



UNIVERSITATEA POLITEHNICA DIN BUCUREȘTI  
ȘCOALA DOCTORALĂ DE INGINERIE ELECTRICĂ

# TEZĂ DE DOCTORAT

## Rezumatul tezei de doctorat

Studii privind realizarea unui electromagnet HTS pentru  
câmp magnetic intens și uniform

Conducător științific

Prof. Dr. Ing. Alexandru – Mihail Morega

Doctorand

Ing. Dan Enache

Această pagină este lăsată intenționat goală

## Cuprins

<b>STRUCTURA CAPITOLELOR TEZEI DE DOCTORAT.....</b>	<b>5</b>
<b>CAPITOLUL 1. SUPRACONDUCTIBILITATEA (ASPECTE TEORETICE).....</b>	<b>7</b>
1.1. CONDUȚIA ELECTRICĂ ÎN TEORIA CLASICĂ.....	7
1.2. CONDUȚIA ELECTRICĂ ÎN TEORIA MATERIALELOR SUPRACONDUCTOARE .....	7
1.2.1. Teoria London.....	7
1.2.2. Teoria Ginzburg – Landau.....	8
<b>CAPITOLUL 2. MATERIALE SUPRACONDUCTOARE. PROPRIETĂȚI.....</b>	<b>8</b>
2.1. MATERIALE SUPRACONDUCTOARE DE TIP I ȘI II .....	8
2.2. MATERIALELE SUPRACONDUCTOARE LTS .....	9
2.3. MATERIALELE SUPRACONDUCTOARE HTS .....	9
2.4. MATERIALELE HTS CU APLICABILITATE PRACTICĂ.....	9
2.4.1. Cerințe impuse pentru utilizare practică.....	9
2.4.2. Materiale HTS disponibile comercial.....	10
2.4.3. Proprietăți și caracteristici ale materialelor HTS .....	10
2.5. APLICAȚII ALE MATERIALELOR SUPRACONDUCTOARE HTS.....	11
<b>CAPITOLUL 3. MODELUL FIZIC.....</b>	<b>11</b>
3.1. MODELUL FIZIC – PROBLEMA DE CÂMP ELECTROMAGNETIC .....	12
3.1.1 Modelul de câmp electromagnetic staționar în electromagnetul supraconductor.....	12
3.2 PROBLEMĂ DE TRANSFER DE CĂLDURĂ .....	12
<b>CAPITOLUL 4. PROIECTAREA MODELULUI EXPERIMENTAL EMSD.....</b>	<b>13</b>
4.1. PREZENTARE GENERALĂ A ELECTROMAGNETULUI HTS .....	13
4.2. MODEL CONCEPTUAL DE EMS .....	14
4.2.1. Caracteristici generale.....	14
4.2.2. Descrierea modelului conceptual de EMSD.....	14
4.3. BOBINELE SUPRACONDUCTOARE .....	14
4.4. SISTEMUL CRIOGENIC DE RĂCIRE .....	15
4.5. CARACTERISTICILE CONDUCTORILOR DE CURENT HTS .....	15
<b>CAPITOLUL 5. PROIECTAREA PRIN MODELARE NUMERICĂ A ELECTROMAGNETULUI SUPRACONDUCTOR DIPOLAR .....</b>	<b>16</b>
5.1. STADIU ACTUAL.....	16
5.2. ELECTROMAGNET DIPOLAR SUPRACONDUCTOR .....	16
5.3. PROIECTAREA ȘI MODELAREA NUMERICĂ A EMSD – CÂMPUL MAGNETIC .....	16
5.3.1. Înfișurarea de excitație pentru câmp uniform.....	17
5.3.2. Modelul analitic pentru calculul câmpului magnetic .....	17
5.3.3. Modelul numeric pentru evaluarea câmpului magnetic .....	18
5.4. PROIECTAREA PRIN MODELAREA NUMERICĂ A EMSD – FORȚE ELECTRODINAMICE – 2D.....	18
5.5. EVALUAREA FORȚELOR ELECTRODINAMICE PRODUSE DE CÂMPUL MAGNETIC AL EMSD – 3D ....	19
5.5.1. Identificarea zonelor celor mai solicitate de forțele electrodinamice .....	19
5.5.2. Evaluarea deformărilor ce pot apărea în EMSD, în urma acțiunii forțelor electrodinamice .	20
5.6. PROIECTAREA ȘI MODELAREA NUMERICĂ A EMSD – TRANSFER DE CĂLDURĂ.....	21
5.6.1. Calculul analitic al sarcinilor termice produse de sistem (suportate de crioracitor).....	21

5.7. MODELAREA NUMERICĂ A FUNCȚIONĂRII JONȚIUNILOR SUPRACONDUCTOARE .....	22
<b>CAPITOLUL 6. REALIZARE DE MODEL EXPERIMENTAL PENTRU EMSD.....</b>	<b>23</b>
6.1. REALIZAREA MODELULUI EXPERIMENTAL.....	23
6.2. ASAMBLAREA MODELULUI EXPERIMENTAL DE EMSD .....	26
<b>CAPITOLUL 7. TESTAREA ELECTROMAGNETULUI SUPRACONDUCTOR .....</b>	<b>27</b>
7.1. TESTE ȘI EXPERIMENTE EFECTUATE PE EMSD.....	27
7.1.1. Testarea condițiilor de vid în criostat .....	27
7.1.2. Testarea parametrilor funcționali ai criorăcitorului.....	28
7.1.3. Măsurarea parametrilor caracteristici ai bobinelor supraconductoare .....	28
7.1.4. Măsurarea câmpului magnetic generat de EMSD .....	30
7.2. MĂSURAREA EXPERIMENTALĂ A JONȚIUNILOR .....	32
<b>CONCLUZII .....</b>	<b>33</b>
C.1. CONCLUZIILE GENERALE .....	33
C.2. CONTRIBUȚII ORIGINALE.....	34
C.3. PERSPECTIVE DE DEZVOLTARE.....	35
<b>BIBLIOGRAFIE .....</b>	<b>37</b>

**Cuvinte cheie:** supraconducție, materiale supraconductoare, LTS, HTS, câmp magnetic, transfer de căldură, model fizic, model matematic, modelare numerică, electromagnet supraconductor dipolar, bobine supraconductoare, sistem criogenic de răcire, criorăcitor, EMSD, forțe electrodinamice, deformări, criostat, conductori de curent HTS, joncțiuni supraconductoare, model experimental.

## **STRUCTURA CAPITOLELOR TEZEI DE DOCTORAT**

Teza de doctorat “Studii privind realizarea unui electromagnet supraconductor HTS pentru câmp magnetic intens și uniform” este structurată în 7 capitole, concluzii și bibliografie.

