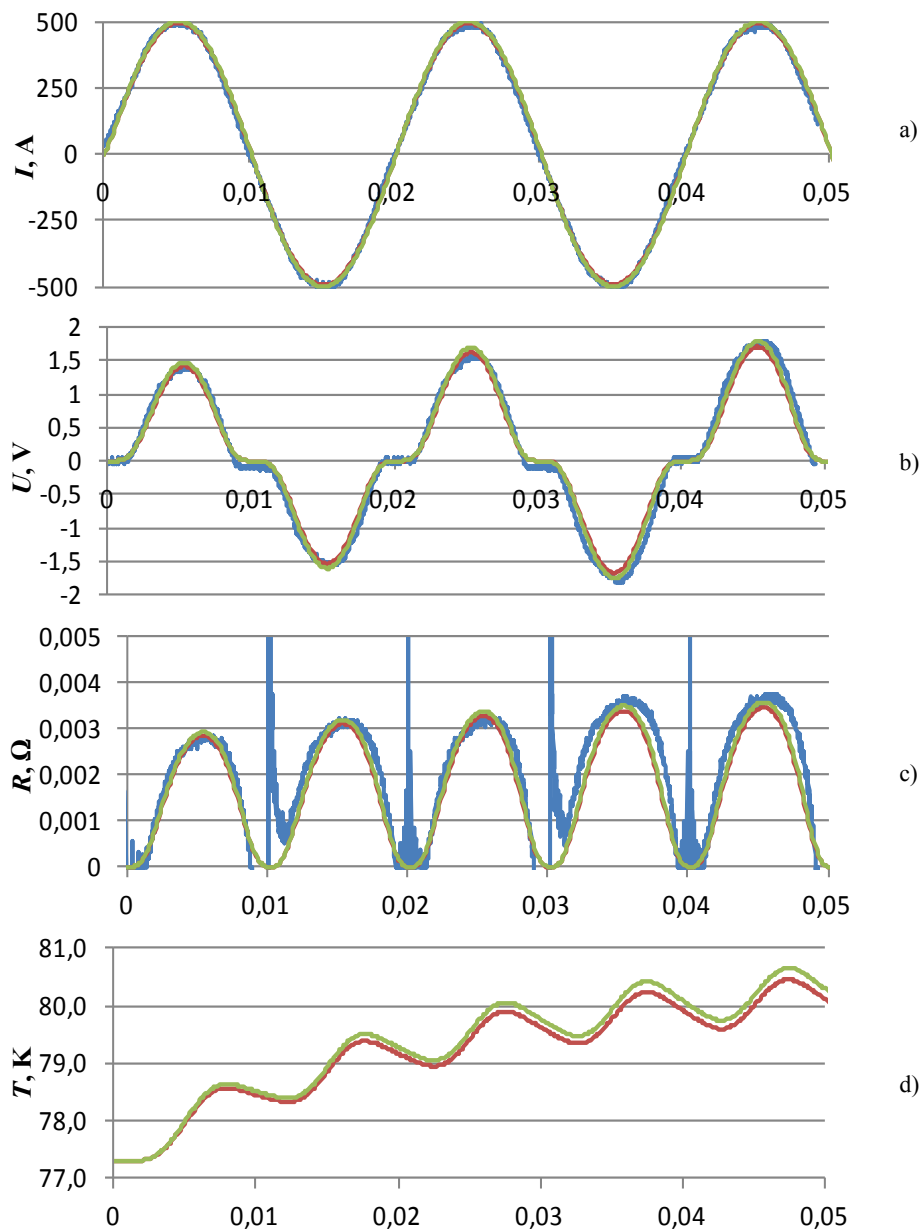
Jak napisano w podrozdziale 3.4.4, rzetelny pomiar temperatury jest praktycznie niemożliwy do wykonania dlatego autor nie przedstawił eksperymentalnych przebiegów tej wielkości. Jednak bardzo dobra zgodność eksperymentalnych przebiegów prądów, napięć i rezystancji ogranicznika z taśmy HTS 1G z przebiegami uzyskanymi na podstawie modeli numerycznych dowodzi, że założenia wykorzystane do budowy modelu, i sam model numeryczny ogranicznika, są poprawne. Zatem przebiegi temperatury uzyskane za pomocą tychże modeli można przyjąć jako zgodne z rzeczywistością.



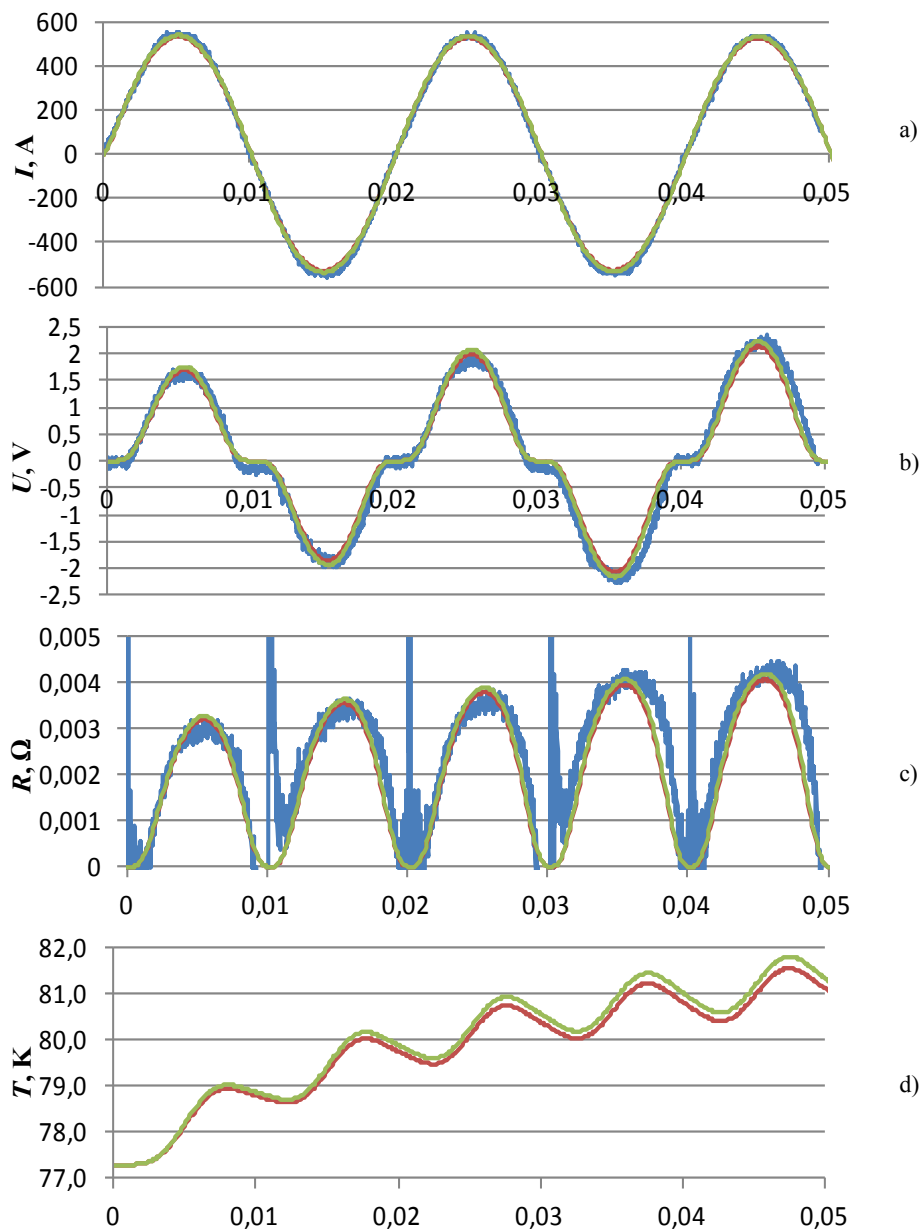
Rys. 6.1 Przebiegi prądu, napięcia, rezystancji i temperatury w rezystancyjnym SFCL wykonanym z taśmy HTS 1G dla $U_s = 25$ V: **eksperyment**, **model analityczny**, **model polowo-obwodowy**



Rys. 6.2 Przebiegi prądu, napięcia, rezystancji i temperatury w rezystancyjnym SFCL wykonanym z taśmy HTS 1G dla $U_s = 30 V$: eksperyment, model analityczny, hybrydowy model polowo-obwodowy



Rys. 6.3 Przebiegi prądu, napięcia, rezystancji i temperatury w rezystancyjnym SFCL wykonanym z taśmy HTS 1G dla $U_s = 35 V$: eksperyment, model analityczny, model polowo-obwodowy



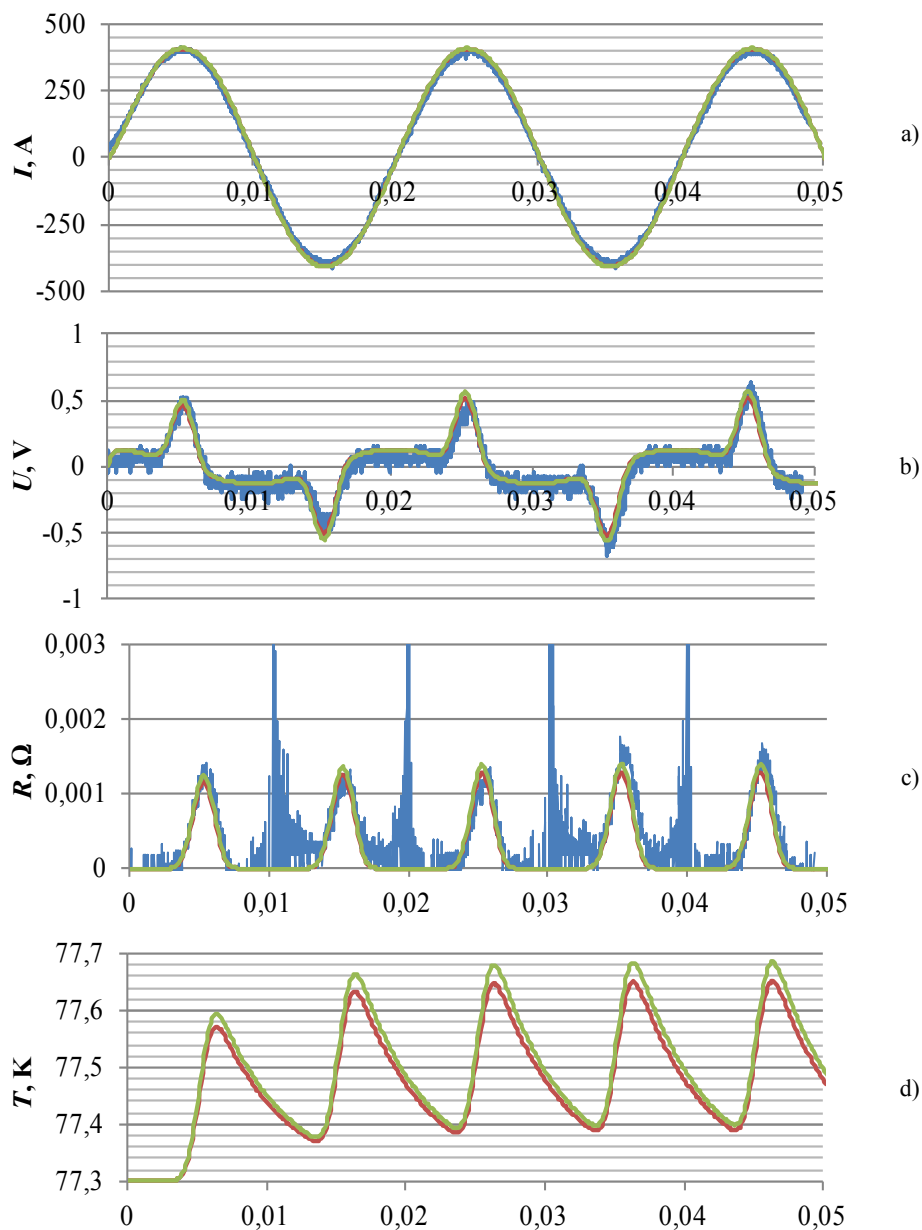
Rys. 6.4 Przebiegi prądu, napięcia, rezystancji i temperatury w rezystancyjnym SFCL wykonanym z taśmy HTS 1G dla $U_s = 40$ V: eksperyment, model analityczny, model półowo-obwodowy

6.2. SFCL typu rezystancyjnego z taśmy HTS 2G

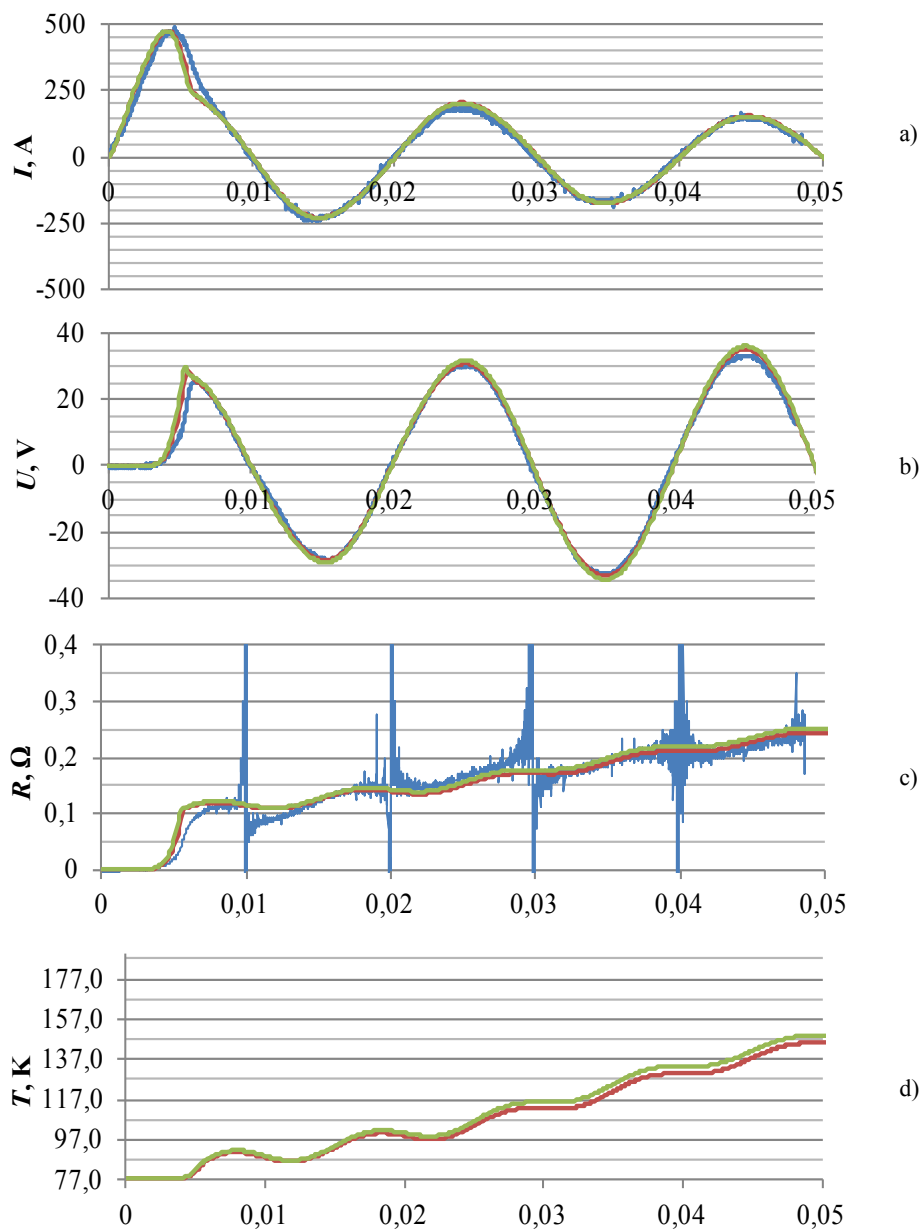
Taką samą analizę porównawczą przeprowadzono dla ogranicznika rezystancyjnego wykonanego z metrowego odcinka taśmy nadprzewodnikowej drugiej generacji – SF12050.

Prezentowany ogranicznik z taśmy HTS 2G zachowuje się podobnie jak ogranicznik z taśmy HTS 1G jedynie dla przypadku $U_s = 25$ V, w którym obserwowany jest cykliczny powrót taśmy do stanu nadprzewodzącego. Powracanie do stanu nadprzewodzącego jest możliwe, ponieważ taśma osiąga maksymalną temperaturę wynoszącą jedynie 77,7 K, a więc niewiele ponad temperaturę ciekłego azotu. W przypadku większych napięć źródła zasilania rezystancja ogranicznika gwałtownie rośnie (Rys. 6.6, Rys. 6.7) do wartości o około dwa rzędy wielkości większej niż w przypadku taśmy 1G dla takich samych warunków zwarciovych (Rys. 6.3, Rys. 6.4). Osiągnięcie tak dużej rezystancji powoduje gwałtowne i mocne podgrzanie taśmy przez prąd zwarciovowy już w pierwszym półokresie, do temperatury przekraczającej wartość krytyczną ($T_c = 90$ K). W kolejnych półokresach zwarcia obserwowane jest znaczne zmniejszanie się amplitudy prądu i zwiększanie amplitudy napięcia na ograniczniku, powodowane dalszym wzrostem jego rezystancji. Ponadto nie obserwuje się już powrotu taśmy do stanu nadprzewodzącego podczas przechodzenia prądu przez zero, ponieważ ciekły azot nie jest w stanie tak szybko schłodzić taśmy do temperatury poniżej 90 K. Dzieje się tak dlatego, że intensywność chłodzenia gwałtownie spada gdy temperatura chłodzonego obiektu wzrasta o ponad 13 K (Rys. 3.11).