Capitolul 1, “Supraconductibilitatea (aspecte teoretice)”, prezintă noțiuni introductive cu privire la teoria fenomenului de supraconducție. Subcapitolul 1.1, „Conducția electrică în teoria clasică”, conține un rezumat al teoriei clasice în conducția electrică. În subcapitolul 1.2, “Conducția electrică în teoria materialelor supraconductoare”, se face trecerea de la teoria clasică la cea a materialelor supraconductoare, și sunt prezentate două teorii importante, 1.2.1.”Teoria London” și 1.2.2. “Teoria Ginzburg – Landau”.

În Capitolul 2, “Materiale supraconductoare. Proprietăți”, sunt tratate tipurile de materiale supraconductoare, proprietățile și aplicații ale acestora. În subcapitolul 2.1, „Materiale supraconductoare de tip I și II” prezintă cele două tipuri de materiale supraconductoare. În subcapitolele 2.2, „Materiale supraconductoare LTS”, și 2.3, „Materiale supraconductoare HTS”, prezintă materialele supraconductoare împărțite în două categorii, în funcție de temperatura de funcționare. Mai departe, în subcapitolul 2.4, „Materiale HTS cu aplicabilitate practică”, sunt prezentate punându-se accent pe 2.4.1, „Cerințe impuse pentru utilizarea practică”, 2.4.2, „Materiale HTS disponibile comercial” și 2.4.3, „Proprietăți și caracteristici ale materialelor HTS”. În 2.5, „Aplicații ale materialelor supraconductoare HTS” sunt prezentate o serie de aplicații ale materialelor HTS.

Capitolul 3, „Modelul fizic” reprezintă etapa premergătoare modelării numerice în care sunt descrise 3.1, „Modelul fizic – problema de câmp electromagnetic”, și anume mai în detaliu 3.1.1, ”Modelul de câmp electromagnetic staționar în electromagnetul supraconductor”, respectiv în subcapitolul 3.2, „Problema de transfer de căldură”.

Capitolul 4, „Proiectarea modelului experimental EMSD” conține 4.1, „Prezentare generală EMSD”, 4.2, „Model conceptual de EMS” punându-se accent pe 4.2.1, „Caracteristici generale” și 4.2.2, „Descrierea modelului conceptual de EMSD”, 4.3, „Bobinele supraconductoare”, 4.4, „Sistemul criogenic de răcire”, 4.5, „Caracteristicile conductorilor de curent HTS”.

Capitolul 5, „Proiectarea prin modelare numerică a electromagnetului supraconductor dipolar”, conține 5.1, „Stadiu actual”, o scurtă descriere a EMSD în 5.2, „Electromagnetul dipolar supraconductor”, 5.3, „Proiectarea și modelarea numerică a EMSD – câmpul magnetic” unde sunt prezentate 5.3.1, „Înfășurarea de excitație pentru câmp uniform”, 5.3.2, „Model analitic pentru calculul câmpului magnetic” și 5.3.2, „Model numeric pentru evaluarea câmpului magnetic”.

Forțele electrodinamice sunt descrise în 5.4, „Proiectarea și modelarea numerică a EMSD – forțe electrodinamice – 2D”. În 5.5, „Evaluarea forțelor electrodinamice produse de câmpul magnetic al EMSD – 3D”, forțele Laplace sunt studiate în 3D, și anume 3.5.1, „Identificarea zonelor celor mai solicitate de forțele electrodinamice”, respectiv 3.5.2, „Evaluarea deformărilor ce pot apărea în EMSD, în urma acțiunilor forțelor electrodinamice”. Transferul de căldură este studiat în subcapitolul 5.6, „Proiectarea și modelarea numerică a EMSD – transfer de căldură”, unde pe lângă evaluarea numerică a sarcinilor termice din sistem, este prezentat și un model analitic de calcul al acestor sarcini termice în 5.6.1, „Calcul analitic al sarcinilor termice produse de sistem (suportate de criorăcitor)”. Un subcapitol este dedicat studiului joncțiunilor supraconductoare, 5.7, „Modelarea numerică a funcționării joncțiunilor supraconductoare”.

În capitolul 6, „Realizarea de model experimental pentru EMSD”, sunt prezentate 6.1, „Realizarea modelului experimental” și 6.2, „Asamblarea modelului experimental de EMSD”.

În capitolul 7, „Testarea electromagnetului supraconductor”, este prezentată partea experimentală și de măsurători a tezei. Testele efectuate în subcapitolul 7.1, „Teste și experimente pe EMSD” sunt 7.1.1, „Testarea condițiilor de vid în criostat”, 7.1.2, „Testarea parametrilor funcționali ai criorăcitorului”, 7.1.3, „Măsurarea parametrilor caracteristici ai bobinelor supraconductoare” și 7.1.4, „Măsurarea câmpului magnetic generat de EMSD”. În 7.2, „Măsurarea experimentală a joncțiunilor” sunt prezentate rezultatele obținute în urma testării joncțiunilor supraconductoare.

În capitolul 8 sunt evidențiate concluziile generale ale cercetării științifice și a rezultatelor obținute în această teză în domeniul electromagneților supraconductori, contribuțiile personale la această lucrare și perspectivele de dezvoltare ulterioară.

## CAPITOLUL 1. SUPRACONDUCTIBILITATEA (ASPECTE TEORETICE)

În acest capitol sunt prezentate noțiuni introductive cu privire la teoria fenomenului de supraconducție.

### 1.1. Conducția electrică în teoria clasică

Un câmp electric  $\mathbf{E}$  induce într-un metal un curent electric. Legătura dintre câmpul electric  $\mathbf{E}$  și densitatea de curent  $\mathbf{J}$  este dată de legea lui Ohm

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}, \quad (1.1)$$

unde  $\sigma$  este conductivitatea electrică a materialului.

Acestea sunt descrise de expresia empirică pentru rezistivitatea netă, numită și regula Matthiessen

$$\rho = \rho_L + \rho_i, \quad (1.2)$$

unde  $\rho_L$  [ $\Omega\text{m}$ ] este rezistivitatea rezultată din interacțiunea electron – fonon, iar  $\rho_i$  [ $\Omega\text{m}$ ] reprezintă rezistivitatea datorată imperfecțiunilor rețelei. În general, rezistivitatea unui conductor scade odată cu scăderea temperaturii.

În interiorul unui supraconductor inducția magnetică este  $\mathbf{B} = 0$ .

$$\frac{\partial \mathbf{B}(x)}{\partial t} = \frac{\partial \mathbf{B}(0)}{\partial t} e^{-x/\lambda}, \quad (1.3)$$

unde  $x$  reprezintă distanța de la suprafața conductorului. În urma acestui rezultat se presupune că  $\mathbf{B}$  este constant în raport cu timpul în interiorul unui conductor perfect, nu neapărat zero. Dacă conductorul perfect a fost plasat într-un câmp magnetic, iar după aceea a intrat în starea de conducție perfectă, acel flux magnetic este păstrat în interiorul materialului. Inducția magnetică este întotdeauna zero în interiorul unui supraconductor [1].

### 1.2. Conducția electrică în teoria materialelor supraconductoare

În supraconducție există trei teorii de bază, și anume: Teoria London, Teoria Ginzburg-Landau și Teoria BCS. În continuare sunt prezentate două dintre acestea, London și Ginzburg-Landau.

#### 1.2.1. Teoria London

Fritz și Heinz London au elaborat o teorie ce explică efectul Meissner. Acest efect constă în faptul că liniile de câmp sunt scoase în afara unui corp odată ce intră în starea de supraconducție.

Folosind  $n_s$  ca fiind densitatea de electroni supraconductori și  $\mathbf{J}_{sc}$  ca densitatea de curent supraconductor,

$$\mathbf{E} = \frac{m}{n_s e^2} \frac{\partial \mathbf{J}_{sc}}{\partial t}, \quad (1.4)$$

care reprezintă prima ecuație London.

A doua ecuație London este

$$-\frac{m}{n_s e^2} (\nabla \times \mathbf{J}_{sc}) = \mathbf{B}. \quad (1.5)$$

Este introdusă prima mărime caracteristică a supraconducției  $\lambda_L$  (adâncimea de pătrundere London) și este definită ca

$$\lambda_L^2 = \frac{m}{\mu_0 n_s e^2}. \quad (1.6)$$

Valorile adâncimii de pătrundere London s-au găsit a fi de ordinul a 100 nm. Pe suprafața unui supraconductor se formează curenți ce formează un câmp magnetic care neutralizează orice efect pe care un câmp magnetic extern îl are în interiorul supraconductorului [1].

### 1.2.2. Teoria Ginzburg – Landau

Prima ecuație din teoria GL:

$$\text{GL I: } \frac{1}{2m^*} [\hbar^2 \nabla^2 \phi - 2i\hbar e^* \mathbf{A} \cdot \nabla \phi - e^{*2} A^2 \phi] - a\phi - b|\phi|^2 \phi = 0. \quad (1.7)$$

A doua ecuație a teoriei GL,

$$\text{GL II: } \nabla \times (\nabla \times \mathbf{A}) + \frac{i\hbar e^*}{2m^*} (\phi^* \nabla \phi - \phi \nabla \phi^*) + \frac{e^{*2}}{m^*} \mathbf{A} |\phi|^2 = 0. \quad (1.8)$$

Teoria GL introduce lungimea de coerență

$$\xi^2 = \frac{\hbar^2}{2m^* |a|}. \quad (1.9)$$

Raportul  $\kappa = \frac{\lambda}{\xi} = \frac{1}{\sqrt{2}}$ , numit și parametrul G – L, clasifică supraconductorii în două categorii [3]

$$\kappa \leq \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (\text{Tip I}), \quad (1.10)$$

$$\kappa \geq \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (\text{Tip II}). \quad (1.11)$$

## CAPITOLUL 2. MATERIALE SUPRACONDUCTOARE. PROPRIETĂȚI

În Capitolul 2 sunt prezentate principalele tipuri de materiale supraconductoare. Sunt prezentate caracteristicile și performanțele acestora, aplicații ale materialelor supraconductoare în domeniul ingineriei electrice, producători și metode de producere specifice pentru fiecare material supraconductor în parte, impactul economic, avantaje și dezavantaje.

### 2.1. Materiale supraconductoare de tip I și II

În Figura 2.1 se observă suprafața critică a unui supraconductor în funcție de parametrii critici ai acestuia:  $T_c$ ,  $B_{c2}$  și  $J_c$ .

Supraconductorii de Tip I sunt elemente, pe când supraconductorii de Tip II sunt alcătuiți din aliaje și compozite.



Supraconductorul de Tip II este de asemenea un conductor perfect de electricitate, cu rezistență zero, dar ale cărui proprietăți magnetice sunt mai complexe decât în cazul celor de Tip I.

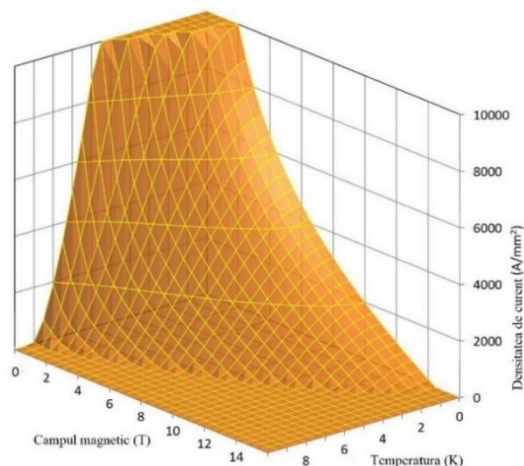


Fig. 2.1. Suprafața critică a unui supraconductor.

## 2.2. Materialele supraconductoare LTS

Cel mai utilizat supraconductor LTS este aliajul ductil de niobiu și titan ( $NbTi$ ). Datorită proprietăților sale supraconductoare, acesta este adecvat pentru obținerea unor densități de flux magnetic în intervalul 2 - 10 T, necesitând temperaturi de răcire sub 5 - 6 K (asigurate de heliu lichid). Un alt material supraconductor de tip LTS, care este deja produs la scară industrială, este  $Nb_3Sn$ .

Răcit la temperaturi mai mici de cca. 18 K,  $Nb_3Sn$  devine supraconductor.  $Nb_3Sn$  este adecvat pentru obținerea unei inducții magnetice în 10 - 21 T și este răcit în general cu heliu lichid.  $Nb_3Sn$  este utilizat în general la fabricarea bobinelor interioare ale magneților pentru rezonanță magnetică nucleară (RMN) și pentru electromagneții din componența acceleratoarelor de particule.

## 2.3. Materialele supraconductoare HTS

Aceste materiale, denumite generic supraconductori de temperaturi ridicate (HTS), au generat un interes deosebit chiar și în afara comunității științifice, deschizând porțile către noi direcții de cercetare și dezvoltare. Cele mai importante materiale HTS sunt Y-Ba-Cu-O, Bi-Sr-Ca-Cu-O și  $MgB_2$ .

## 2.4. Materialele HTS cu aplicabilitate practică

### 2.4.1. Cerințe impuse pentru utilizare practică

Materiale HTS folosite pentru aplicații în ingineria electrică, trebuie să îndeplinească următoarele condiții minimale, cum ar fi lungimea conductorului ( $\sim km$ ), valoare mare a densității de curent ( $\sim kA/cm^2$ ), pierderi reduse în curent alternativ, stabil din punct de vedere structural, cost redus/unitatea de lungime.

#### 2.4.2. Materiale HTS disponibile comercial

Materialele disponibile comercial sunt BSCCO-2223, YBCO-123 și MgB<sub>2</sub>.

#### 2.4.3. Proprietăți și caracteristici ale materialelor HTS

Pentru ca materialele HTS să poată fi folosite în aplicații, trebuie ținut cont de 3 caracteristici importante T<sub>c</sub>, B<sub>c2</sub> și J<sub>c</sub>.