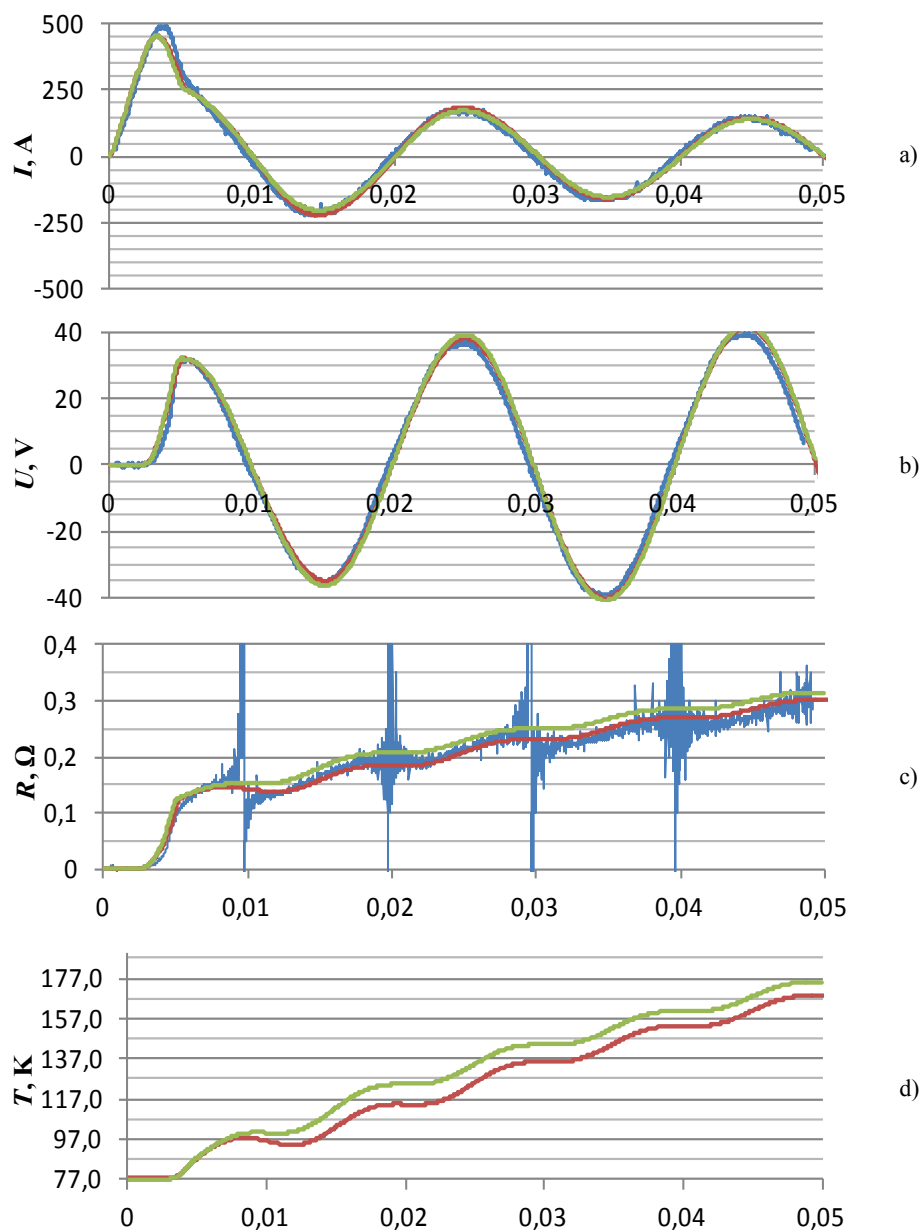
Przeprowadzone analizy oraz zgodność przebiegów eksperymentalnych z symulacyjnymi świadczą, że model numeryczny ogranicznika rezystancyjnego drugiej generacji jest poprawny.



Rys. 6.5 Przebiegi prądu, napięcia, rezystancji i temperatury w rezystancyjnym SFCL wykonanym z taśmy HTS 2G dla $U_s = 25$ V: eksperyment, model analityczny, model polowo-obwodowy



Rys. 6.6 Przebiegi prądu, napięcia, rezystancji i temperatury w rezystancyjnym SFCL wykonanym z taśmy HTS 2G dla $U_s = 35$ V: eksperyment, model analityczny, model półowo-obwodowy



Rys. 6.7 Przebiegi prądu, napięcia, rezystancji i temperatury w rezystancyjnym SFCL wykonanym z taśmy HTS 2G dla $U_s = 40$ V: **eksperyment**, **model analityczny**, **model polowo-obwodowy**

6.3. Podsumowanie badań nadprzewodnikowych ograniczników prądu typu rezystancyjnego

SFCL wykonany z taśmy HTS drugiej generacji osiąga dużo większą rezystancję niż SFCL z taśmy HTS 1G i znacznie mocniej i szybciej się nagrzewa. Jest to spowodowane różnicą w konstrukcji zaprezentowanych taśm nadprzewodnikowych, bardzo stromą charakterystyką $R(i)$ taśmy SF12050 (duży wykładnik n) oraz mniejszą o 20 K wartością temperatury krytycznej taśmy SF12050.

Zaproponowany model numeryczny SFCL typu rezystancyjnego bardzo dobrze odwzorowuje zachowanie się ogranicznika podczas zwarcia co daje solidne podstawy do zastosowania go przy modelowaniu SFCL typu indukcyjnego.

7. Badania nadprzewodnikowych ograniczników prądu typu indukcyjnego

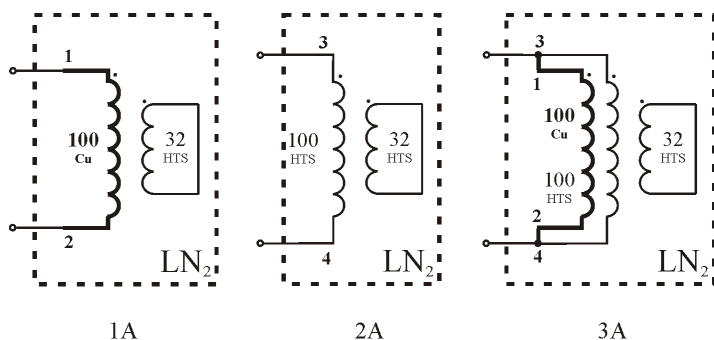
Przebadano dwa rodzaje nadprzewodnikowych ograniczników prądu typu indukcyjnego (rozdział 4.2), każdy w kilku konfiguracjach zwojowych. Pomiary realizowane były w taki sam sposób jak w przypadku badania ograniczników rezystancyjnych, a więc w każdym z badanych przypadków rejestrowany był przebieg prądu zwarciovego płynącego w zabezpieczanym obwodzie (w uzwojeniu pierwotnym ogranicznika) oraz przebieg napięcia na ograniczniku.

Uzyskane dla każdej konfiguracji uzwojeń, eksperymentalne przebiegi prądów zwarciovych oraz przebiegi napięć na ograniczniku w czasie trwania zwarcia, zostały porównane z przebiegami uzyskanymi z wykorzystaniem analitycznego i hybrydowego, połowo-obwodowego modelu numerycznego badanego SFCL. Za pomocą opracowanych modeli numerycznych uzyskano także przebiegi prądu wtórnego, przebiegi zmian rezystancji uzwojeń SFCL oraz zmiany ich temperatury w czasie trwania zwarcia.

Bezpośredni pomiar prądu wtórnego jest praktycznie niemożliwy. Wstawienie miernika lub bocznika w tor prądowy nadprzewodnikowego, zwartego uzwojenia wtórnego pozbawiłoby go cechy zerowej rezystancji w stanie znamionowym. Zerowa rezystancja uzwojenia wtórnego, w warunkach nie-ograniczania prądu, jest istotą działania SFCL typu indukcyjnego. Ponadto uzwojenie wtórne, które nie osiągałoby zerowej rezystancji mimo przejścia taśmy nadprzewodnikowej do stanu nadprzewodzącego, całkowicie zmieniłoby rozplływ prądów w uzwojeniach SFCL typu indukcyjnego.

7.1. SFCL typu indukcyjnego z taśmy HTS 1G

W przypadku SFCL z taśmy HTS pierwszej generacji przebadano trzy konfiguracje zwojowe (Rys. 7.1).



Rys. 7.1 Badane konfiguracje nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu indukcyjnego zbudowanego z taśmy HTS 1G

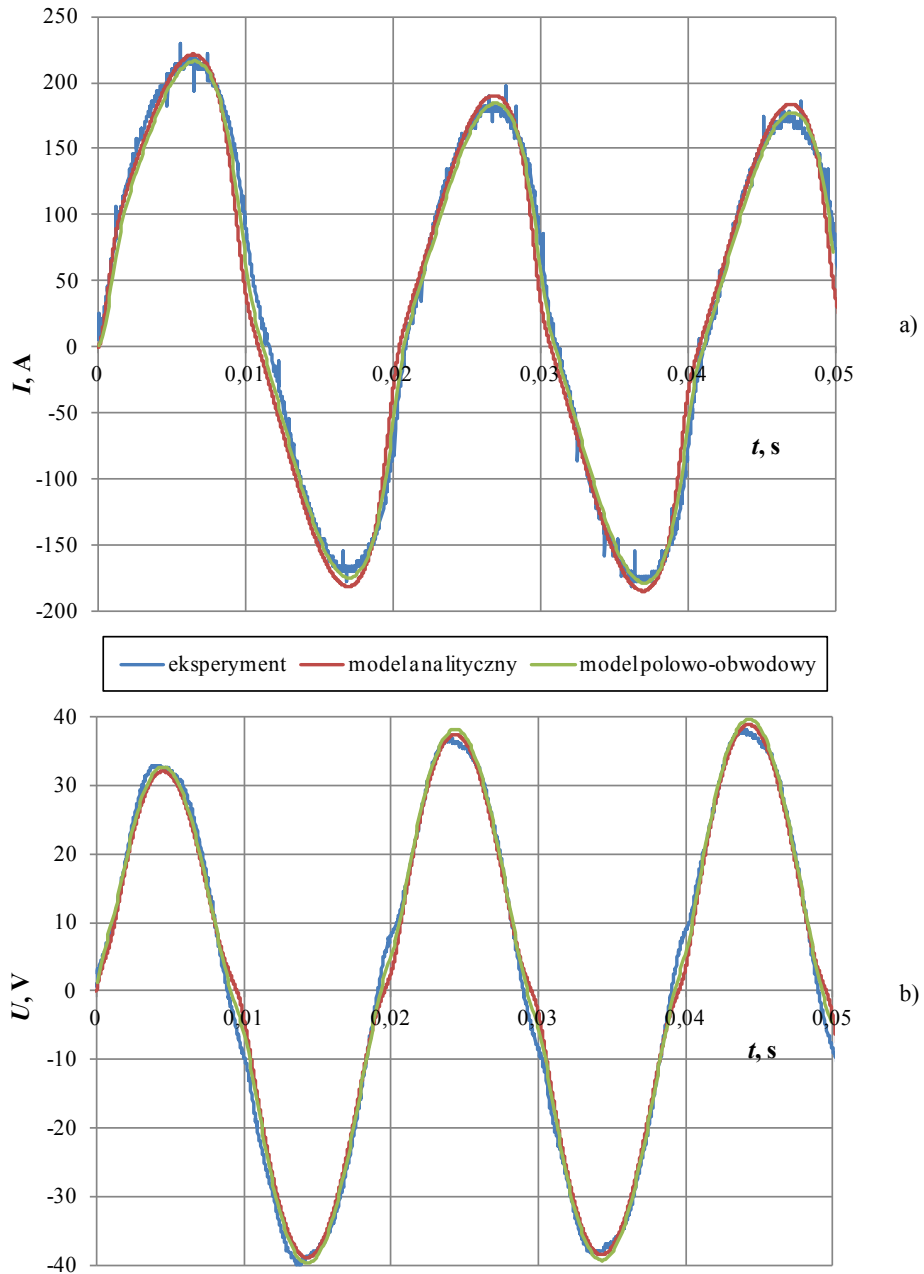
W pierwszej konfiguracji (1A) pierwotne uzwojenie miedziane o liczbie zwojów równej 100 włączone jest szeregowo do obwodu zabezpieczonego. W drugiej konfiguracji (2A) rolę uzwojenia pierwotnego pełni 100 zwojów taśmy nadprzewodnikowej, natomiast w trzeciej konfiguracji (3A) pierwotne uzwojenie miedziane zostało połączone równoległe i zgodnie z pierwotnym uzwojeniem nadprzewodnikowym. We wszystkich konfiguracjach wtórne uzwojenie (32 zwoje) wykonane z taśmy HSW jest zwarte.

Na Rys. 7.2 przedstawiono oscylogram otrzymany w wyniku badania konfiguracji 1A. Porównanie prądu płynącego w obwodzie oraz napięcia na ograniczniku w czasie trwania zwarcia zmierzone za pomocą oscyloskopu z przebiegami uzyskanymi w modelu numerycznym pokazano na Rys. 7.3.

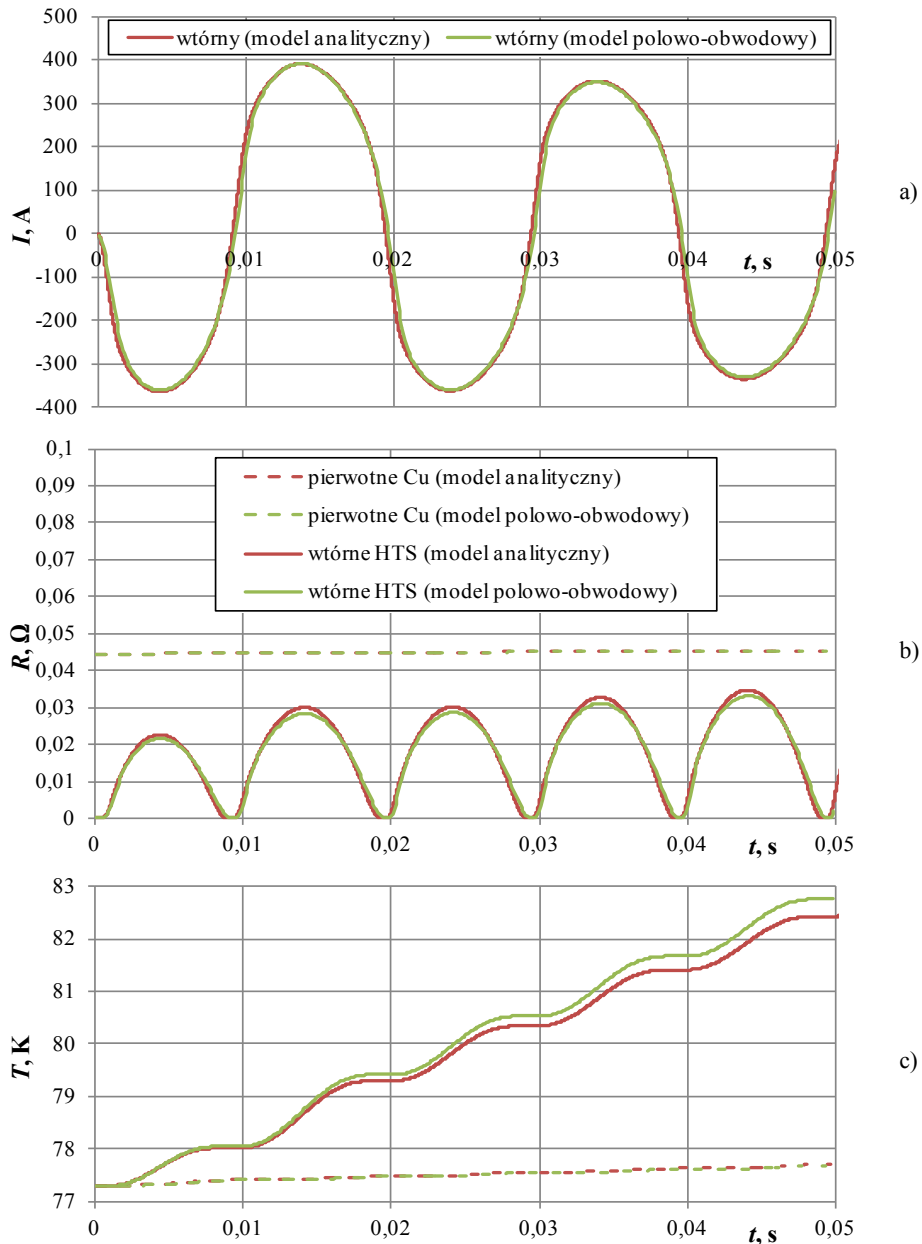
Na Rys. 7.4 pokazano przebieg prądu wtórnego, zmiany rezystancji uzwojeń w czasie trwania zwarcia oraz zmiany ich temperatury, uzyskane w badaniach modeli numerycznych.



Rys. 7.2 Oscylogram uzyskany dla konfiguracji zwojowej 1A przy $U_s = 40$ V

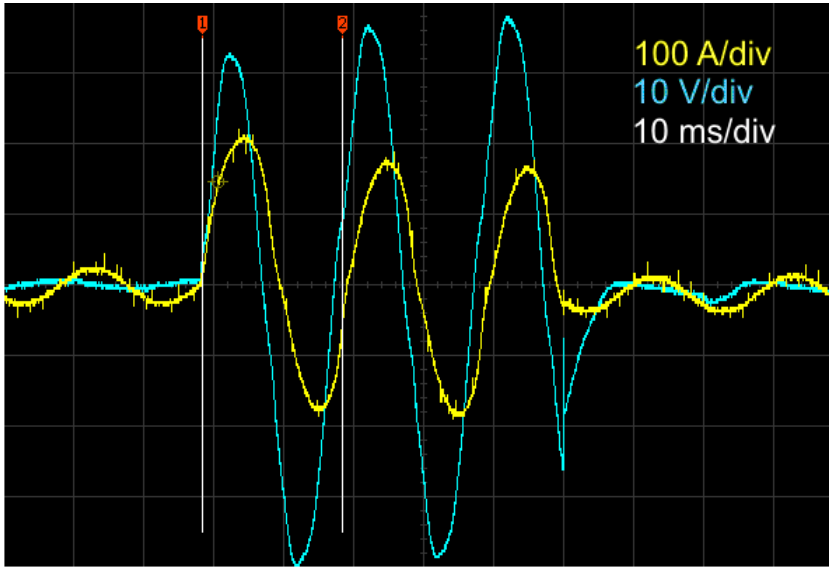


Rys. 7.3 Porównanie przebiegów eksperymentalnych z wynikami badań modeli numerycznych dla przypadku 1A przy $U_s = 40 V$: a) prąd zwarciowy (w uzwojeniu pierwotnym), b) napięcie na ograniczniku

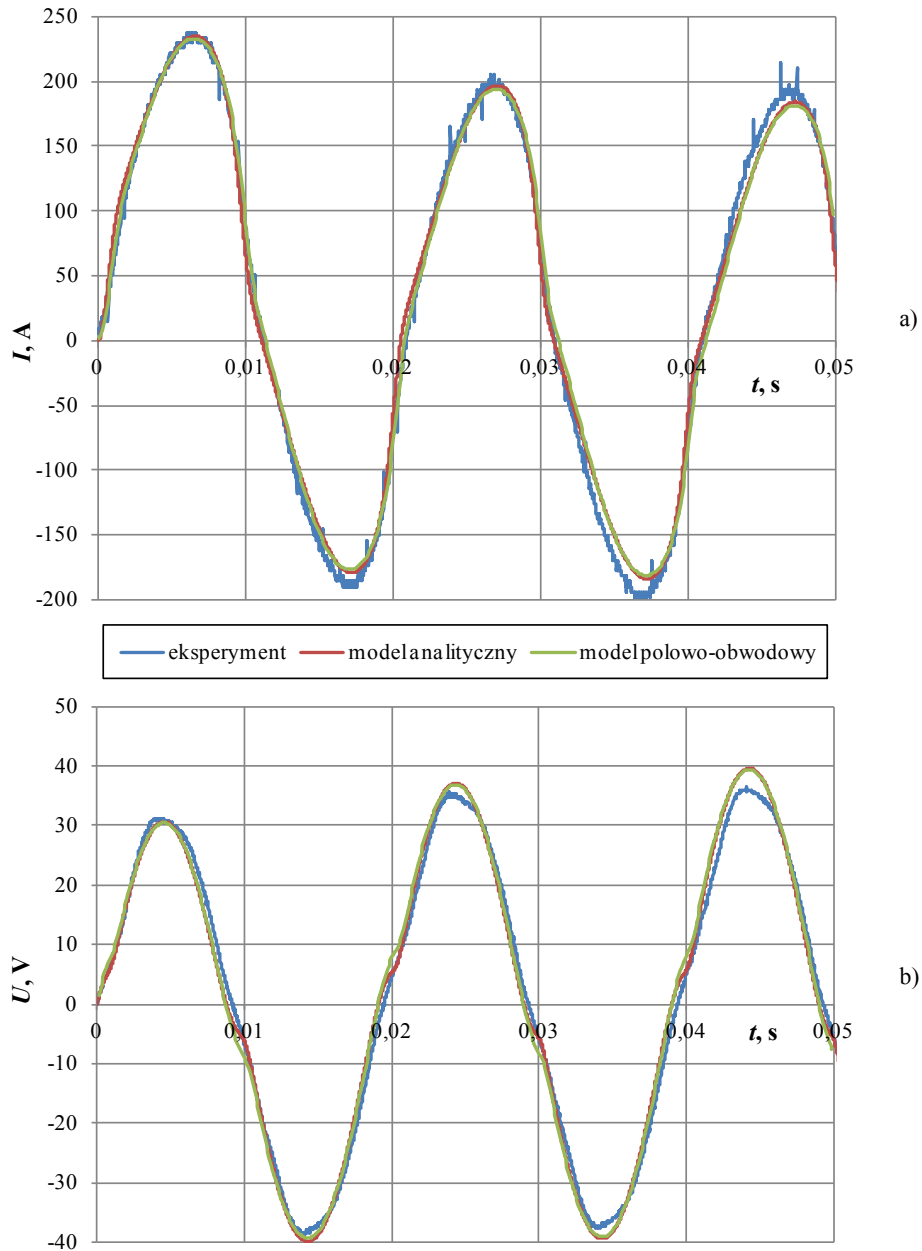


Rys. 7.4 Przebiegi uzyskane w badaniach modeli numerycznych dla konfiguracji 1A przy $U_s = 40$ V: a) przebieg prądu wtórnego, b) zmiany rezystancji uzwojenia pierwotnego miedzianego i wtórnego HTS oraz c) zmiany temperatury uzwojeń

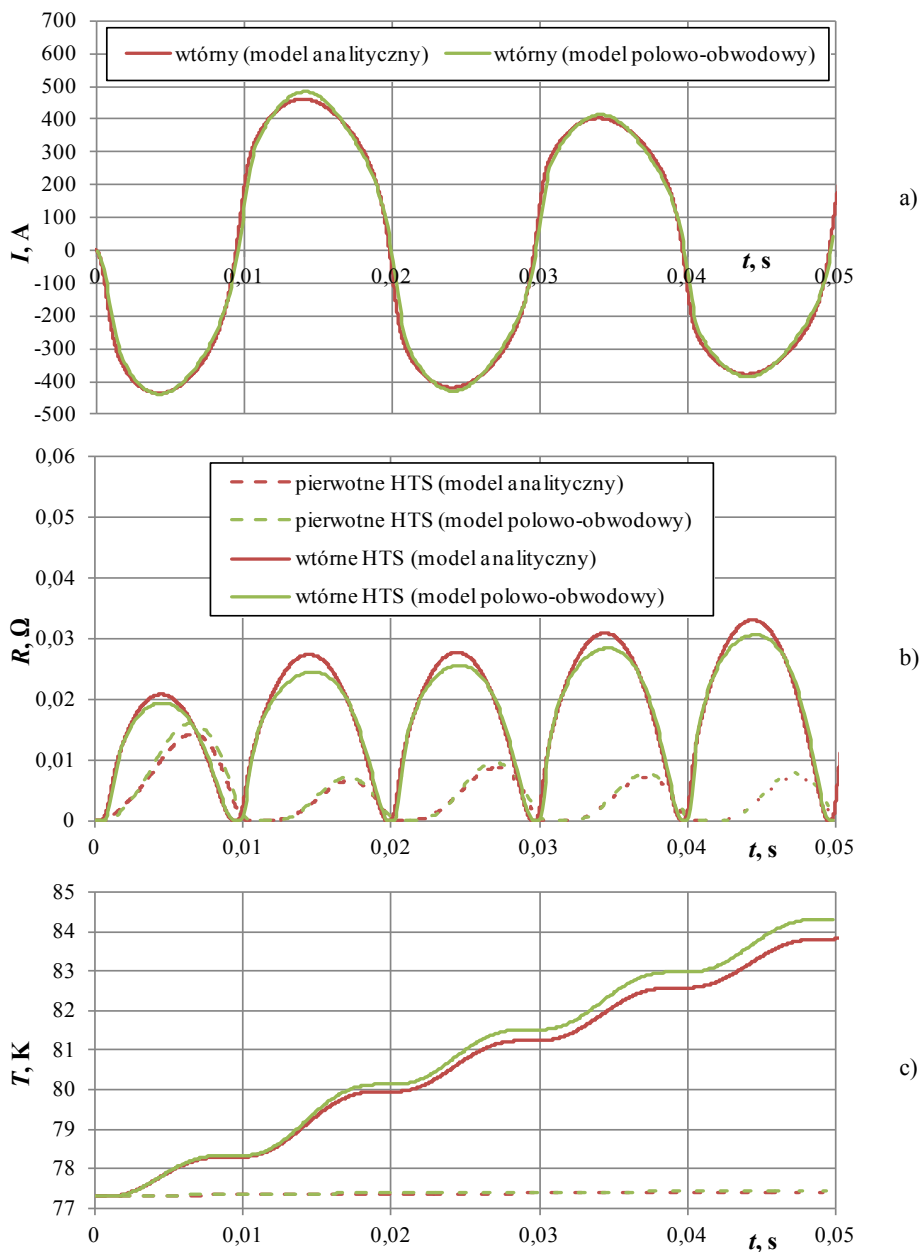
Na Rys. 7.5 przedstawiono oscylogram otrzymany w wyniku badania konfiguracji 2A. Rys. 7.6 obrazuje porównanie przebiegów eksperymentalnych z wynikami uzyskanymi w badaniach modeli numerycznych, natomiast Rys. 7.7 przebieg prądu wtórnego, zmiany rezystancji i temperatury uzwojeń podczas zwarcia uzyskane w badaniach modeli numerycznych.



Rys. 7.5 Oscylogram uzyskany dla konfiguracji zwojowej 2A przy $U_s = 40 \text{ V}$

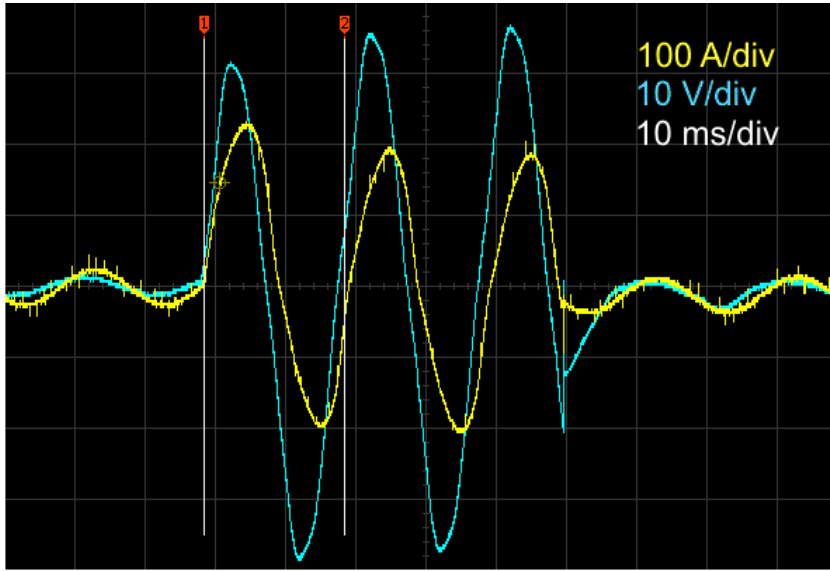


Rys. 7.6 Porównanie przebiegów eksperymentalnych z wynikami badań modeli numerycznych dla konfiguracji 2A przy $U_s = 40$ V: a) prąd zwarciovy (w uzwojeniu pierwotnym), b) napięcie na ograniczniku



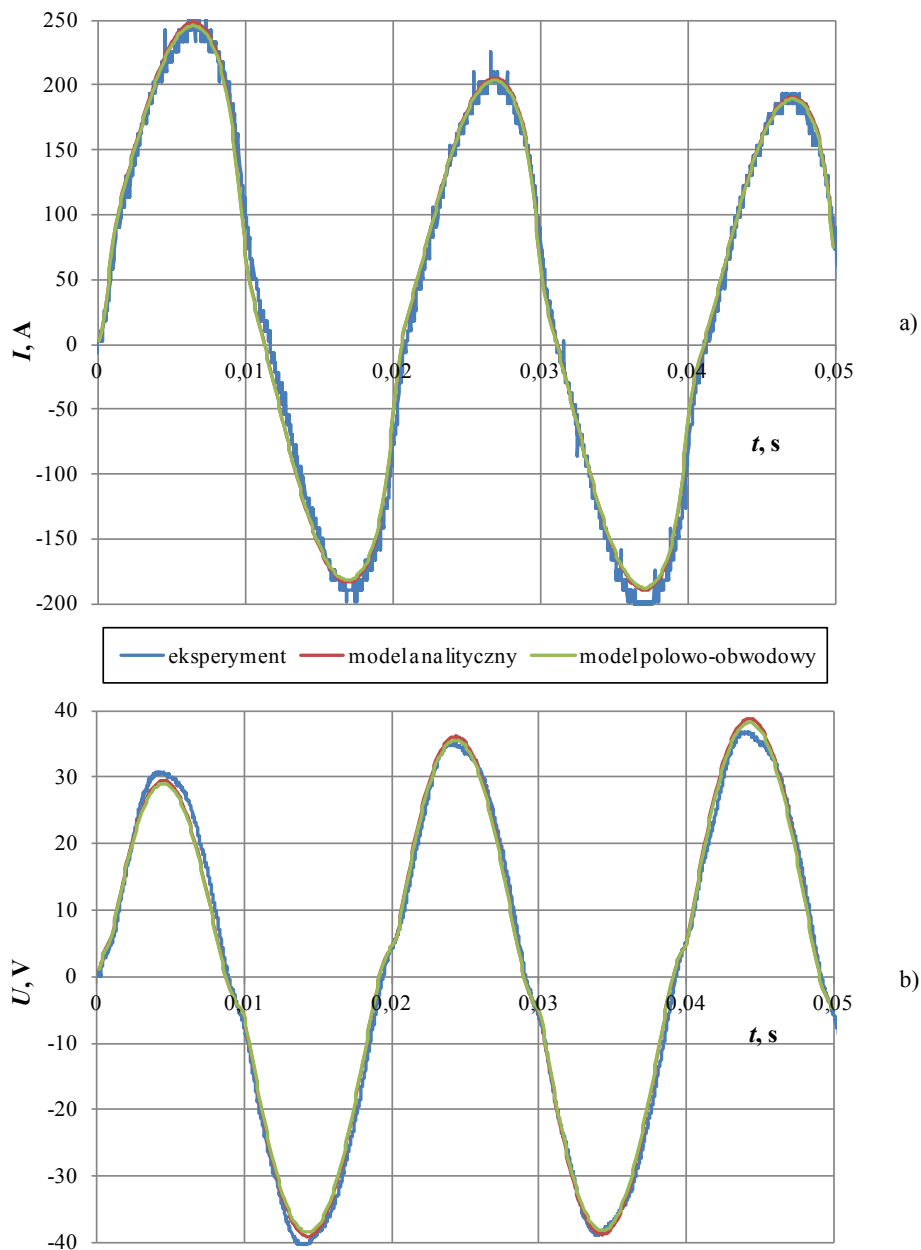
Rys. 7.7 Przebiegi uzyskane w badaniach modeli numerycznych dla konfiguracji 2A przy $U_s = 40$ V: a) prąd wtórny, b) zmiany rezystancji uzwojenia pierwotnego HTS i wtórnego HTS oraz c) zmiany temperatury uzwojeń

Trzecią z analizowanych konfiguracji jest konfiguracja oznaczona jako 3A. Na Rys. 7.8 pokazano oscylogram, natomiast Rys. 7.9 obrazuje porównanie wyników eksperymentalnych z wynikami badań modeli numerycznych.

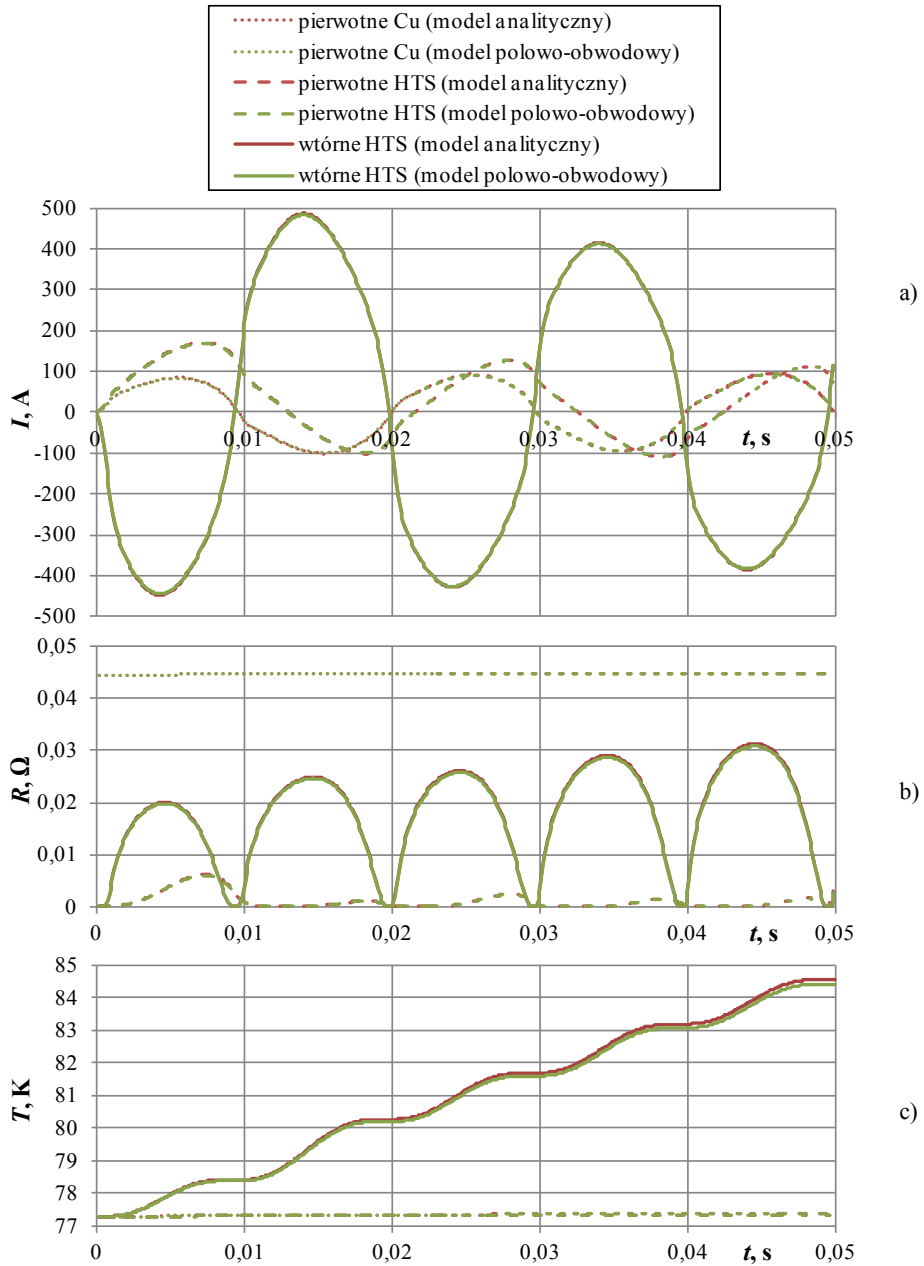


Rys. 7.8 Oscylogram uzyskany dla konfiguracji zwojowej 3A przy $U_s = 40$ V

W przypadku konfiguracji zwojowej 3A, część prądu zwarciovego płynie przez uzwojenie miedziane, a część przez nadprzewodnikowe (Rys. 7.10 a). Zmiany rezystancji uzwojeń w czasie trwania zwarcia oraz zmiany ich temperatury pokazano na Rys. 7.10 odpowiednio: b i c. Wyniki badań modelu analitycznego praktycznie pokrywają się z wynikami badań hybrydowego modelu połowo-obwodowego.