În ceea ce privește caracteristicile de bază ale principalelor materiale supraconductoare cu aplicabilitate tehnică, acestea sunt redate în Tabel 2.1.

**Tabel 2.1. Parametrii critici ai materialelor HTS cu aplicații în tehnică [9, 11, 12]**

Nr.	Material HTS	T <sub>c</sub> [K]	J <sub>c</sub> [A/cm <sup>2</sup> ]	B <sub>c2</sub> [T]
1	BiSrCaCuO	110	103 – 104@77 K	198
2	YBaCaO	92	104 – 105@77 K	115
3	MgB <sub>2</sub>	39	104 – 105@30 K	19-40

##### 2.4.3.1. Conductori BSCCO – 2212

BSCCO-2212 are temperatura critică (T<sub>c</sub>) de aproximativ 90 K și este interesantă în primul rând pentru proprietățile de câmp intens în gama de temperaturi 4,2 – 20 K, [4].

##### 2.4.3.2. Conductori BSCCO – 2223

**Tabel 2.2. Caracteristicile benzii BSCCO – 2223 [4], de la AMSC [5], 2006, respectiv de la SEI [6], 2007**

	Parametrii	Densitate de curent mare	de	Rezistență mecanică mare
BSCCO – 2223 (AMSC)	Densitatea de curent [A/cm <sup>2</sup> ] pentru I = 150A,	17200		13300
	Grosimea medie, [mm]	0,21±0,023		0,255±0,0285
	Lățimea, [mm]	3,9 – 4,3		4,2 – 4,4
	Diametrul minim de încovoiere [mm]	100		38
	Rezistența nominală maximă la întindere [MPa]:			
	- temperatura camerei	65		200
	- temperatura azotului lichid (77 K)	65		250
BSCCO – 2223 (SEI)	Densitatea de curent a unui conductor de 150A, [A/cm <sup>2</sup> ]	15000		12000
	Grosimea medie, [mm]	0,22±0,02		0,22±0,02
	Lățimea, [mm]	4,2±0,2		4,2±0,2
	Diametrul minim de încovoiere	70		50
	Rezistența nominală maximă la întindere, [Mpa]:			
	- temperatura camerei	100		170
	- temperatura azotului lichid (77 K)	135		210

### 2.4.3.3. Conductorii de tip YBCO-123

**Tabel 2.3. Caracteristici ale benzii laminate cu cupru 2G de la AMSC, 2010 și Superpower, 2010 [4, 17]**

Specificații	Specificații	
	AMSC	Superpower
I <sub>c</sub> minim [A]	150	80 – 140
Grosimea medie [mm]	0,2	0,1
Lățimea [mm]	4,83	4
Diametru minim de îndoire [mm]	30	11
Momentul maxim de încovoiere [MPa]	150	> 550
Alungirea relativă axială maximă la 77 K	0,3%	0,45 %
Lungimea maximă a unei bucăți [m]	500	Până la 500

### 2.4.3.4. Diborura de magneziu (MgB<sub>2</sub>)

**Tabel 2.4. Conductorul MgB<sub>2</sub> de la Hyper Tech Research [9], 2010.**

Parametrul	Specificații
Densitatea de curent critic la 20 K și 2 T	175 kA/cm <sup>2</sup>
Fracțiunea de supraconductor	13 – 18% (în viitor 30%)
Diametrul [mm]	0,7 – 0,9
Numărul de filamente	7 și 19
Tratament termic / timp	700 °C la 20 min
Încovoierea maximă la 77 K	0,35%
Lungimea maximă a unei bucăți [km]	1 – 4

## 2.5. Aplicații ale materialelor supraconductoare HTS

Dezvoltarea materialelor supraconductoare HTS sub formă de fire și benzi a permis abordarea de aplicații industriale precum mașinile electrice supraconductoare, care au crescut eficiența acestora spre 99%.

Având performanțe mai ridicate decât supraconductoarele clasice, materialele HTS au permis dezvoltarea de aplicații cu performanțe ridicate în ingineria electrică, cum ar fi sisteme de stocare a energiei, cabluri electrice, motoare, transformatoare și generatoare. De asemenea, în transportul feroviar s-a dezvoltat MAGLEV-ul.

## CAPITOLUL 3. MODELUL FIZIC

Pentru a descrie principiul de funcționare al EMSD este necesară definirea modelului fizic al acestuia. Astfel, se vor stabili ipotezele fizice simplificatoare, regimul de funcționare și se vor identifica principalele fenomene care caracterizează funcționarea acestuia.

Evaluarea câmpului electromagnetic și problema de transfer de căldură sunt rezolvate folosind metode analitice și analiza numerică.

### 3.1. Modelul fizic – problema de câmp electromagnetic

Legile care definesc principiul de funcționare al EMSD și condițiile la limită ale componentelor EMSD – ului constituie modelul fizic al acestuia.

#### 3.1.1 Modelul de câmp electromagnetic staționar în electromagnetul supraconductor

Relațiile fundamentale ce descriu câmpul magnetic staționar sunt următoarele: legea circuitului magnetic, legea fluxului magnetic și legea constitutivă pentru câmp magnetic.

Câmpul magnetic într-un domeniu are soluție unică dacă se cunosc următoarele date:

- Geometrice – date privind forma și dimensiunile domeniului în cauză;
- Date de material;
- Sursele interne în orice punct din domeniul în cauză;
- Condițiile externe care reprezintă condițiile pe frontieră (condiție Dirichlet sau condiție Neumann).

În formă staționară rezultă următorul model matematic pentru câmpul electromagnetic

$$\begin{cases} \operatorname{div}\mathbf{B} = 0 \Rightarrow (\exists) \mathbf{A} \text{ a.î. } \mathbf{B} = \operatorname{rot}\mathbf{A} \\ \operatorname{rot}(\bar{\mu}^{-1}\operatorname{rot}\mathbf{A}) = \mathbf{J} + \operatorname{rot}(\bar{\mu}^{-1}\mu_0\mathbf{M}_p) \end{cases} \quad (3.1)$$

În mediu liniar și cu  $\mathbf{M}_p = 0$ , se obține

$$\operatorname{rot}(\bar{\mu}^{-1}\operatorname{rot}\mathbf{A}) = \mathbf{J}. \quad (3.2)$$

Cele mai importante teoreme ce sunt deduse din legile generale și de material ale câmpului electromagnetic sunt: teoremele generale ale energiei electromagnetice, impulsului electromagnetic, potențialelor electrodinamice generale, forțelor generalizate, tensiunilor maxwelliene în câmp electric și magnetic și densităților de volum ale forțelor electrice și magnetice.

### 3.2 Problemă de transfer de căldură

Între două corpuri, transferul de căldură este realizat prin *conducție termică*, *convecție termică* și *radiație termică*.