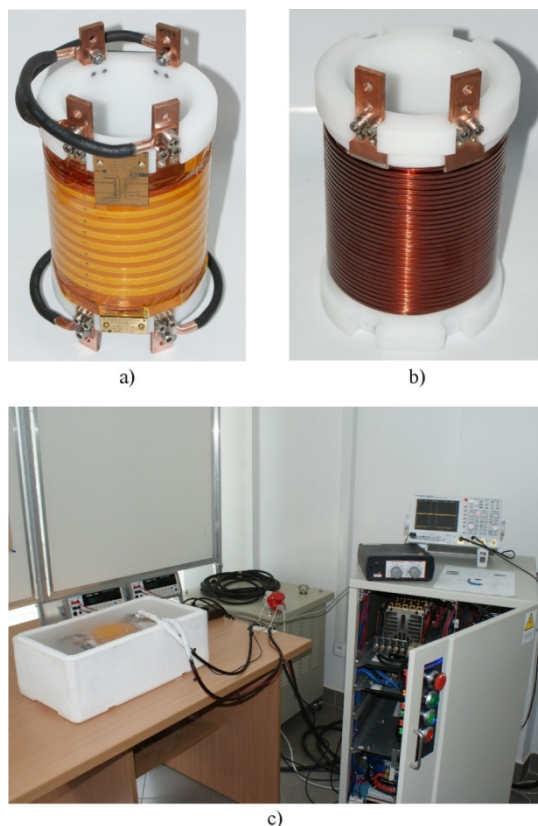
Rys. 7.9 Porównanie przebiegów eksperymentalnych z wynikami badań modeli numerycznych dla przypadku 3A przy $U_s = 40$ V: a) prąd zwarciový (suma prądów w uzwojeniach pierwotnych), b) napięcie na ograniczniku



Rys. 7.10 Przebiegi uzyskane w badaniach modeli numerycznych dla konfiguracji 3A przy $U_s = 40 V$: a) przebiegi prądu w każdym uzwojeniu, b) zmiany rezystancji uzwojeń oraz c) zmiany temperatury uzwojeń

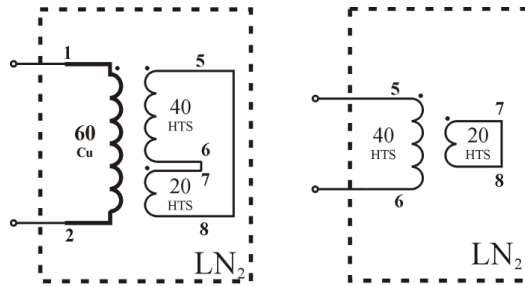
7.2. SFCL typu indukcyjnego z taśmy HTS 2G

SFCL typu indukcyjnego z taśmy HTS drugiej generacji składa się z uzwojenia miedzianego (60 zwojów) oraz trzech uzwojeń HTS (60, 40 i 20 zwojów).



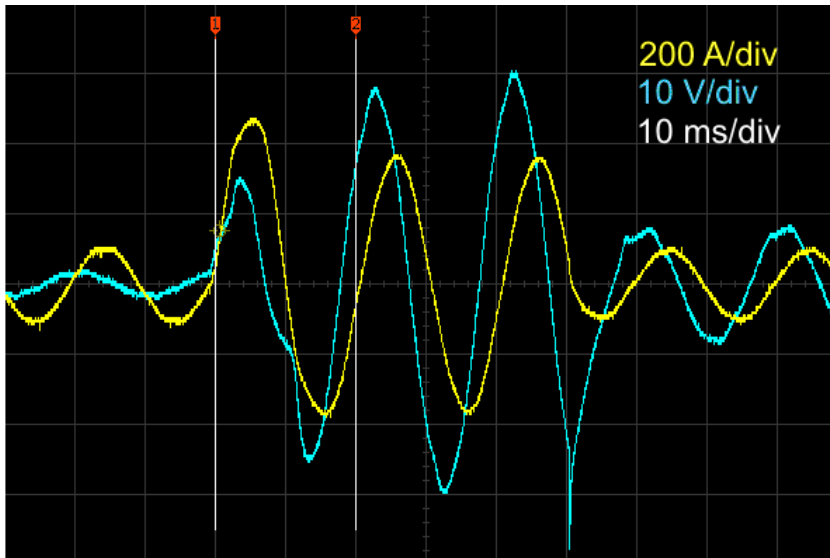
Rys. 7.11 Fotografie przedstawiają: a) SFCL typu indukcyjnego z taśmy HTS drugiej generacji, b) uzwojenie miedziane 60 zwojów znajdujące się pod uzwojeniami nadprzewodnikowymi, c) stanowisko pomiarowe podczas badania ogranicznika

Przebadano dwa układy połączeń (Rys. 7.12), każdy przy napięciu źródła zasilania $U_s = 40$ V. W pierwszym przypadku rolę uzwojenia pierwotnego pełniło uzwojenie miedziane (60 zwojów), natomiast wtórne to połączone szeregowo uzwojenia HTS 40 i 20 zwojów i zwarte. W drugiej konfiguracji rolę uzwojenia pierwotnego pełniła cewka HTS (40 zwojów) natomiast wtórne, zwarte uzwojenie HTS (20 zwojów). Obie konfiguracje (Rys. 7.12) badano w kąpeli ciekłego azotu.

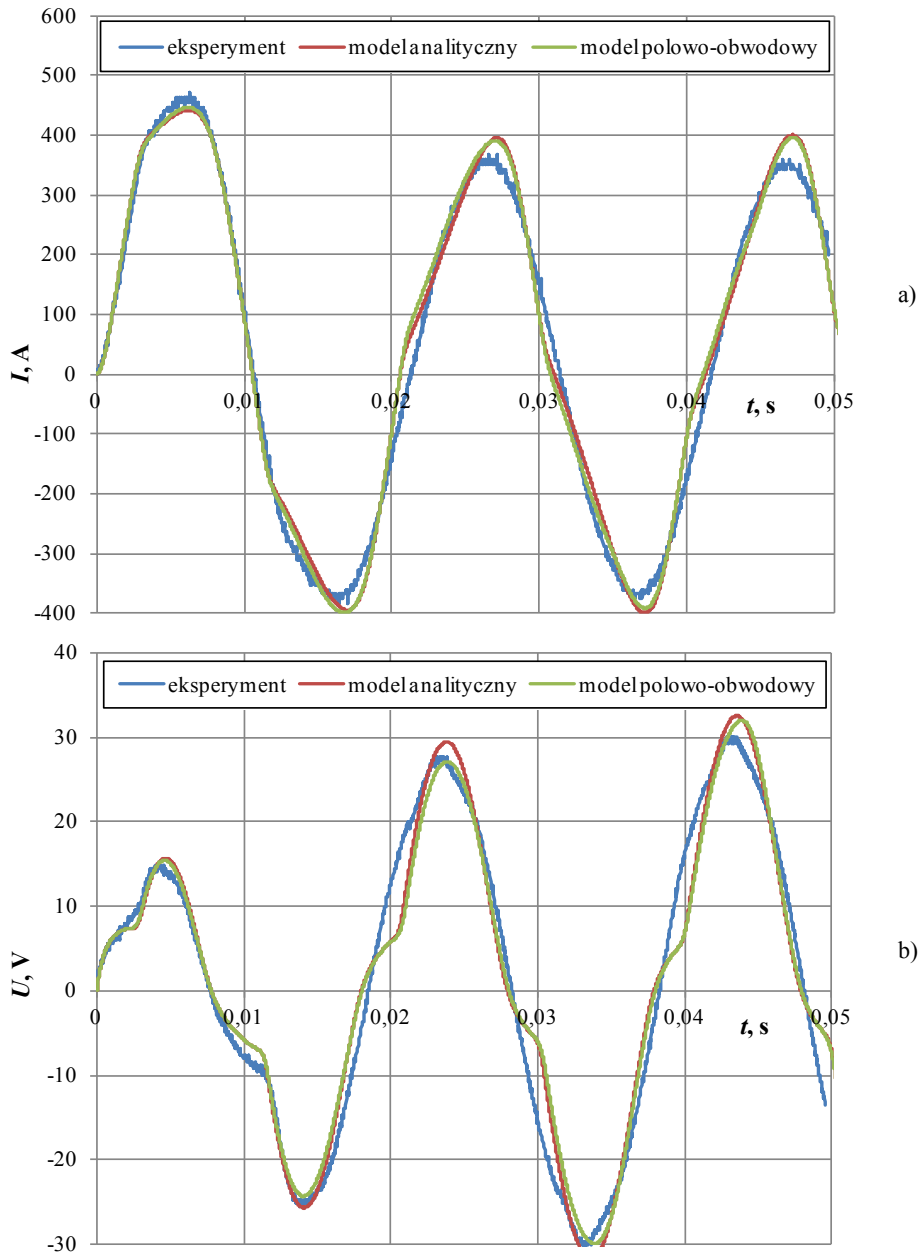


Rys. 7.12 Badane konfiguracje nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu indukcyjnego zbudowanego z taśmy HTS 2G

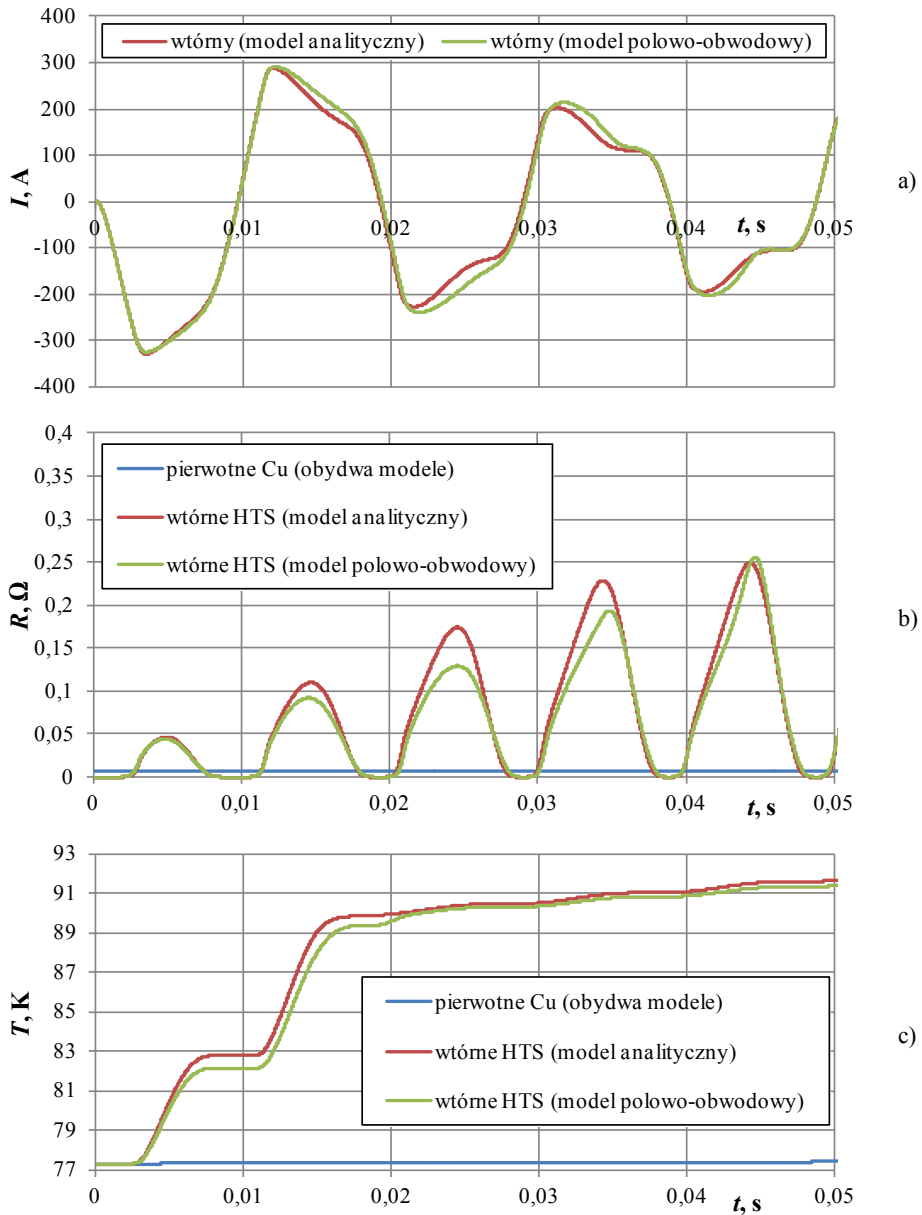
Rezultaty badań eksperymentalnych porównano z wynikami badań z wykorzystaniem opracowanych modeli numerycznych. Rysunek Rys. 7.13 przedstawia oscylogram dla konfiguracji 1B przy napięciu zasilania $U_s = 40$ V, natomiast Rys. 7.14, porównanie rezultatów numerycznych z eksperymentalnych. Na Rys. 7.15 zaprezentowano uzyskany numerycznie przebieg prądu wtórnego oraz zmiany rezystancji i temperatury uzwojeń podczas zwarcia.



Rys. 7.13 Oscylogram uzyskany dla konfiguracji 1B przy $U_s = 40$ V

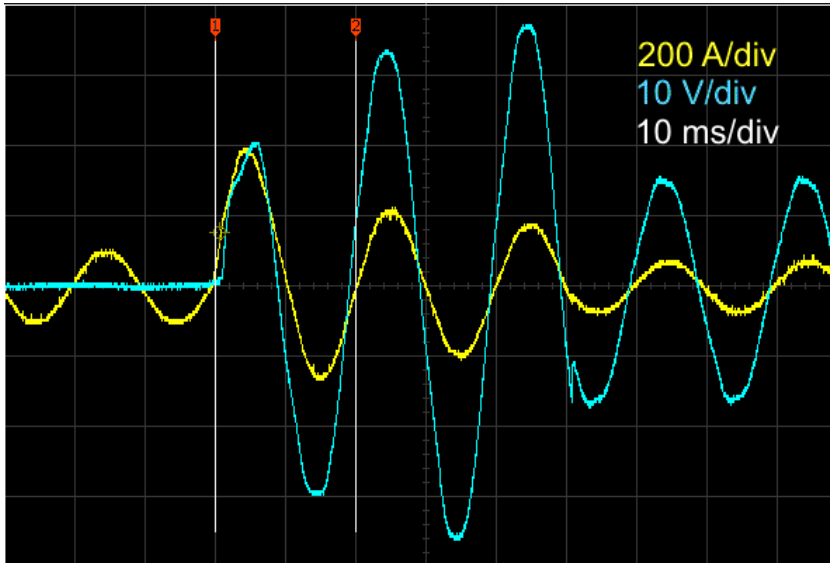


Rys. 7.14 Porównanie przebiegów eksperymentalnych z wynikami badań modeli numerycznych dla konfiguracji zwojowej 1B przy $U_s = 40 V$: a) prąd zwarcia (w uzwojeniu pierwotnym), b) napięcie na ograniczniku

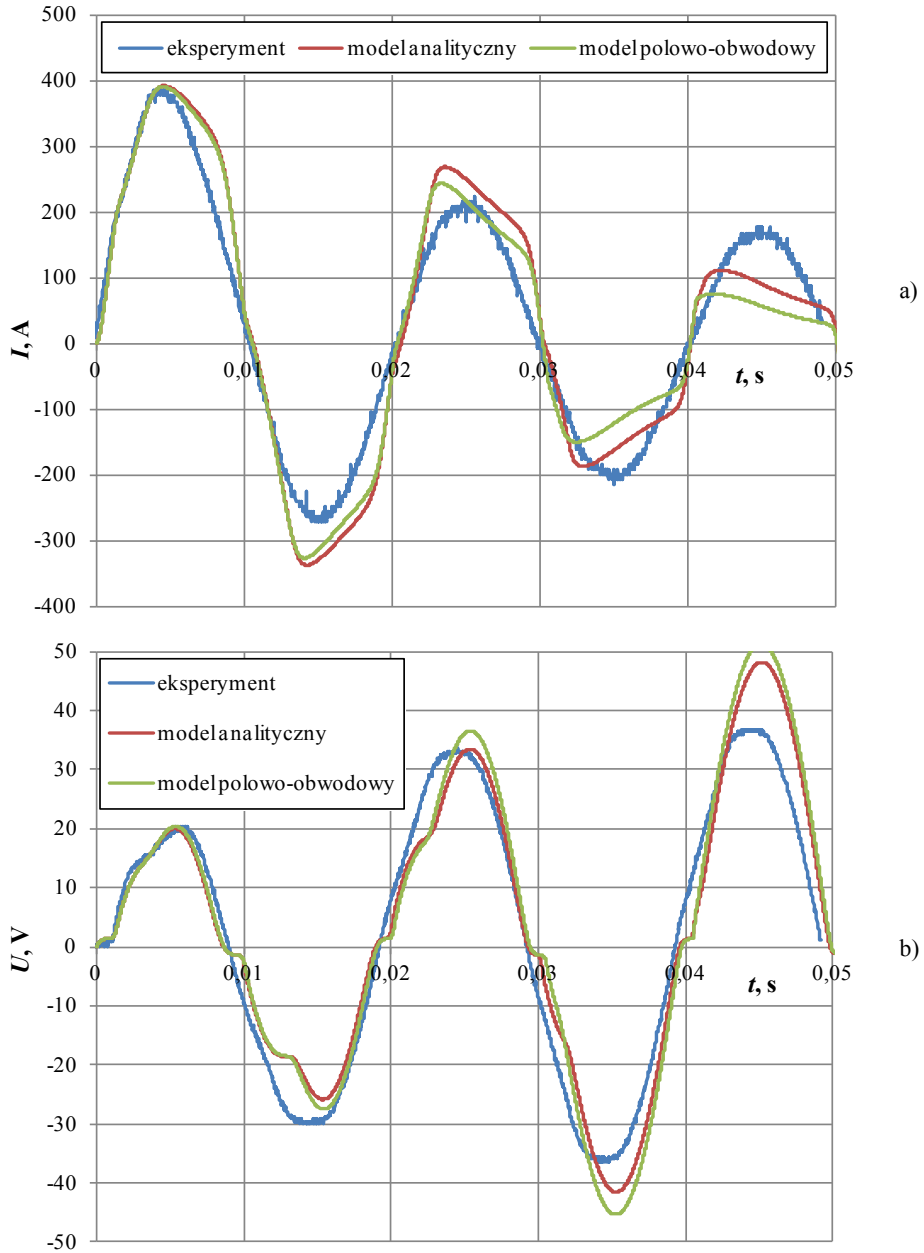


Rys. 7.15 Przebiegi uzyskane w badaniach modeli numerycznych dla konfiguracji 1B przy $U_s = 40$ V: a) prąd wtórny, b) zmiany rezystancji uzwojeń podczas zwarcia oraz c) zmiany temperatury uzwojeń

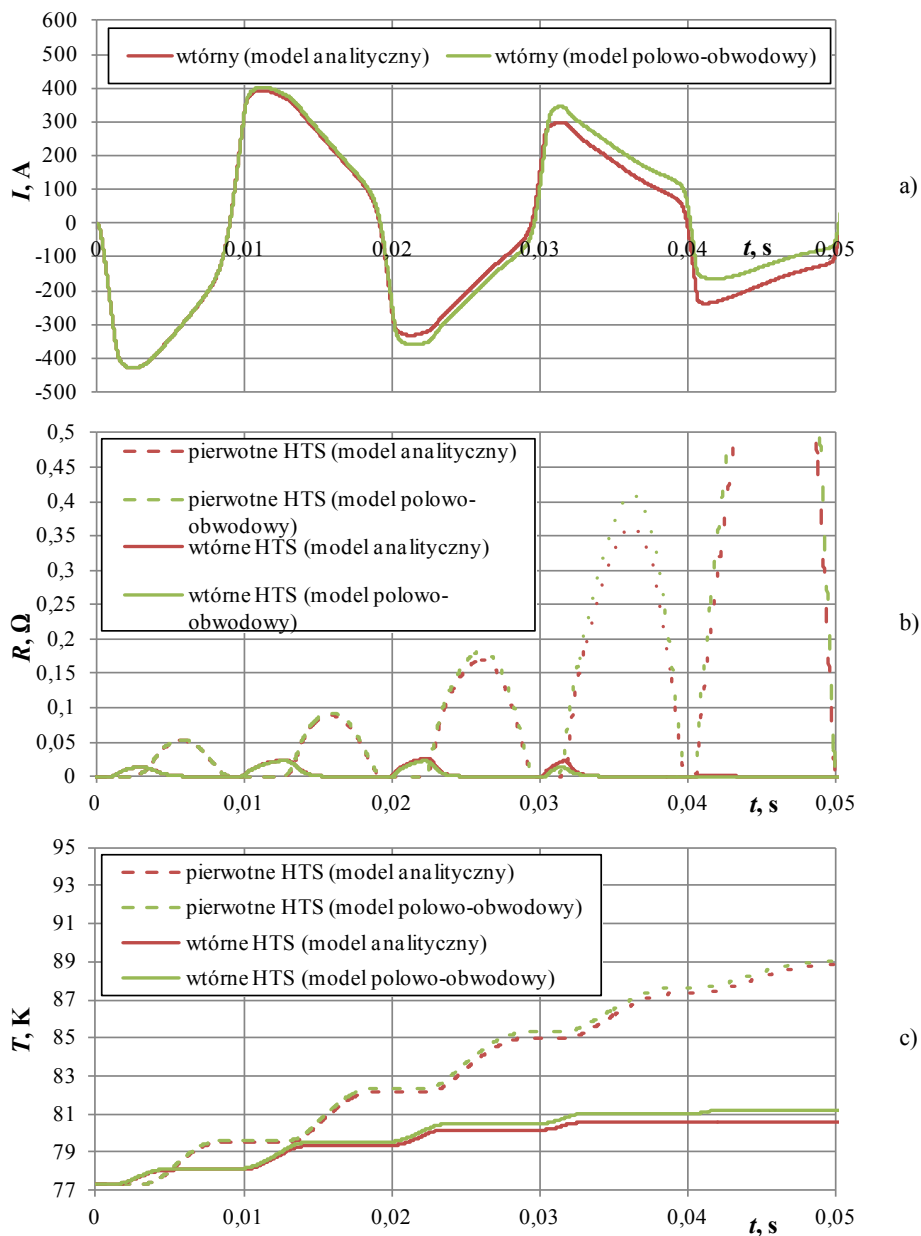
Na Rys. 7.16 pokazano oscylogram uzyskany dla konfiguracji 2B, Rys. 7.17 przedstawia porównanie wyników eksperymentalnych z wynikami uzyskanymi za pomocą modeli numerycznych. Na Rys. 7.18 pokazano, uzyskane z wykorzystaniem modeli numerycznych, przebiegi prądu wtórnego oraz zmiany rezystancji i temperatury uzwojeń ogranicznika.



Rys. 7.16 Oscylogram uzyskany dla konfiguracji 2B przy $U_s = 40$ V



Rys. 7.17 Porównanie przebiegów eksperymentalnych z wynikami badań modeli numerycznych dla konfiguracji 2B przy $U_s = 40$ V: a) prąd zwarcziowy (w uzwojeniu pierwotnym), b) napięcie na ograniczniku



Rys. 7.18 Przebiegi uzyskane w badaniach modli numerycznych dla konfiguracji 2B przy $U_s = 40$ V: a) prąd wtórny, b) zmiany rezystancji uzwojeń podczas zwarcia oraz c) zmiany temperatury uzwojeń

7.3. Podsumowanie badań nadprzewodnikowych ograniczników prądu typu indukcyjnego

Wyniki badań uzyskane z wykorzystaniem zaprezentowanych modeli numerycznych nadprzewodnikowych ograniczników prądu typu indukcyjnego dobrze odwzorowują rzeczywiste przebiegi prądu i napięcia w tych ogranicznikach podczas zwarcia. Najlepszą zgodność wyników eksperymentalnych z wynikami uzyskanymi w badaniach modeli numerycznych można zaobserwować dla SFCL z taśmy 1G HTS. Taśma HSW, z której jest wykonany ogranicznik, ma łagodną charakterystykę $R(i)$ (mały wykładnik n) i słabo się nagrzewa co bardzo nieznacznie wpływa na wzrost rezystancji taśmy po przekroczeniu prądu krytycznego.

W przypadku SFCL z taśmy HTS drugiej generacji charakterystyka $R(i)$ jest bardzo stroma (duży wykładnik n), ponadto taśma SF12050 (2G HTS) szybko się nagrzewa co powoduje dalszy wzrost rezystancji. Nieznaczne różnice pomiędzy przebiegami symulacyjnymi a eksperymentalnymi spowodowane są niejednorodnością w strukturze taśmy SF12050, która na każdym z odcinków długości może mieć mniej lub bardziej stromą charakterystykę $R(i)$ (Rys. 3.7). Ponadto nadwyrężanie, nadmierne zginanie lub skręcanie taśmy podczas budowy ogranicznika może wpływać na powstawanie lokalnych degeneracji nadprzewodnika w wyniku których taśma lokalnie charakteryzuje się mniejszą gęstością prądu krytycznego, co wpływa na wcześniejsze przechodzenie takich miejsc do stanu rezystywnego i szybsze ich nagrzewanie w stosunku do pozostałych fragmentów taśmy.

Modele numeryczne dobrze spełniają swoje zadanie, ponieważ z punktu widzenia nadprzewodnikowego ogranicznika prądu, najbardziej istotne jest ograniczenie pierwszego maksimum prądu, a jak widać na wszystkich zaprezentowanych w rozdziale 7 wykresach porównawczych, zgodność pierwszego maksimum uzyskanego eksperymentalnie z maksimum uzyskanym na podstawie modeli numerycznych jest dobra.

8. Podsumowanie i wnioski końcowe

W rozprawie opisano istotę zjawiska nadprzewodnictwa oraz właściwości fizyczne nadprzewodników Bi-2223 i YBCO. Scharakteryzowano dwa rodzaje taśm nadprzewodnikowych do budowy których użyte zostały te nadprzewodniki oraz wyznaczono charakterystyki $R(i)$ tych taśm. Wyżej wymienione taśmy HTS wykorzystano do budowy nadprzewodnikowych ograniczników prądu zarówno typu rezystancyjnego jak i indukcyjnego.

Opisano zagadnienia związane z modelowaniem nadprzewodnikowych ograniczników prądu. Opracowano uniwersalny numeryczny model analityczny nadprzewodnikowego ogranicznika prądu dowolnego typu wykonanego z taśm pierwszej bądź drugiej generacji. Opracowano hybrydowe, polowo-obwodowe modele numeryczne nadprzewodnikowych ograniczników prądu typu rezystancyjnego i typu indukcyjnego wykonane z taśm HTS pierwszej i drugiej generacji. Analityczny model numeryczny i numeryczne modele hybrydowe pozwalają analizować zjawiska elektromagnetyczne i cieplne w stanach przejściowych w nadprzewodnikowych ogranicznikach prądu. Przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych i numerycznych nadprzewodnikowych ograniczników prądu i ich modeli numerycznych.

Podczas zwarcia, nadprzewodnikowe elementy ograniczników prądu przechodzą do stanu rezystywnego. W zależności od wartości chwilowej prądu wartość rezystancji podlega ciągłym zmianom, ponadto prąd zwarciový powoduje nagrzewanie się elementów nadprzewodnikowych, a w efekcie dalsze narastanie rezystancji, która powoduje ograniczanie prądu zwarciovýgo.

Na etapie projektowania nadprzewodnikowych ograniczników prądu bardzo ważne jest oszacowanie amplitudy i przebiegu prądu zwarciovýgo, przy dowolnych warunkach zwarciových w jakich może pracować ogranicznik. Jest to trudne do przewidzenia z uwagi na nieliniową charakterystykę $R(i)$ taśm HTS. W przypadku nadprzewodnikowych ograniczników prądu typu indukcyjnego, podczas zwarcia zmienia się rezystancja uzwojenia pierwotnego oraz indukcyjność ogranicznika wynikająca z ciągłych zmian rezystancji uzwojenia wtórnego. Trudno określić przebieg prądu wtórnego w zwartym uzwojeniu wtórnym, ponieważ prąd zależy od rezystancji chwilowej uzwojenia wtórnego oraz pośrednio od rezystancji uzwojenia pierwotnego. Ponieważ, nie ma możliwości bezpośredniego pomiaru prądu w zwartym, nadprzewodnikowym uzwojeniu wtórnym, jedynie model numeryczny pozwala określić przebieg takiego prądu, jak i rezystancji uzwojenia wtórnego [17]. Możliwość określenia przebiegu prądu wtórnego jest bardzo istotna ze względu na jego wpływ na pracę ogranicznika, oraz na określenie czasu po którym ogranicznik osiągnie graniczne parametry pracy. Głównym granicznym parametrem pracy jest temperatura, umownie oszacowana na 300 K. Znaczne przekroczenie tej wartości i zbyt długa praca ogranicznika w takich warunkach może spowodować jego nieodwracalne uszkodzenia, takie jak przepalenie się urządzenia czy

degradację (zmniejszenie) wartości krytycznej prądu elementów nadprzewodnikowych [8, 30].

Opracowane i zweryfikowane eksperymentalnie modele numeryczne nadprzewodnikowych ograniczników prądu w pełni pozwalają na określanie zarówno przebiegów prądu jak i zmian temperatury ograniczników podczas zwarcia, co znacznie ułatwia projektowanie nadprzewodnikowych ograniczników prądu, a także przyczynia się do zmniejszenia kosztów z tym związanych, ponieważ eliminuje konieczność budowania wielu prototypowych modeli fizycznych urządzenia nadprzewodnikowego. Zaprezentowane modele numeryczne umożliwiają wirtualne testowanie SFCL w celu zaprojektowania jak najbardziej optymalnej konstrukcji np. pod względem przekładni zwojowej, geometrii uzwojeń czy też z punktu widzenia typu zastosowanej taśmy nadprzewodnikowej.

Reasumując, należy stwierdzić, że cel pracy został osiągnięty, a teza udowodniona.

Za najważniejsze własne osiągnięcia uważam:

- Opracowanie uniwersalnego analitycznego modelu numerycznego służących do wyznaczania zmian prądu i temperatury w SFCL typu rezystancyjnego i SFCL typu indukcyjnego wykonanych z taśm HTS pierwszej i drugiej generacji.
- Rozszyfrowanie algorytmu pracy modułu TM Flux2D i jego współpracy z różnymi plikami pomocniczymi tworzonymi w trakcie obliczeń i plikami tworzonymi na początku cyklu obliczeniowego.
- Rozszyfrowanie architektury plików pomocniczych i formatu przechowywanych w nich danych podczas obliczeń w module TM pakietu Flux2D.
- Opracowanie sposobu sterowania procesem obliczeniowy modułu TM pakietu Flux2D poprzez wprowadzane, z zewnątrz, zmiany w plikach pomocniczych.
- Napisanie programu zarządzającego, sterującego obliczeniami w module TM pakietu Flux2D.
- Opracowanie hybrydowych połowo-obwodowych, cieplnych i elektromagnetycznych modeli numerycznego służących do wyznaczania zmian prądu, napięcia, rezystancji, temperatury i innych wielkości podczas pracy SFCL typu rezystancyjnego i SFCL typu indukcyjnego wykonanych z taśm HTS pierwszej i drugiej generacji.
- Współdziałanie w budowie nadprzewodnikowych ograniczników prądu typu rezystancyjnego i typu indukcyjnego oraz przeprowadzenie badań eksperymentalnych koniecznych do weryfikacji poprawności opracowanych modeli numerycznych.

Opracowane hybrydowe modele numeryczne mogą być także stosowane w zagadnieniach wychodzących poza ramy rozprawy, a mianowicie do modelowania transformatorów nadprzewodnikowych. Opracowany sposób sterowania procesem obliczeniowym modułu TM pakietu Flux2D pozwala na budowanie modeli numerycznych dowolnych urządzeń elektrycznych, również konwencjonalnych, pracujących w obwodach elektrycznych, i analizowanie w tych urządzeniach zjawisk polowych elektromagnetycznych i cieplnych.

9. Literatura

1. Baldan C. A., Lamas J. S., Shigue C. Y., Filho E. R.: *Test of a modular fault current limiter for 220 V line using YBCO coated conductor tapes with shunt protection*. IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 21, nr 2, str. 1242-1245, 2011.
2. Bolkowski S.: *Teoria obwodów elektrycznych*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2001.
3. Chang K. S., Park D. K., Yang S. E., Kim Y. J., Chu S. Y., Ahn M. C., Ko T. K.: *Characteristic comparison of the superconducting fault current limiter with various bypass reactors*. IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 20, nr 3, str. 1190-1193, 2010.
4. Choi S., Kim Y. J., Chang K. S., Jang J. Y., Lee S., Ko T. K.: *Temperature characteristic of high-TC conductor by numerical method when a fault current flows*. IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 21, nr 2, str. 1233-1237, 2011.
5. Chorowski M.: *Kriogenika. Podstawy i zastosowania*. IPPU MASTA, Gdańsk 2007.
6. Cryogenic Technologies Group [dostęp 11 Maja 2012]:
http://cryogenics.nist.gov/MPropsMAY/Polyimide%20Kapton/PolyimideKapton_rev.htm
7. Cyrot M., Pavuna D., : *Wstęp do nadprzewodnictwa*. Wydawnictwo Naukowe PWN, 1996.
8. Du H., Kim Y., Lee D., Han B., Song S., Kim M., Han S.: *Study on maximum operating condition of resistive type SFCL using YBCO coated conductor*. IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 20, nr 3, str. 1238-1241, 2010.
9. Duckworth R. C.: *Contact resistance and normal zone formation in coated Yttrium Barium Copper Oxide superconductors*. Praca doktorska, University of Wisconsin-Madison, 2001.
10. Friend C. M., Wellstood C., Vazquez D., Maher E.: *Variable-temperature critical current measurements on YBaCuO coated conductors*. Supercond. Sci. Technol., vol. 16, str. 65-70, 2003.
11. Grilli F.: *Numerical modelling of high temperature superconducting tapes and cables*. Università degli Studi di Genova, Lausanne, EPFL, 2004.