#### ***Transferul de căldură prin conducție***

Ecuția fluxului termic conductiv este definită de legea lui Fourier, care caracterizează transferul de căldură prin conducție termică unidirecțională printr-un material cu o conductivitate termică [28]

$$\mathbf{q}_x \stackrel{\text{def}}{=} -k\operatorname{grad}T, \quad (3.3)$$

unde  $k$  [W/mK] este conductivitatea termică,  $T$  [K] este temperatura,  $A$  [m<sup>2</sup>] este aria secțiunii normale pe direcția de propagare a fluxului.

#### ***Transfer de căldură convectiv***

Convecția termică este descrisă de legea lui Newton [28]

$$q''_{\text{conv}} \stackrel{\text{def}}{=} h(T_w - T_\infty), \quad (3.4)$$

unde  $T_w$  [K] reprezintă temperatura suprafeței corpului solid,  $T_\infty$  [K] reprezintă temperatura termodinamică medie a fluidului,  $q''_{\text{conv}}$  [W/m<sup>2</sup>] este fluxul termic transmis prin convecție,  $h$  [W/m<sup>2</sup>K] reprezintă coeficientul de transfer termic convectiv.

### **Transfer de căldură radiativ**

Fluxul de căldură radiativ emis de o suprafață reală, așa numita suprafață gri, este doar o fracție a celei emise de un corp negru [28]

$$q''_{\text{SB,b}} = \varepsilon \sigma T_s^4, \quad (3.5)$$

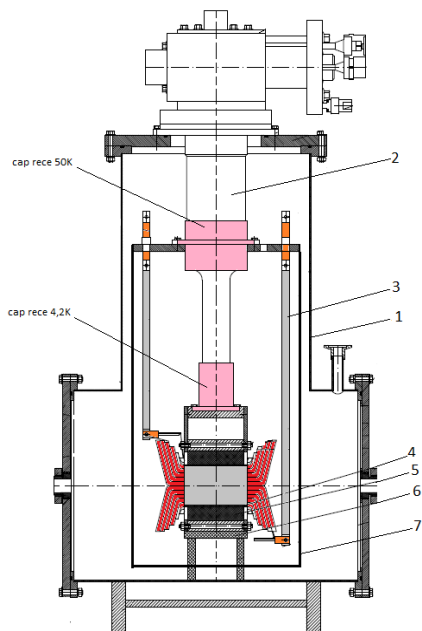
unde  $T_s$  este temperatura absolută a suprafeței corpului,  $\sigma$  este constanta Stefan-Boltzmann ( $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$  W/m<sup>2</sup>K) și  $\varepsilon$  este emisivitatea.

## **CAPITOLUL 4. PROIECTAREA MODELULUI EXPERIMENTAL EMSD**

În acest capitol se prezintă etapa premergătoare proiectării magnetice a unui prototip de EMSD, un model „conceptual”, care poate genera un câmp magnetic cu inducția de maxim 3 T și uniform ( $\sim 10^{-3}$ ) în zona de interes ce este situată în „canalul cald” al EMSD.

### **4.1. Prezentare generală a electromagnetului HTS**

Modelul experimental de EMSD are structura indicată în Fig. 4.1:



*Structura electromagnetului HTS:*

1. Criostat;
2. Criorăcitor;
3. Conductori HTS;
4. Înfășurarea supraconductoare;
5. Jug;
6. Suport izolator;
7. Ecran termic.

Fig. 4.1. Modelul experimental de electromagnet HTS.

## 4.2. Model conceptual de EMS

### 4.2.1. Caracteristici generale

Pentru a putea funcționa ca magnet deflector, electromagnetul îndeplinește cerințele sintetizate în Tabel 4.1.

**Tabelul 4.1. Caracteristici impuse ale electromagnetului**

Parametrul	Specificații
Inducția magnetică	2 - 3 T
Neuniformitatea câmpului magnetic (definitia)	$\sim 10^{-3}$
Diametrul canalului interior	20 mm
Volumul util al câmpului magnetic	15 cm <sup>3</sup>
Tipul / modul de răcire	Contact / Criocooler
Materialul supraconductor	HTS de tip
Nivelul de vid	$10^{-3} - 10^{-5}$ torr

### 4.2.2. Descrierea modelului conceptual de EMSD

Ținându-se cont de constrângerile și cerințele impuse, s-a elaborat modelul conceptual EMSD și este prezentat schematic în Fig. 4.2.

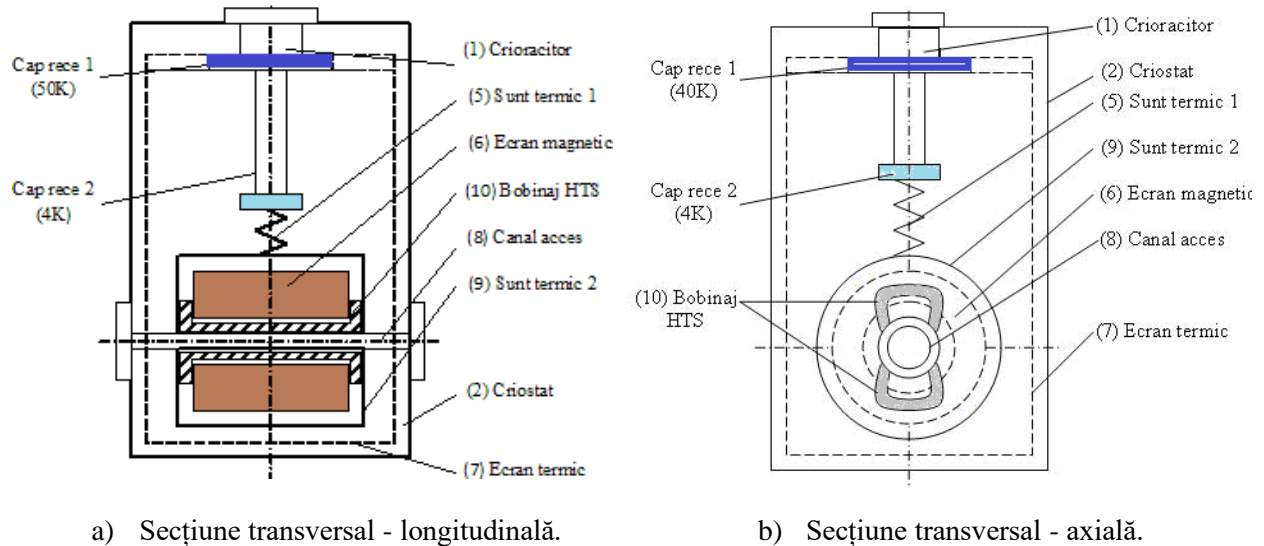


Fig. 4.2. Model conceptual de electromagnet dipolar HTS.