12. Ishiyama A., Murakami H., Tsuchiya M., Ueda H., Kato H., Nara K., Shiohara Y.: *Vizualization of normal-zone initiation and propagation using fluorescent paints*. Journal of Physics: Conference Series 97, 2008.
13. Janowski T., Głowacki B. A., Wojtasiewicz G., Kozak S., Kozak J., Kondratowicz-Kucewicz B., Majka M., Wozniak M.: *Fault current limitation in power network by the superconducting transformers made of 2G HTS*. IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 21, nr 3, str. 1413-1416, 2011.
14. 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 Trans. Appl. Supercond., vol. 19, nr 3, str. 1884-1887, 2009.
15. Kacejko P., Machowski J.: *Zwarcia w systemach elektroenergetycznych*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2002.
16. Kafarski M.: *Konstrukcje i funkcjonalność nadprzewodnikowych ograniczników prądu*. Creativetime, Kraków 2011.
17. Kafarski M.: *Prąd w zwartym uzwojeniu wtórnym nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu indukcyjnego*. Prace Instytutu Elektrotechniki, zeszyt 248, str. 51-60, 2010.
18. Kalsi S.S., *Applications of high temperature superconductors to electric power equipment*. A John Wiley & Sons Inc. Publication, 2010.
19. Kozak J.: *Analiza skuteczności działania nadprzewodnikowych ograniczników prądu typu indukcyjnego z rdzeniem bezjarmowym*. Praca doktorska, Lublin 2005.
20. 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 Trans. Appl. Supercond., vol. 21, nr 3, str. 1303-1306, 2011.
21. Kozak S.: *Modelowanie elektrycznych urządzeń nadprzewodnikowych*. Prace Instytutu Elektrotechniki, zeszyt 221, 2005.
22. Kozak S., Janowski T. i inni: *Experimental and numerical analysis of electrothermal and mechanical phenomena in HTS tube of inductive SFCL*. IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 16, nr 2, str. 711-714, 2006.
23. Kozak S., Janowski T., Wojtasiewicz G., Kozak J., Kondratowicz-Kucewicz B., Majka M.: *The 15 kV class inductive SFCL*, IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 20, nr 3, str. 1203-1206, 2010.

24. Kwon N. Y., Kim H. S., Kim K. L., Hahn S., Kim H. R., Hyun O. B., Kim H. M., Kim W. S., Park C., Lee H. G.: *The effects of a stabilizer thickness of the YBCO coated conductor (CC) on the quench/recovery characteristics*. IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 20, nr 3, str. 1246-1249, 2010.
25. Lech W.: *Metody chłodzenia elektromagnesów nadprzewodnikowych*. Prace Instytutu Elektrotechniki, zeszyt 125, 1983.
26. Lee P. T.: *Engineering superconductivity*. John Wiley & Sons, 2001.
27. Lee E. R., Park D. K., Jang J. Y., Chang K. S., Chung Y. D., Bac D. K., Ahn M. C., Yoon Y. S., Ko T. K.: *Parameter determination of a condition for simultaneous quench in series-connected YBCO coated conductors*. IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 20, nr 3, str. 1207-1210, 2010.
28. Li X., Rupich M. W., Thieme C. L. H., Teplitsky M., Sathyamourthy S., Thompson E., Buczek D., Schreiber J., DeMoranville K., Lynch J., Inch J., Tucker D., Savoy R., Flesher S.: *The development of second generation HTS wire at American Superconductor*. IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 19, nr 3, str. 3231-3235, 2009.
29. Lu J., Choi E. S., Zhou H. D.: *Physical properties of Hastelloy® C-276™ at cryogenic temperatures*. Journal of Applied Physics 103, 064908, 2008.
30. Majka M.: *Ograniczenia w budowie nadprzewodnikowych ograniczników dużych prądów zwarciovych*. Praca doktorska, Warszawa 2011.
31. Mogilko E., Strelniker Y. M., Burlachkov L., Schlesinger Y., Havlin S.: *Anisotropic characteristics of the energy dissipation In Bi(2223) ceramics and tapes in weak magnetic fields*. Physica C, vol. 372-37, nr 2, str. 960-962, 2002.
32. Nguyen N. T., Tixador P.: *A YBCO-coated conductor for a fault current limiter: architecture influences and optical study*. Supercond. Sci. Technol., vol. 23, nr 2, 025008, 2010.
33. Parida B.: *DC electric al resistivity studies in bulk YBCO/Ag composites*. A report submitted to Department of Physics National Institute of Technology, Rourkela.
34. Polak M., Barnes P. N., Mozola P., Levin G. A.: *Critical current in YBCO coated conductors in the presence of a macroscopic defect*. IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 19, nr 3, str. 2921-2924, 2009.
35. Rogalla H., Kes P. H.: *100 years of superconductivity*. Taylor & Francis Group, 2012.
36. Rose-Innes A.C., Rhoderick E.H.: *Nadprzewodnictwo*. PWN, Warszawa, 1973.

37. Rostilla L.: *Electromagnetic design of superconducting coated conductor power cables*. Tampere University of Technology, 2008.
38. Roy F.: *Modeling and characterization of coated conductors applied to the design of superconducting fault current limiters*. Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, 2010.
39. Roy F., Dutoit B., Sirois F., Grilli F.: *2D Magneto-thermal modeling of coated high-temperature superconductors*. Excerpt from the proceedings of the COMSOL users conference Grenoble, 2007.
40. Roy F., Perez S., Therasse M., Dutoit B., Sirois F., Decroux M., Antogazza L.: *Quench propagation in coated conductors for fault current limiters*. Physica C: Superconductivity, vol. 469, nr 15, str. 1462-1466, 2009.
41. Salazar A., Pastor J. Y., Lorca J.: *Fatigue behavior of multifilamentary BSCCO 2223/Ag superconducting tapes*. IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 14, nr 3, str. 1841-1847, 2004.
42. Salvucci V., Ainslie M., Baba J., Morandi A.: *Experimental investigation of quench phenomena in YBCO thin films for SFCL applications*. IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 19, nr 3, str. 1930-1933, 2009.
43. Shigue C. Y., Cruz T. T., Lamas J. S., Baldan C. A., Filho E. R.: *Analysis of the E-J curve of HTS tapes under DC and AC magnetic fields at 77 K*. IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 19, nr 3, str. 3332-3335, 2009.
44. Smith D. R., Fickett F. R.: *Low-Temperature Properties of Silver*. Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, vol. 100, nr 2, str. 119-171, 1995.
45. Sosnowski J.: *Analysis of the electromagnetic losses generation in the high temperature superconductors*. 22nd Seminar IC-SPETO'99, str.129-132, 1999.
46. Stavrev S.: *Modelling of high temperature superconductors for AC power applications*, Lausanne 2002.
47. Suarez P., Alvarez A., Ceballos J. M., Perez B.: *Loss and transition studies of shunted free-stabilized YBCO tape for SFCL applications*. IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 21, nr 2, str. 1267-1270, 2011.
48. SuperPower®2G HTS Wire Specifications: Second-Generation High Temperature Superconductor (2G HTS) [dostęp 11 maja 2012]: http://www.superpower-inc.com/system/files/SP_2G+Wire+Spec+Sheet_for+web_0509.pdf
49. Thomas P.: *Introduction to high-temperature superconductivity*. Plenum Press, New York 1994.

50. Tsarou A.: *Wytworzenie i określenie własności strukturalnych, transportowych i magnetycznych cienkich warstw i heterostruktur o strukturze perowskitu*. Instytut Fizyki PAN, Warszawa, 2008.
51. Van Duzer T., Turner C. W.: *Superconductive devices and circuits*. Prentice Hall PTR, 1999.
52. Wang Y.: *Current distribution and stability of a hybrid superconducting conductors made of LTS/HTS, applications of high-Tc superconductivity*. ISBN: 978-953-307-308-8, InTech, 2011.
53. Zhang G. M., Knoll D. C., Nguyen D. N., Sastry S. and Schwartz J.: *Temperature dependence of critical currents and AC transport losses in (Bi, Pb)₂Sr₂Ca₂Cu₃O_x and YBa₂Cu₃O_y tapes*. Supercond. Sci. Technol., vol. 20, str. 516–521, 2007.
54. Zhang G. M., Lin L. Z., Xiao L. Y., Qiu M., Yu Y. J.: *The angular dependence of AC transport losses for a BSCCO/Ag tapes in DC applied field*. IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 13, nr 2, str. 2972-2975, 2003.

Dodatek A

Celem rozwiązania układu równań (6.10) jest uzyskanie wartości chwilowych napięcia i prądów płynących w każdym z uzwojeń modelowanego ogranicznika prądu (u_1, i_1, i_2, i_3) w zależności od wartości chwilowych prądu obliczonych we wcześniejszym kroku symulacji (i_{11}, i_{22}, i_{33}).

$$\begin{cases} u_1 = i_1 R_1 + L_1 \frac{i_1 - i_{11}}{\Delta t} + M_{12} \frac{i_2 - i_{22}}{\Delta t} + M_{13} \frac{i_3 - i_{33}}{\Delta t} \\ u_1 = i_2 R_2 + L_2 \frac{i_2 - i_{22}}{\Delta t} + M_{12} \frac{i_1 - i_{11}}{\Delta t} + M_{23} \frac{i_3 - i_{33}}{\Delta t} \\ 0 = i_3 R_3 + L_3 \frac{i_3 - i_{33}}{\Delta t} + M_{13} \frac{i_1 - i_{11}}{\Delta t} + M_{23} \frac{i_2 - i_{22}}{\Delta t} \\ u_1 = u_s - i_c R_{zr} - L_{zr} \frac{i_c - i_{cc}}{\Delta t} \end{cases}$$

Proces ręcznego rozwiązywania zaprezentowanego układu równań jest żmudny i bardzo łatwo o pomyłkę, ponadto wyniki końcowe są bardzo rozbudowane. Z tego powodu do rozwiązania autor posłużył się programem Mathematica, który pozwala na oparte na symbolach, analityczne rozwiązywanie równań. Ponadto program zawiera algorytmy umożliwiające upraszczanie i grupowanie czynników w otrzymanych rozwiązaniach, które w tym przypadku wyglądają następująco:

$u_1 =$

$$\begin{aligned} & (i_{33} (L_2 M_{13} - M_{12} (M_{13} + M_{23}) + M_{23} (L_1 + \Delta t R_1) + \Delta t M_{13} R_2) R_3 (L_{zR} + \Delta t R_{zR}) + \\ & i_{22} (-L_{zR} R_2 (M_{13} (-M_{13} + M_{23}) + (L_1 - M_{12} + \Delta t R_1) (L_3 + \Delta t R_3)) + \\ & (-L_2 M_{13}^2 + L_3 (-M_{12}^2 + \Delta t L_2 R_1 + \Delta t M_{12} R_2) - \\ & M_{23} (\Delta t M_{23} R_1 + M_{13} (-2 M_{12} + \Delta t R_2)) + \\ & \Delta t (-M_{12}^2 + \Delta t L_2 R_1 + \Delta t M_{12} R_2) R_3 + L_1 (-M_{23}^2 + L_2 (L_3 + \Delta t R_3))) R_{zR}) + \\ & i_{11} (-L_{zR} R_1 ((M_{13} - M_{23}) M_{23} + (L_2 - M_{12} + \Delta t R_2) (L_3 + \Delta t R_3)) + \\ & (L_3 M_{12} (-M_{12} + \Delta t R_1) - M_{13} (M_{23} (-2 M_{12} + \Delta t R_1) + M_{13} (L_2 + \Delta t R_2)) + \\ & \Delta t M_{12} (-M_{12} + \Delta t R_1) R_3 + L_1 (-M_{23}^2 + (L_2 + \Delta t R_2) (L_3 + \Delta t R_3))) R_{zR}) - \\ & (-L_2 M_{13}^2 + 2 M_{12} M_{13} M_{23} - \Delta t M_{23}^2 R_1 - \Delta t M_{13}^2 R_2 + L_3 (-M_{12}^2 + \Delta t R_1 (L_2 + \Delta t R_2)) + \\ & \Delta t (-M_{12}^2 + \Delta t R_1 (L_2 + \Delta t R_2)) R_3 + L_1 (-M_{23}^2 + (L_2 + \Delta t R_2) (L_3 + \Delta t R_3))) \\ & u_s) / (2 L_3 L_{zR} M_{12} + L_3 M_{12}^2 + L_{zR} M_{13}^2 - 2 L_{zR} M_{13} M_{23} - 2 M_{12} M_{13} M_{23} + \\ & L_{zR} M_{23}^2 - \Delta t L_3 L_{zR} R_1 + \Delta t M_{23}^2 R_1 - \Delta t L_3 L_{zR} R_2 + \Delta t M_{13}^2 R_2 - \Delta t^2 L_3 R_1 R_2 + \\ & 2 \Delta t L_{zR} M_{12} R_3 + \Delta t M_{12}^2 R_3 - \Delta t^2 L_{zR} R_1 R_3 - \Delta t^2 L_{zR} R_2 R_3 - \Delta t^3 R_1 R_2 R_3 + \\ & \Delta t ((M_{13} - M_{23})^2 + (2 M_{12} - \Delta t (R_1 + R_2)) (L_3 + \Delta t R_3)) R_{zR} - \\ & L_2 (-M_{13}^2 + (L_3 + \Delta t R_3) (L_{zR} + \Delta t (R_1 + R_{zR}))) - \\ & L_1 (-M_{23}^2 + (L_3 + \Delta t R_3) (L_2 + L_{zR} + \Delta t (R_2 + R_{zR}))) \end{aligned}$$

$$i_1 =$$

$$\begin{aligned}
& - (i_{11} (-2 L_3 L_{ZR} M_{12} - L_3 M_{12}^2 - L_{ZR} M_{13}^2 + 2 L_{ZR} M_{13} M_{23} + 2 M_{12} M_{13} M_{23} - L_{ZR} M_{23}^2 + \\
& \quad \Delta t L_3 L_{ZR} R_2 - \Delta t M_{13}^2 R_2 - 2 \Delta t L_{ZR} M_{12} R_3 - \Delta t M_{12}^2 R_3 + \Delta t^2 L_{ZR} R_2 R_3 + \\
& \quad L_2 (-M_{13}^2 + L_{ZR} (L_3 + \Delta t R_3)) - \Delta t (M_{13} (M_{13} - M_{23}) + M_{12} (L_3 + \Delta t R_3)) R_{ZR} + \\
& \quad L_1 (-M_{23}^2 + (L_3 + \Delta t R_3) (L_2 + L_{ZR} + \Delta t (R_2 + R_{ZR})))) + \\
& \Delta t \\
& \quad (i_{22} (R_2 (-M_{13} M_{23} + (L_{ZR} + M_{12}) (L_3 + \Delta t R_3)) + \\
& \quad \quad (M_{23} (-M_{13} + M_{23}) - (L_2 - M_{12}) (L_3 + \Delta t R_3)) R_{ZR}) + \\
& \quad i_{33} R_3 (L_2 M_{13} + L_{ZR} (M_{13} - M_{23}) + \Delta t M_{13} (R_2 + R_{ZR}) - M_{23} (M_{12} + \Delta t R_{ZR})) + \\
& \quad \quad ((M_{13} - M_{23}) M_{23} + (L_2 - M_{12} + \Delta t R_2) (L_3 + \Delta t R_3)) u_S) / \\
& (2 L_3 L_{ZR} M_{12} + L_3 M_{12}^2 + L_{ZR} M_{13}^2 - 2 L_{ZR} M_{13} M_{23} - 2 M_{12} M_{13} M_{23} + L_{ZR} M_{23}^2 - \\
& \quad \Delta t L_3 L_{ZR} R_1 + \Delta t M_{23}^2 R_1 - \Delta t L_3 L_{ZR} R_2 + \Delta t M_{13}^2 R_2 - \Delta t^2 L_3 R_1 R_2 + \\
& \quad 2 \Delta t L_{ZR} M_{12} R_3 + \Delta t M_{12}^2 R_3 - \Delta t^2 L_{ZR} R_1 R_3 - \Delta t^2 L_{ZR} R_2 R_3 - \Delta t^3 R_1 R_2 R_3 + \\
& \quad \Delta t ((M_{13} - M_{23})^2 + (2 M_{12} - \Delta t (R_1 + R_2)) (L_3 + \Delta t R_3)) R_{ZR} - \\
& \quad L_2 (-M_{13}^2 + (L_3 + \Delta t R_3) (L_{ZR} + \Delta t (R_1 + R_{ZR}))) - \\
& \quad L_1 (-M_{23}^2 + (L_3 + \Delta t R_3) (L_2 + L_{ZR} + \Delta t (R_2 + R_{ZR}))))
\end{aligned}$$

$$i_2 =$$

$$\begin{aligned}
& - (i_{22} (-2 L_3 L_{ZR} M_{12} - L_3 M_{12}^2 - L_{ZR} M_{13}^2 + 2 L_{ZR} M_{13} M_{23} + 2 M_{12} M_{13} M_{23} - L_{ZR} M_{23}^2 + \\
& \quad \Delta t L_3 L_{ZR} R_1 - \Delta t M_{23}^2 R_1 - 2 \Delta t L_{ZR} M_{12} R_3 - \Delta t M_{12}^2 R_3 + \Delta t^2 L_{ZR} R_1 R_3 + \\
& \quad L_1 (-M_{23}^2 + (L_2 + L_{ZR}) (L_3 + \Delta t R_3)) - \\
& \quad \Delta t (M_{23} (-M_{13} + M_{23}) + M_{12} (L_3 + \Delta t R_3)) R_{ZR} + \\
& \quad L_2 (-M_{13}^2 + (L_3 + \Delta t R_3) (L_{ZR} + \Delta t (R_1 + R_{ZR})))) + \\
& \Delta t (-i_{33} R_3 (M_{12} M_{13} + L_{ZR} (M_{13} - M_{23}) - M_{23} (L_1 + \Delta t R_1) + \Delta t (M_{13} - M_{23}) R_{ZR}) + \\
& \quad i_{11} (R_1 (-M_{13} M_{23} + (L_{ZR} + M_{12}) (L_3 + \Delta t R_3)) + \\
& \quad \quad (M_{13} (M_{13} - M_{23}) - (L_1 - M_{12}) (L_3 + \Delta t R_3)) R_{ZR}) + \\
& \quad \quad (M_{13} (-M_{13} + M_{23}) + (L_1 - M_{12} + \Delta t R_1) (L_3 + \Delta t R_3)) u_S) / \\
& (2 L_3 L_{ZR} M_{12} + L_3 M_{12}^2 + L_{ZR} M_{13}^2 - 2 L_{ZR} M_{13} M_{23} - 2 M_{12} M_{13} M_{23} + L_{ZR} M_{23}^2 - \\
& \quad \Delta t L_3 L_{ZR} R_1 + \Delta t M_{23}^2 R_1 - \Delta t L_3 L_{ZR} R_2 + \Delta t M_{13}^2 R_2 - \Delta t^2 L_3 R_1 R_2 + \\
& \quad 2 \Delta t L_{ZR} M_{12} R_3 + \Delta t M_{12}^2 R_3 - \Delta t^2 L_{ZR} R_1 R_3 - \Delta t^2 L_{ZR} R_2 R_3 - \Delta t^3 R_1 R_2 R_3 + \\
& \quad \Delta t ((M_{13} - M_{23})^2 + (2 M_{12} - \Delta t (R_1 + R_2)) (L_3 + \Delta t R_3)) R_{ZR} - \\
& \quad L_2 (-M_{13}^2 + (L_3 + \Delta t R_3) (L_{ZR} + \Delta t (R_1 + R_{ZR}))) - \\
& \quad L_1 (-M_{23}^2 + (L_3 + \Delta t R_3) (L_2 + L_{ZR} + \Delta t (R_2 + R_{ZR}))))
\end{aligned}$$

$i_3 =$

$$\begin{aligned}
& (i_{33} (2 L_3 L_{ZR} M_{12} + L_3 M_{12}^2 + L_{ZR} M_{13}^2 - 2 L_{ZR} M_{13} M_{23} - 2 M_{12} M_{13} M_{23} + L_{ZR} M_{23}^2 - \\
& \quad \Delta t L_3 L_{ZR} R_1 + \Delta t M_{23}^2 R_1 - \Delta t L_3 L_{ZR} R_2 + \Delta t M_{13}^2 R_2 - \Delta t^2 L_3 R_1 R_2 + \\
& \quad \Delta t ((M_{13} - M_{23})^2 + L_3 (2 M_{12} - \Delta t (R_1 + R_2))) R_{ZR} - \\
& \quad L_2 (-M_{13}^2 + L_3 (L_{ZR} + \Delta t (R_1 + R_{ZR}))) - \\
& \quad L_1 (-M_{23}^2 + L_3 (L_2 + L_{ZR} + \Delta t (R_2 + R_{ZR})))) - \\
& \Delta t \\
& (i_{11} (R_1 (L_2 M_{13} + L_{ZR} (M_{13} - M_{23}) - M_{12} M_{23} + \Delta t M_{13} R_2) + \\
& \quad (L_2 M_{13} + L_1 M_{23} - M_{12} (M_{13} + M_{23}) + \Delta t M_{13} (R_1 + R_2)) R_{ZR}) + \\
& \quad i_{22} (- (M_{12} M_{13} + L_{ZR} (M_{13} - M_{23}) - M_{23} (L_1 + \Delta t R_1)) R_2 + \\
& \quad (L_2 M_{13} - M_{12} (M_{13} + M_{23}) + M_{23} (L_1 + \Delta t (R_1 + R_2))) R_{ZR}) - \\
& \quad (L_2 M_{13} - M_{12} (M_{13} + M_{23}) + M_{23} (L_1 + \Delta t R_1) + \Delta t M_{13} R_2) u_S) / \\
& (2 L_3 L_{ZR} M_{12} + L_3 M_{12}^2 + L_{ZR} M_{13}^2 - 2 L_{ZR} M_{13} M_{23} - 2 M_{12} M_{13} M_{23} + L_{ZR} M_{23}^2 - \\
& \quad \Delta t L_3 L_{ZR} R_1 + \Delta t M_{23}^2 R_1 - \Delta t L_3 L_{ZR} R_2 + \Delta t M_{13}^2 R_2 - \Delta t^2 L_3 R_1 R_2 + \\
& \quad 2 \Delta t L_{ZR} M_{12} R_3 + \Delta t M_{12}^2 R_3 - \Delta t^2 L_{ZR} R_1 R_3 - \Delta t^2 L_{ZR} R_2 R_3 - \Delta t^3 R_1 R_2 R_3 + \\
& \quad \Delta t ((M_{13} - M_{23})^2 + (2 M_{12} - \Delta t (R_1 + R_2)) (L_3 + \Delta t R_3)) R_{ZR} - \\
& \quad L_2 (-M_{13}^2 + (L_3 + \Delta t R_3) (L_{ZR} + \Delta t (R_1 + R_{ZR}))) - \\
& \quad L_1 (-M_{23}^2 + (L_3 + \Delta t R_3) (L_2 + L_{ZR} + \Delta t (R_2 + R_{ZR}))))
\end{aligned}$$

Dodatek B

```
//-----  
#include <vcl.h>  
#include <string.h>  
#include <iostream.h>  
#include <fstream>  
#include <stdio.h>  
#include <math.h>  
#include "shlwapi.h"  
  
#pragma hdrstop  
#include "program.h"  
  
#pragma package(smart_init)  
#pragma resource "*.dfm"  
//-----  
//===== deklaracje zmiennych globalnych =====  
string sciezka_dost = "E:\\Dokumenty\\Flux_projects\\";  
string sciezka_dost_moj_kat = "E:\\Dokumenty\\Flux_projects\\dane\\";  
string nazwa_proj = "ogr_1G_H_3";  
int ile_do_mod;  
float chlodzenie[2][50]; // intensywnosc chlodzenia  
int linie_w_int_chlodz=0;  
float cv_Cu[2][300]; // cieplo wlasciwe miedzi  
int linie_w_cv_Cu=0;  
float cv_HTS_1G[2][300]; // cieplo wlasciwe HTS 1G  
int linie_w_cv_HTS_1G=0;  
float cv_HTS_2G[2][300]; // cieplo wlasciwe HTS 2G  
int linie_w_cv_HTS_2G=0;  
int wers_do_mod_w_CIP[20];  
int wers_do_mod_w_CIR[20];  
float T_azotu = 77.3, T1, T2;  
int ile_linii_w_CIR=0;  
float tablica_CIR[4][20]; // do wczytywania pliku CIR bez pierwszej  
linijki  
float ivots, tlc; // krok czasowy, czas symulacji  
int mnots, tlc_ivots; /* maksymalna liczba krokow czasowych  
i obliczona liczba krokow symulacji */  
  
struct DANE_WEJSCIOWE{  
    string uzw[2][20];  
    float parametry[6][20];  
    bool Cv_zalezy_od_T[20];  
};  
  
struct DANE_OBLICZANE{  
    string uzw[20];  
    float parametry[4][20];  
};  
  
DANE_WEJSCIOWE dane_ogr;  
DANE_OBLICZANE dane_krokowe;  
DANE_WEJSCIOWE zmiana_kolejnosci;  
//===== WCZYTYWANIE DANYCH WEJSCIOWYCH =====  
int wczyt_dane_wejsc(){  
    string nazwa = sciezka_dost_moj_kat+nazwa_proj+"_start.txt";  
    char sciezka[300];  
    strcpy(sciezka, nazwa.c_str());
```

```

fstream plik;
plik.open(sciezka);
string pierwsza_linia;
getline(plik, pierwsza_linia);
    for(int a=0; a<=19; a++){
        dane_ogr.parametry[0][a]=0;
    }
    int a=0;
    while(!plik.eof()){
        for(int b=0; b<=1; b++){
            plik >> dane_ogr.uzw[b][a];
        }
        for(int b=0; b<=5; b++){
            plik >> dane_ogr.parametry[b][a];
        }
        plik >> dane_ogr.Cv_zalezy_od_T[a];
        a++;
    }
    for(;;){
        if(dane_ogr.parametry[0][a]==0){
            a=a-1;
        }else{
            a++;
            break;
        }
    }
plik.close();
return(a);
}
//===== WCZYTYWANIE DANYCH KROKOWYCH =====
void wczytaj_dane_krok(string nr_pliku){
string nazwa = sciezka_dost+nazwa_proj+".F2D_RES\\"+nazwa_proj
                +"_"+nr_pliku+".txt";
char sciezka[300];
strcpy(sciezka, nazwa.c_str());
fstream plik;
plik.open(sciezka);
string pierwsza_linia;
getline(plik, pierwsza_linia);
    int a=0;
    while(!plik.eof()){
        plik >> dane_krokowe.uzw[a];
        for(int b=0; b<=3; b++){
            plik >> dane_krokowe.parametry[b][a];
        }
        a++;
    }
plik.close();
}
//===== ZAPIS DANYCH KROKOWYCH =====
void zapis_danych_krok(string nr_pliku){
string nazwa = sciezka_dost+nazwa_proj+".F2D_RES\\"+nazwa_proj
                +"_"+nr_pliku+".txt";
ofstream plik(nazwa.c_str());
plik << "Nazwa" << "      " << "czas" << "      " << "rezyst."
    << "      " << "T" << "      " << "cv" << endl;
    for(int a=0; a<=ile_do_mod-1; a++){
        plik << dane_krokowe.uzw[a];
        for(int b=0; b<=3; b++){
            plik << "      " << dane_krokowe.parametry[b][a];

```

```

    }
    plik << endl;
}
plik.close();
}
//===== WCZYTYWANIE CHARAKTERYSTYKI CHŁODZENIA CIEKLYM AZOTEM =====
int wczyt_int_chlod(){
string nazwa = sciezka_dost_moj_kat+"chlodzenie.txt";
char sciezka[300];
strcpy(sciezka, nazwa.c_str() );
fstream plik;
plik.open(sciezka);
string pierwsza_linijka;
getline(plik, pierwsza_linijka);
for(int a=0; a<=49; a++){
    chlodzenie[0][a]=0;
}
int a=0;
while(!plik.eof()){
    for(int b=0; b<=1; b++){
        plik >> chlodzenie[b][a];
    }
    a++;
}
for(;;){
    if(chlodzenie[0][a]==0){
        a=a-1;
    }else{
        a++;
        break;
    }
}
plik.close();
return(a);
}
//===== TWORZENIE PLIKU DIF =====
void make_dif(bool pierwszy, int krok, float ivots, float tlc, int mnots){
string nazwa = sciezka_dost+nazwa_proj+".dif";
if (pierwszy==true){
    ofstream plik(nazwa.c_str());
    plik << nazwa_proj << endl;
    plik << ivots << endl;
    plik << tlc << endl;
    plik << mnots << endl;
    plik << ivots << endl;
    plik << ivots << endl;
    plik << "0" << endl;
    plik << "1" << endl;
    plik.close();
}else{
    ofstream plik(nazwa.c_str());
    plik << nazwa_proj << endl;
    plik << "Yes" << endl;
    plik << krok << "_" << endl;
    plik << "No" << endl;
    plik << ivots << endl;
    plik << tlc << endl;
    plik << mnots << endl;
    plik << ivots << endl;
}
}

```

```

    plik << ivots << endl;
    plik << "1" << endl;
    plik.close();
}
}
//===== SPR. CZY ISTNIEJE PLIK CIR =====
bool spr_cir(string nr_pliku){
    bool stan=false;
    string nazwa = sciezka_dost+nazwa_proj+".F2D_RES\\"
        +nazwa_proj+".CIR_"+nr_pliku;
    char sciezka[300];
    strcpy(sciezka, nazwa.c_str() );
    stan = PathFileExists(sciezka);
    return(stan);
}
//===== SPR. CZY ISTNIEJE PLIK "dane_krokowe" =====
bool spr_dane_krok(string nr_pliku){
    bool stan=false;
    string nazwa = sciezka_dost+nazwa_proj+".F2D_RES\\"+nazwa_proj
        +"_"+nr_pliku+".txt";
    char sciezka[300];
    strcpy(sciezka, nazwa.c_str() );
    stan = PathFileExists( sciezka );
    return(stan);
}

//===== URUCHAMIANIE OBLICZEN =====
void licz(){
    HWND h1 = FindWindowEx(0, 0, 0, "Batch");
    HWND h2 = FindWindowEx(h1,0,0,"cmdStart");
    PostMessage(h2,WM_LBUTTONDOWN , 0,0);
    PostMessage(h2,WM_LBUTTONUP , 0,0);
}
//===== ODCZYT Z PLIKU CIR =====
void czytaj_cir(string nr_pliku){
    string nazwa = sciezka_dost+nazwa_proj+".F2D_RES\\"+nazwa_proj
        +".CIR_"+nr_pliku;
    char sciezka[300];
    strcpy(sciezka, nazwa.c_str() );
    fstream plik;
    plik.open(sciezka);
    string wiersz;
    getline(plik, wiersz);
    int licznik=0;
    while(!plik.eof()){
        for(int i=0; i<=3; i++){
            plik >> tablica_CIR[i][licznik];
        }
        licznik++;
    }
    plik.close();
}
//===== W CZYTYWANIE CIEPLA WLASCIWEGO MIEDZI =====
int wczyt_cv_Cu(){
    string nazwa = sciezka_dost_moj_kat+"cv_Cu.txt";
    char sciezka[300];
    strcpy(sciezka, nazwa.c_str());
    fstream plik;
    plik.open(sciezka);
    string pierwsza_linijka;

```



```

getline(plik, pierwsza_linijka);
    for(int a=0; a<=299; a++){
        cv_Cu[0][a]=0;
    }
    int a=0;
    while(!plik.eof()){
        for(int b=0; b<=1; b++){
            plik >> cv_Cu[b][a];
        }
        a++;
    }
    for(;;){
        if(cv_Cu[0][a]==0){
            a=a-1;
        }else{
            a++;
            break;
        }
    }
plik.close();
return(a);
}
//===== W CZYTYWANIE CIEPLA WLASCIWEGO TASMY HSW =====
int wczyt_cv_HTS_1G(){
    string nazwa = sciezka_dost_moj_kat+"cv_HTS_1G.txt";
    char sciezka[300];
    strcpy(sciezka, nazwa.c_str() );
    fstream plik;
    plik.open(sciezka);
    string pierwsza_linijka;
    getline(plik, pierwsza_linijka);
    for(int a=0; a<=299; a++){
        cv_HTS_1G[0][a]=0;
    }
    int a=0;
    while(!plik.eof()){
        for(int b=0; b<=1; b++){
            plik >> cv_HTS_1G[b][a];
        }
        a++;
    }
    for(;;){
        if(cv_HTS_1G[0][a]==0){
            a=a-1;
        }else{
            a++;
            break;
        }
    }
plik.close();
return(a);
}
//===== W CZYTYWANIE CIEPLA WLASCIWEGO TASMY SF12050 =====
int wczyt_cv_HTS_2G(){
    string nazwa = sciezka_dost_moj_kat+"cv_HTS_2G.txt";
    char sciezka[300];
    strcpy(sciezka, nazwa.c_str() );
    fstream plik;
    plik.open(sciezka);

```

```

string pierwsza_linijka;
getline(plik, pierwsza_linijka);
for(int a=0; a<=299; a++){
    cv_HTS_2G[0][a]=0;
}
int a=0;
while(!plik.eof()){
    for(int b=0; b<=1; b++){
        plik >> cv_HTS_2G[b][a];
    }
    a++;
}
for(;;){
    if(cv_HTS_2G[0][a]==0){
        a=a-1;
    }else{
        a++;
        break;
    }
}
plik.close();
return(a);
}
//=====
void num_wierszy_do_mod(){
    string nazwa = sciezka_dost+nazwa_proj+".CIP";
    ifstream plik_odczyt(nazwa.c_str());
    string wers, wyraz;
    int poz_w_tabl=0;
    int licznik=0;
    while(getline(plik_odczyt, wers)){
        for(int i=0; i<=ile_do_mod-1; i++){
            if(wers==" "+dane_ogr.uzw[0][i]){
                wers_do_mod_w_CIP[poz_w_tabl]=licznik+3;
                for(int a=0; a<=1; a++){
                    zmiana_kolejnosci.uzw[a][poz_w_tabl]=dane_ogr.uzw[a][i];
                }
                for(int a=0; a<=5; a++){
                    zmiana_kolejnosci.parametry[a][poz_w_tabl]=dane_ogr.parametry[a][i];
                }
                zmiana_kolejnosci.Cv_zalezy_od_T[poz_w_tabl]=dane_ogr.Cv_zalezy_od_T[i];
                poz_w_tabl=poz_w_tabl+1;
                break;
            }
        }
        if(wers==" Connection between component - edge"){
            licznik=0;
            while(!plik_odczyt.eof()){
                plik_odczyt >> wyraz;
                for(int j=0; j<=ile_do_mod-1; j++){
                    if(wyraz==zmiana_kolejnosci.uzw[0][j]){
                        plik_odczyt >> wers_do_mod_w_CIR[licznik];
                        licznik++;
                        break;
                    }
                }
            }
        }
        licznik++;
    }
}

```

```

}
plik_odczyt.close();
for(int i=0; i<=ile_do_mod-1; i++){
    for(int a=0; a<=1; a++){
        dane_ogr.uzw[a][i]=zmiana_kolejnosci.uzw[a][i];
    }
    for(int a=0; a<=5; a++){
        dane_ogr.parametry[a][i]=zmiana_kolejnosci.parametry[a][i];
    }
    dane_ogr.Cv_zalezy_od_T[i]=zmiana_kolejnosci.Cv_zalezy_od_T[i];
}
}
//===== MODYFIKACJA PLIKU CIP =====
void mod_CIP(){
    string nazwa = sciezka_dost+nazwa_proj+".CIP";
    ifstream plik_odczyt(nazwa.c_str());
    string wers[100];
    int licznik=0;
    while(getline(plik_odczyt, wers[licznik])){
        licznik++;
    }
    plik_odczyt.close();
    char tablica[13];
    for(int i=0; i<=ile_do_mod-1; i++){
        sprintf(tablica, "%13.2E", dane_krokowe.parametry[1][i]);
        wers[wers_do_mod_w_CIP[i]].replace(17,13,tablica);
    }
    Sleep(20);
    ofstream plik_zapis(nazwa.c_str());
    for (int i=0; i<=licznik-1; i++){
        plik_zapis << wers[i] << endl;
    }
    plik_zapis.close();
}
//=====
float licz_int_chlodz(float delta_T){
    float a, b, P_N2=0;
    if(delta_T<=chlodzenie[0][0]){
        P_N2=chlodzenie[1][0];
        goto koniec;
    }
    if(delta_T>chlodzenie[0][linie_w_int_chlodz-1]){
        P_N2=chlodzenie[1][linie_w_int_chlodz-1];
        goto koniec;
    }
    for(int i=1; i<=linie_w_int_chlodz-1; i++){
        if(delta_T>chlodzenie[0][i-1] && delta_T<=chlodzenie[0][i]){
            a=(chlodzenie[1][i-1]-chlodzenie[1][i])
                /(chlodzenie[0][i-1]-chlodzenie[0][i]);
            b=chlodzenie[1][i]-chlodzenie[0][i]*a;
            P_N2=a*delta_T+b;
        }
    }
    koniec:
    return(P_N2);
}
//=====
float licz_cv_Cu(float T){
    float a, b, cv=0;