## 4.3. Bobinele supraconductoare

Cu ajutorul modelării numerice care a permis evaluarea câmpului magnetic generat de electromagnet, s-a determinat numărul de bobine, configurația acestora și numărul de spire necesar pentru fiecare bobină în parte astfel încât câmpul magnetic dorit să poată fi generat (Tabel 4.2).

**Tabel 4.2. Caracteristicile bobinelor supraconductoare**

Bobina HTS	Grosime bobinaj [mm]	Nr. de spire
1	13.5	75
2	12.5	69.4
3	11	61
4	9.5	53
5	7.5	42
6	5.0	28
7	2.5	14

#### 4.4. Sistemul criogenic de răcire

Acest sistem de răcire al electromagnetului are ca și componentă principală, criorăcitorul Gifford – McMahon, eliminându-se astfel utilizarea agenților criogenici. Tipul de criorăcitor este unul cu ciclu închis, avînd două trepte de răcire (50 K și 4,2 K). S-a utilizat un criorăcitor de tip RDK 415D, achiziționat de la Sumitomo [30].

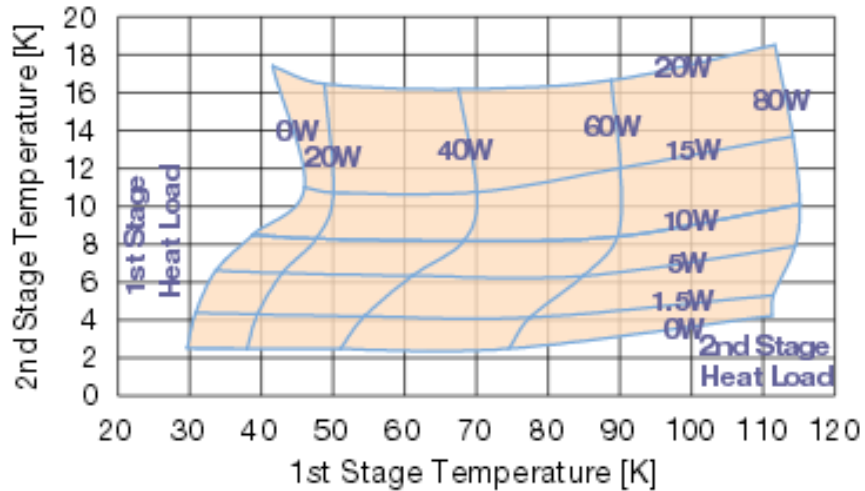


Fig. 4.3. Caracteristica funcțională a criorăcitorului RDK-415D [30].

#### 4.5. Caracteristicile conductorilor de curent HTS

În proiectarea conductorilor de curent HTS s-a ținut cont de parametrii funcționali, cum ar fi curentul maxim de alimentare al bobinelor HTS și un transfer de căldură redus către electromagnetul HTS.

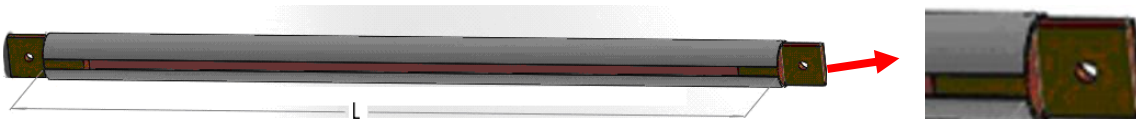


Fig. 4.4. Conductorul HTS.

## CAPITOLUL 5. PROIECTAREA PRIN MODELARE NUMERICĂ A ELECTROMAGNETULUI SUPRACONDUCTOR DIPOLAR

### 5.1. Stadiu actual

Supraconductibilitatea are multe aplicații de interes în medicină, știință, sisteme energetice, transport și electronică. Una dintre cele mai importante aplicații ale supraconductibilității sunt electromagneții supraconductori, de exemplu electromagneți pentru RMN, MRI, electromagneți pentru acceleratoare de particule și electromagneți pentru fuziune nucleară. Majoritatea acestor aplicații încă folosesc materiale supraconductoare de temperaturi joase (4,2 K – 30 K).

### 5.2. Electromagnet dipolar supraconductor

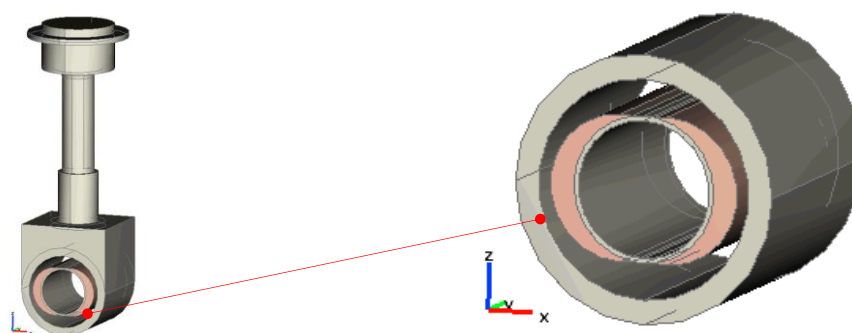
Structura electromagnetului supraconductor dipolar (EMSD) este următoarea:

1. Criostatul electromagnetului construit din oțel inox nemagnetic (austenitic).
2. Criorăcitorul (cryocooler) Gifford - McMahon de tip RDK – 415D cu două nivele ale temperaturii la 50 K și 4,2 K.
3. Conductori de curent HTS din material supraconductor HTS de tip YBCO.
4. Bobine HTS din bandă supraconductoare de tip YBCO și impregnată cu rășină epoxidică de temperaturi joase.
5. Jug de fier realizat din oțel carbon OL.
6. Suport electromagnet realizat din DurAl.
7. Ecran termic 50 K realizat din tablă de cupru lustruită.

Bobinele HTS sunt realizate în formă de șa, cu excepția a două dintre acestea, care au forma unui circuit de curse. Un număr total de 10 bobine sunt interconectate pentru a genera un câmp magnetic uniform cu inducția de 2,5 T.

### 5.3. Proiectarea și modelarea numerică a EMSD – câmpul magnetic

Din cauza saturării fierului, se va folosi o înfășurare pentru câmp magnetic uniform, produsă de un electromagnet fără miez din fier (Fig. 5.1).



a) Subansamblul criostat – magnet.

b) Bobina HTS pentru câmp uniform.

Fig. 5.1. Modelul CAD al electromagnetului HTS pentru câmp uniform.



### 5.3.1. Înfășurarea de excitație pentru câmp uniform

Analiza problemei de câmp magnetic este realizată pentru un model 2D reprezentativ, respectiv în planul median al electromagnetului (un plan de secțiune transversală, perpendicular pe direcția  $Oy$  din Fig. 5.1).

Modelul staționar al câmpului magnetic, pentru medii liniare, în electromagnetul HTS este descris de ecuația cu derivate parțiale [44]

în înfășurare

$$\nabla \times (\mu_0^{-1} \mu_r^{-1} \nabla \times \mathbf{A}) = \mathbf{J}, \quad (5.1)$$

în afara înfășurării

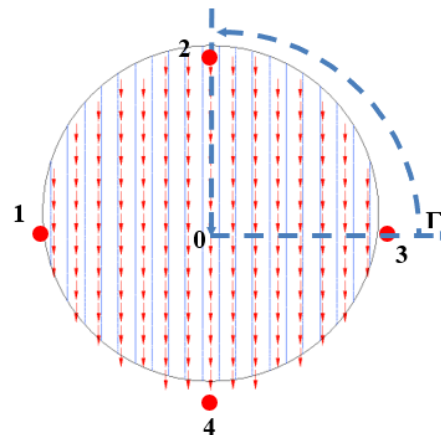
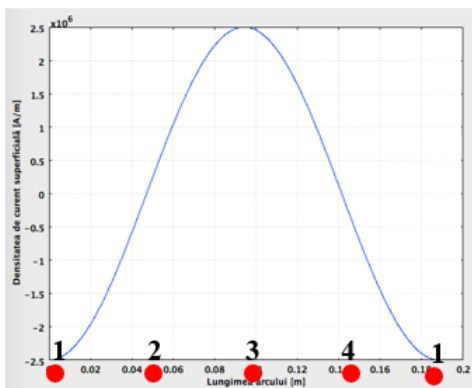
$$\nabla \times (\mu_0^{-1} \mu_r^{-1} \nabla \times \mathbf{A}) = 0, \quad (5.2)$$

unde  $\mathbf{J}$  [A/m<sup>2</sup>] este densitatea curentului electric din înfășurări,  $\mathbf{A}$  [T/m] este potențialul magnetic vector,  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  H/m reprezintă permeabilitatea magnetică a vidului iar  $\mu_r$  este permeabilitatea relativă. Condiția la limită care completează problema de câmp magnetic este izolație magnetică, respectiv  $\mathbf{n} \times \mathbf{A} = 0$ , unde  $\mathbf{n}$  este normala exterioară la domeniul de calcul.

### 5.3.2. Modelul analitic pentru calculul câmpului magnetic

Într-o primă etapă, solenația de excitație se aproximează cu o pânză de curent echivalentă,  $J_s = J_0 \cos \alpha$ , unde  $\alpha$  este unghiul la centru (Fig. 5.2 b). În Fig. 5.2 este prezentată inducția magnetică în domeniul considerat, evidențiată atât prin linii de câmp cât și prin săgeți. Pentru cazul în care  $J_0 = 2,5 \cdot 10^6$  A/m, se obține câmp magnetic pe direcția  $y$  cu o valoare a inducției egală cu  $B_y = 3,124$  T.

În etapa de rezolvare a problemei care pentru distribuția solenației ca pânză de curent consideră ecuațiile (5.1) – (5.2), s-a folosit analiza numerică bazată pe metoda elementelor finite [45].



a) Solenația de excitație aproximată cu o pânză de curent.

b) Inducția magnetică,  $B_y = 3,142$  T.

Fig. 5.2. Înfășurare pentru câmp magnetic uniform – solenația este distribuită armonic.

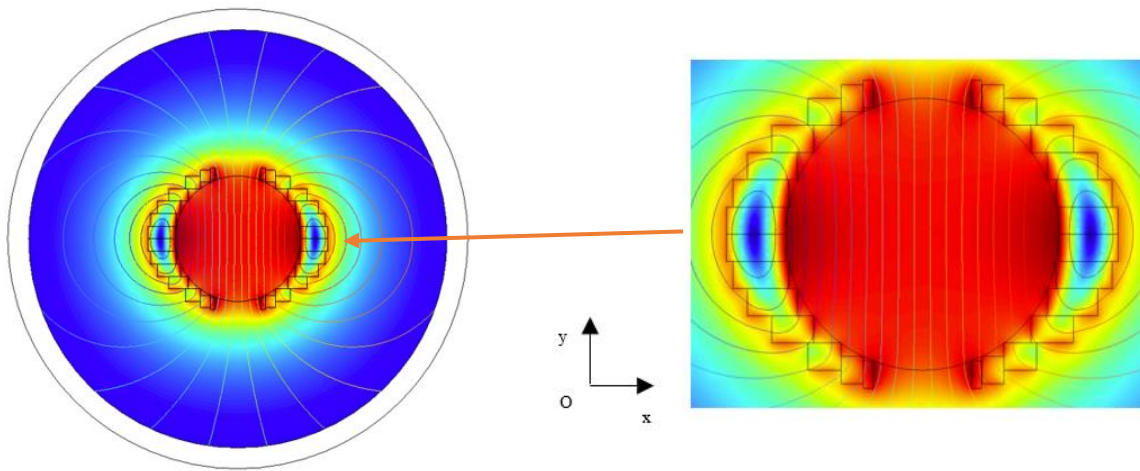
Legea circuitului magnetic se aplică pe conturul denumit  $\Gamma$  (Fig. 5.2.b),  $Arc(P_3P_2) \rightarrow \infty$

$$n \cdot i = \oint_{\Gamma} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{r} = \int_{P_2}^{P_0} \mathbf{H} dz = \mathbf{H}r = \int_0^{\pi/2} JA_{amp} \cos \theta r d\theta = JrA_{amp}, \quad (5.3)$$

unde  $i$  [A] reprezintă intensitatea curentului electric printr-o spiră,  $n$  reprezintă numărul de spire,  $\mathbf{H}$  [A/m] reprezintă intensitatea câmpului magnetic (componenta verticală) și  $A_{amp}$  [m] reprezintă “amplitudinea” grosimii înfășurării (care este măsurată în direcție radială, la  $\alpha = 0$ ).

### 5.3.3. Modelul numeric pentru evaluarea câmpului magnetic

Figura 5.3 prezintă soluția numerică a problemei de câmp magnetic prin hartă de culoare și linii de câmp pentru inducția magnetică. În aceste împrejurări,  $B \sim 2,303$  T și  $J = 3 \cdot 10^8$  A/m<sup>2</sup> pentru  $n = 250$  spire.



a) Inducția magnetică.

b) Inducția magnetică – detaliu.

Fig. 5.3. Reprezentarea câmpului magnetic în solenoidul de tip HTS cu înfășurare cosinusoidală,  $B_{max} = 2,3$  T; dimensiunile sunt în mm.

### 5.4. Proiectarea prin modelarea numerică a EMSD – forțe electrodinamice – 2D

Asupra bobinelor acționează forțe de tip Laplace [44]

$$\mathbf{f} = \mathbf{J} \times \mathbf{B}, \quad (5.4)$$

unde  $\mathbf{f}$  [N/m<sup>3</sup>] reprezintă densitatea de forță. Folosind soluția numerică a problemei de câmp magnetic staționar, se determină distribuția lui  $\mathbf{f}$ .