```

```

if(T<=cv_Cu[0][0]){
    cv=cv_Cu[1][0];
    return(cv);
}
if(T>cv_Cu[0][linie_w_cv_Cu-1]){
    cv=cv_Cu[1][linie_w_cv_Cu-1];
    return(cv);
}
for(int i=1; i<=linie_w_cv_Cu-1; i++){
    if(T>cv_Cu[0][i-1] && T<=cv_Cu[0][i]){
        a=(cv_Cu[1][i-1]-cv_Cu[1][i])/(cv_Cu[0][i-1]-cv_Cu[0][i]);
        b=cv_Cu[1][i]-cv_Cu[0][i]*a;
        cv=a*T+b;
        return(cv);
    }
}
return(0);
}
//=====
float licz_cv_HTS_1G(float T){
    float a, b, cv=0;
    if(T<=cv_HTS_1G[0][0]){
        cv=cv_HTS_1G[1][0];
        return(cv);
    }
    if(T>cv_HTS_1G[0][linie_w_cv_HTS_1G-1]){
        cv=cv_HTS_1G[1][linie_w_cv_HTS_1G-1];
        return(cv);
    }
    for(int i=1; i<=linie_w_cv_HTS_1G-1; i++){
        if(T>cv_HTS_1G[0][i-1] && T<=cv_HTS_1G[0][i]){
            a=(cv_HTS_1G[1][i-1]-cv_HTS_1G[1][i])/(cv_HTS_1G[0][i-1]-
cv_HTS_1G[0][i]);
            b=cv_HTS_1G[1][i]-cv_HTS_1G[0][i]*a;
            cv=a*T+b;
            return(cv);
        }
    }
    return(0);
}
//=====
float licz_cv_HTS_2G(float T){
    float a, b, cv=0;
    if(T<=cv_HTS_2G[0][0]){
        cv=cv_HTS_2G[1][0];
        return(cv);
    }
    if(T>cv_HTS_2G[0][linie_w_cv_HTS_2G-1]){
        cv=cv_HTS_2G[1][linie_w_cv_HTS_2G-1];
        return(cv);
    }
    for(int i=1; i<=linie_w_cv_HTS_2G-1; i++){
        if(T>cv_HTS_2G[0][i-1] && T<=cv_HTS_2G[0][i]){
            a=(cv_HTS_2G[1][i-1]-cv_HTS_2G[1][i])/(cv_HTS_2G[0][i-1]-
cv_HTS_2G[0][i]);
            b=cv_HTS_2G[1][i]-cv_HTS_2G[0][i]*a;
            cv=a*T+b;
            return(cv);
        }
    }
}

```

```

    return(0);
}
//===== OBLICZANIE REZYSTANCJI 1 METRA PRZEWODU MIEDZIANEGO =====
double licz_rezyst_Cu(float T, float przekroj){
    double R;
    przekroj = przekroj * 1E-06;
    if(T<450){
        R = (-1.2413E-13*pow(T,2) + 1.1242E-10*T - 5.9703E-09) * 1 / przekroj;
    }else{
        R = (-1.2413E-13*pow(450,2) + 1.1242E-10*450 - 5.9703E-09) * 1 /
przekroj;
    }
    return(R);
}
//===== OBLICZANIE REZYSTANCJI 1 METRA TASMY HSW =====
double licz_rezyst_1G(float T, float I){
    float Ic, Ic_od_T, n, Uc, Ic2, Tc, T1;
    double R;
    Ic2 = 0;
    Tc = 100;
    T1 = 77.3;
    Ic = 118;
    n = 3.8;
    Uc = 0.006;
    if(T<=Tc){
        Ic_od_T = Ic+(T-T1)*(Ic2-Ic)/(Tc-T1);
        if(Ic_od_T < 0){Ic_od_T = -Ic_od_T;}
        R = (Uc/Ic_od_T)*pow(pow(pow(I/Ic_od_T,2),0.5),n-1)+1E-15;
        R = pow( (1/R + 1/(1.2142E-04*T - 3.5276E-03) ) , -1);
    }else{
        R = 1.2142E-04*T - 3.5276E-03;
    }
    return(R);
}
//===== OBLICZANIE REZYSTANCJI 1 METRA TASMY SF12050 =====
double licz_rezyst_2G(float T, float I){
    float Ic, Ic_od_T, n, Uc, Ic2, Tc, T1;
    double R;
    Ic2 = 0;
    Tc = 90;
    T1 = 77.3;
    Ic = 270;
    n = 20;
    Uc = 0.0001;
    if(T<=Tc){
        Ic_od_T = Ic+(T-T1)*(Ic2-Ic)/(Tc-T1);
        if(Ic_od_T < 0){Ic_od_T = -Ic_od_T;}
        R = (Uc/Ic_od_T)*pow(pow(pow(I/Ic_od_T,2),0.5),n-1)+1E-15;
        R = pow(1/R+1/(-1.9373E-06*pow(T,2)+2.6118E-03*T-7.1142E-02),-1);
    }else{
        if(T<680){
            R = (-1.9373E-06*pow(T,2) + 2.6118E-03*T - 7.1142E-02);
        }else{
            R = (-1.9373E-06*pow(680,2) + 2.6118E-03*680 - 7.1142E-02);
        }
    }
    return(R);
}
//=====

```

```

TForm1 *Form1;
//-----
__fastcall TForm1::TForm1(TComponent* Owner)
    : TForm(Owner)
{
}
//===== URUCHOM FLUX =====
void __fastcall TForm1::Button1Click(TObject *Sender)
{
WinExec("C:\\Cedrat\\Flux_10.3\\bin\\fluxsupervisor.exe", SW_SHOW);
}
//=====
void __fastcall TForm1::Button3Click(TObject *Sender){
/* obliczanie numerow linii do modyfikacji w pliku CIP i porzadkowanie
danych w kolejnosci takiej jak sa w plikach CIP i CIR */
num_wierszy_do_mod();
string tmp, krok_obliczeniowy;
int krok_inicjalizujacy = int(StrToFloat(Edit11->Text));
sprintf((char*)tmp.c_str(), "%d", (krok_inicjalizujacy-1));
krok_obliczeniowy = tmp.c_str();
// sprawdzanie jaki krok obliczeniowy wprowadzil uzytkownik
if (krok_inicjalizujacy > 1){
make_dif(false, krok_inicjalizujacy-1, ivots, tlc, krok_inicjalizujacy);
wczytaj_dane_krok(krok_obliczeniowy);
mod_CIP();
}
else{
krok_inicjalizujacy = 1;
make_dif(true, 0, ivots, tlc, 1);
for(int a=0; a<=ile_do_mod-1; a++){
dane_krokowe.uzw[a]=dane_ogr.uzw[0][a];
dane_krokowe.parametry[0][a]=0;
if(dane_ogr.uzw[1][a]=="Cu"){
dane_krokowe.parametry[1][a] = dane_ogr.parametry[0][a]
* licz_rezyst_Cu(T_azotu, dane_ogr.parametry[1][a]
* dane_ogr.parametry[2][a]);
}
else{
dane_krokowe.parametry[1][a] = 1E-15;
}
dane_krokowe.parametry[2][a] = T_azotu; // temperatura cieklego azotu
dane_krokowe.parametry[3][a] = dane_ogr.parametry[5][a];
}
mod_CIP();
}
Sleep(5000);
float P_N2=0;
bool pierwsze_wykonanie_petli = true;
for (int i=krok_inicjalizujacy; i<=tlc_ivots; i++){
licz();
if(pierwsze_wykonanie_petli == true){
Sleep(5000);
pierwsze_wykonanie_petli = false;
}
sprintf((char*)tmp.c_str(), "%d", i);
krok_obliczeniowy = tmp.c_str();
// sprawdza czy istnieje plik CIR, jesli nie istnieje to program czeka
for(;;){
if (spr_cir(krok_obliczeniowy)==true) break;
Sleep(150);
}
}
}

```

```

czytaj_cir(krok_obliczeniowy);
/* petla do obliczen temperatury, ciepla wlasciwego
   i rezystancji dla kazdego uzwojenia */
for(int j=0; j<=ile_do_mod-1; j++){
    // krok czasowy delta_T
    dane_krokowe.parametry[0][j]=dane_krokowe.parametry[0][j]+ivots;
    // temperatura
    if(dane_ogr.parametry[4][j]==0){
        P_N2=0;
    }else{
        P_N2=licz_int_chlodz(dane_krokowe.parametry[2][j]-T_azotu);
    }
    dane_krokowe.parametry[2][j]=(dane_krokowe.parametry[1][j]
    *pow(tablica_CIR[2][wers_do_mod_w_CIR[j]-1],2)-
dane_ogr.parametry[4][j])
    *P_N2)*ivots/(dane_ogr.parametry[0][j]*dane_ogr.parametry[1][j]
    *dane_ogr.parametry[2][j]*dane_ogr.parametry[3][j]*1E-6
    *dane_krokowe.parametry[3][j]) + dane_krokowe.parametry[2][j];
    if(dane_krokowe.parametry[2][j]<T_azotu){
        dane_krokowe.parametry[2][j]=T_azotu;
    }
    // cieplo wlasciwe
    if(dane_ogr.uzw[1][j]=="Cu"){
        if(dane_ogr.Cv_zalezy_od_T[j]==false){
            dane_krokowe.parametry[3][j]=dane_ogr.parametry[5][j];
        }else{
            dane_krokowe.parametry[3][j]=licz_cv_Cu(dane_krokowe.parametry[2][j]);
        }
    }else{
        if(dane_ogr.uzw[1][j]=="HTS_1G"){
            if(dane_ogr.Cv_zalezy_od_T[j]==false){
                dane_krokowe.parametry[3][j]=dane_ogr.parametry[5][j];
            }else{
                dane_krokowe.parametry[3][j]
                =licz_cv_HTS_1G(dane_krokowe.parametry[2][j]);
            }
        }else{
            if(dane_ogr.Cv_zalezy_od_T[j]==false){
                dane_krokowe.parametry[3][j]=dane_ogr.parametry[5][j];
            }else{
                dane_krokowe.parametry[3][j]
                =licz_cv_HTS_2G(dane_krokowe.parametry[2][j]);
            }
        }
    }
    // Rezystancja
    if(dane_ogr.uzw[0][j]=="Cu"){
        dane_krokowe.parametry[1][j]=dane_ogr.parametry[0][j]
        *licz_rezyst_Cu(dane_krokowe.parametry[2][j],dane_ogr.parametry[1][j]
        *dane_ogr.parametry[2][j]);
    }else{
        if(dane_ogr.uzw[1][j]=="HTS_1G"){
            dane_krokowe.parametry[1][j] = dane_ogr.parametry[0][j]
            *licz_rezyst_1G(dane_krokowe.parametry[2][j],
            tablica_CIR[2][wers_do_mod_w_CIR[j]-1]);
        }else{
            dane_krokowe.parametry[0][j] = dane_ogr.parametry[0][j]
            *licz_rezyst_2G(dane_krokowe.parametry[2][j],
            tablica_CIR[2][wers_do_mod_w_CIR[j]-1]);
        }
    }
}

```

```

    }
}
}
zapis_danych_krok(krok_obliczeniowy);
Sleep(30);
/* sprawdzanie czy istnieje plik z danymi krokowymi,
   jesli nie to program czeka 120 ms */
for(;;){
    if (spr_dane_krok(krok_obliczeniowy)==true) break;
    Sleep(120);
}
mod_CIP();
make_dif(false, i, ivots, tlc, i+1);
}
}
//===== WCZYTAJ DANE =====
void __fastcall TForm1::Button4Click(TObject *Sender) {
    /* wczytywanie danych początkowych takich jak parametry symulacji,
       wartosc kroku, limit czasowy i max. liczba krokow ponadto wczytywanie
    */
    // wczytywanie parametrów symulacji
    ivots = StrToFloat(Edit3->Text); // krok czasowy
    tlc = StrToFloat(Edit2->Text); // czas symulacji
    mnots = StrToFloat(Edit1->Text); // maksymalna liczba krokow
obliczeniowych
    /* sprawdzanie czy symulacja bedzie krotsza dla wartosci "czas
       symulacji"
       czy dla "maksymalna liczba krokow obliczeniowych" i jezeli obliczona
       liczba krokow symulacji jest wieksza niz podana to podstawia podana
    */
    float tlc_ivots1 = (tlc/ivots);
    tlc_ivots = tlc_ivots1;
    if (tlc_ivots > mnots){tlc_ivots = mnots;}
    // wczytywanie parametrow uzwojen ogranicznika
    ile_do_mod = wczyt_dane_wejsc();
    // wczytywanie charakterystyki chlodzenia
    // petla wykonuje sie tyle razy ile jest elementow do modyfikacji
    for(int i=0; i<=ile_do_mod-1; i++){
        if(dane_ogr.parametry[4][i]>0){
            linie_w_int_chlodz=wczyt_int_chlod();
        }
    }
    // wczytywanie charakterystyki ciepla wlasc. od temp. dla kazdego z
uzwojen
    for(int i=0; i<=ile_do_mod-1; i++){
        if(dane_ogr.uzw[1][i]=="Cu"&&dane_ogr.Cv_zalezy_od_T[i]==true){
            linie_w_cv_Cu=wczyt_cv_Cu();
        }
    }
    for(int i=0; i<=ile_do_mod-1; i++){
        if(dane_ogr.uzw[1][i]=="HTS_1G"&&dane_ogr.Cv_zalezy_od_T[i]==true){
            linie_w_cv_HTS_1G=wczyt_cv_HTS_1G();
        }
    }
    for(int i=0; i<=ile_do_mod-1; i++){
        if(dane_ogr.uzw[1][i]=="HTS_2G"&&dane_ogr.Cv_zalezy_od_T[i]==true){
            linie_w_cv_HTS_2G=wczyt_cv_HTS_2G();
        }
    }
}
}
}

```



```

//===== UTWORZ PLIK =====
void __fastcall TForm1::Button2Click(TObject *Sender){
    int liczba=1;
    string nr_pliku, nazwa, nazwa1;
    char sciezka[300];
    nazwa = sciezka_dost_moj_kat+"przebieg_temp.txt";
    ofstream plik_wyjsc;
    fstream plik;
    strcpy(sciezka, nazwa.c_str());
    plik_wyjsc.open(sciezka);
    for(;;){
        sprintf((char*)nr_pliku.c_str(), "%d", liczba);
        nr_pliku = nr_pliku.c_str();
        nazwa=sciezka_dost+nazwa_proj+".F2D_RES\\"+nazwa_proj + "_"
        +nr_pliku+".txt";
        strcpy(sciezka, nazwa.c_str());
        if (PathFileExists(sciezka)){
            plik.open(sciezka);
            getline(plik, nazwa);
            if(liczba==1){
                plik_wyjsc << nazwa << endl;
            }
            while(!plik.eof()){
                getline(plik, nazwa);
                plik_wyjsc << nazwa << " ";
            }
            plik.clear();
            plik.close();
        }else{
            break;
        }
        plik_wyjsc << endl;
        liczba++;
    }
    plik_wyjsc.close();
}
//=====

```

Streszczenie

Nadprzewodnikowe ograniczniki prądu są bardzo dobrą alternatywą i uzupełnieniem dla współcześnie stosowanych układów zabezpieczających przed skutkami zwarć w sieci elektroenergetycznej. Przed zastosowaniem nadprzewodnikowego ogranicznika prądu w sieci elektroenergetycznej musi on zostać poprawnie zaprojektowany i sprawdzony. Zamiast budować wiele prototypów, coraz częściej wykorzystuje się potencjał metod numerycznych, które pozwalają wirtualnie przetestować projektowane urządzenie. W rozprawie opisano istotę zjawiska nadprzewodnictwa oraz właściwości fizyczne nadprzewodników Bi-2223 i YBCO. Scharakteryzowano także dwa rodzaje taśm nadprzewodnikowych (HSW i SF12050) do budowy których zostały wykorzystane te nadprzewodniki. Wyżej wymienione taśmy zastosowano do konstrukcji nadprzewodnikowych ograniczników prądu zarówno typu rezystancyjnego jak i indukcyjnego. Zaprezentowano opis zagadnienia związanego z modelowaniem nadprzewodnikowych ograniczników prądu oraz opis modeli numerycznych. Wyniki otrzymane na podstawie modeli numerycznych porównano z wynikami pomiarów uzyskanych podczas badań nadprzewodnikowych ograniczników prądu.

Abstract

Superconducting fault current limiters are excellent alternative and complement to the currently used protection systems against short circuits in electricity grids. Before using a superconducting current limiter in power system, it must be properly designed and tested. Instead of manufacture multiple prototypes, the potential of the numerical methods is used. The numerical models allow the virtual tests of designed devices. The dissertation presents the nature of superconductivity and physical properties of superconductors Bi-2223 and YBCO. These superconductors are components of the superconducting tapes (HSW and SF12050) which have been used to build resistive and inductive fault current limiters. These limiters has been tested. Results of experimental research are compared with results of the numerical models.