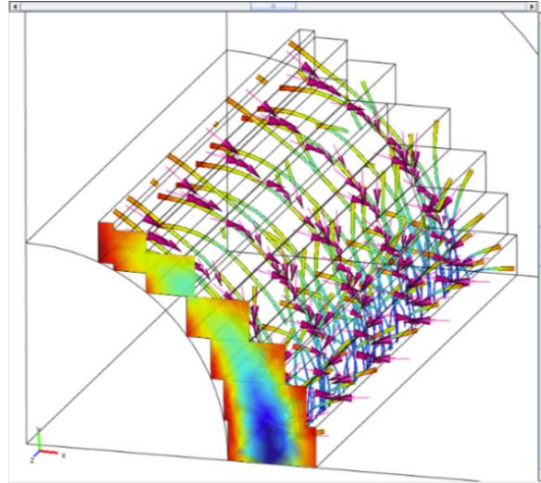


Fig. 5.4. Distribuția densității de forță electrodinamică, care acționează asupra bobinelor HTS, reprezentată prin tuburi de câmp, hartă de culoare și săgeți – valoarea maximă este  $6,08 \cdot 10^8 \text{ N/m}^3$ .

În Figura 5.4 este prezentată distribuția densității forțelor electrodinamice (Laplace) care acționează asupra laturilor bobinelor parcurse de curent și situate în câmp magnetic (propriu), soluție a problemei 3D de câmp magnetic.

### 5.5. Evaluarea forțelor electrodinamice produse de câmpul magnetic al EMSD – 3D

După cum a fost deja menționat, se dorește proiectarea și simularea unui electromagnet dipolar supraconductor, destinat generării unui câmp magnetic intens ( $\sim 2,5 \text{ T}$ ) și cu o uniformitate ridicată ( $10^{-3}$ ) în regiunea centrală a electromagnetului denumită „zona de câmp corespunzător” (GFZ).

#### 5.5.1. Identificarea zonelor celor mai solicitate de forțele electrodinamice

Pentru calculul forței Laplace, a fost folosită următoarea expresie

$$\mathbf{F} = \frac{1}{\mu_0} \int_V [(\nabla \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B}] dV, \quad (5.5)$$

unde  $\mathbf{F}$  [N] reprezintă forța Laplace rezultantă iar  $V$  [ $\text{m}^3$ ] este volumul bobinajului.

În această problemă sursa de câmp electric este pe frontieră (secțiunea transversală îndepărtată, prin bobină, Fig. 5.5). Se presupune o densitate de curent de  $10^7 \text{ A/m}^2$ .

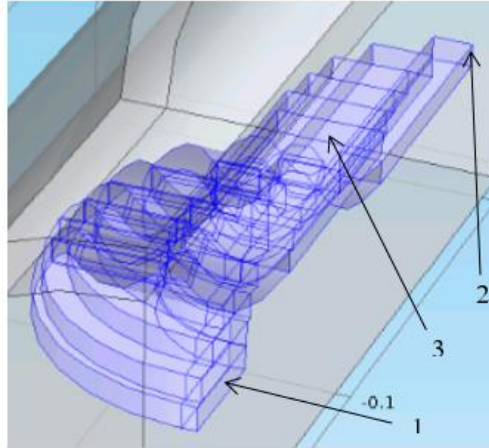
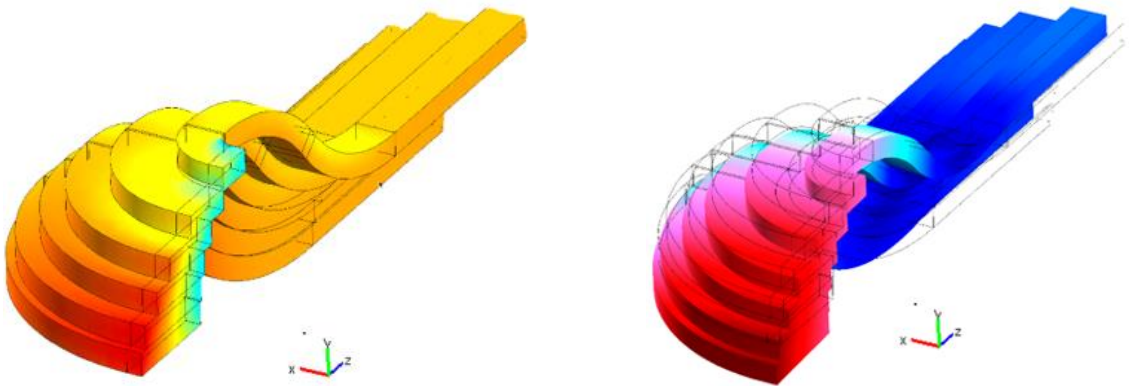


Fig. 5.5. Modelul numeric redus – detaliu.

În continuare, utilizând forțele Laplace astfel determinate se calculează solicitările mecanice, prezentate în Fig. 5.6.



a) Componenta  $O_z$ , forța Laplace, valoarea maximă  $8 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$ .

b) Deformarea maximă este  $8,2 \mu\text{m}$ .

Fig. 5.6. Rezultate de simulare numerică pentru problema structurală.

### 5.5.2. Evaluarea deformărilor ce pot apărea în EMSD, în urma acțiunii forțelor electrodinamice

Deformarea înfășurărilor bobinelor datorită forțelor electrodinamice este influențată de suportul mecanic pe care acestea sunt fixate. În studiul de față s-au analizat trei cazuri (Fig. 5.7, cazul cu deformarea cea mai importantă).

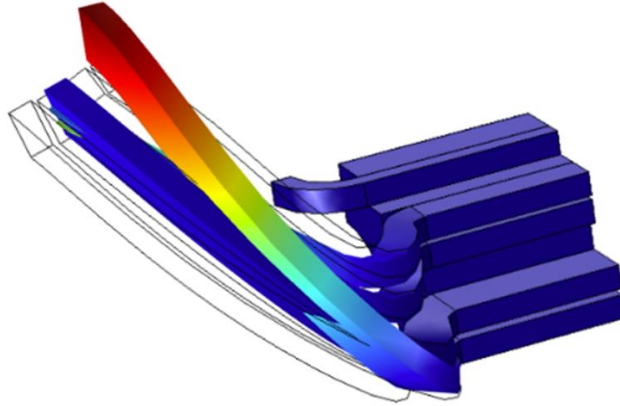


Fig. 5.7. Deformările generate de forțele electrodinamice. Canalul cald este singura piesă fixă, valoare maximă a deformării 0,0293 m. Canalul cald este punctul de sprijin. Valorile sunt exprimate în metri. Deformările sunt amplificate de 5000 de ori pentru o mai bună vizualizare.

În acest studiu s-au folosit proprietățile de bază (modulul lui Young  $E = 113 \text{ GPa}$ , coeficientul Poisson  $\nu = 0,1$ , densitatea masică  $\rho = 6,3 \text{ g / cm}^3$ ) [48].

### 5.6. Proiectarea și modelarea numerică a EMSD – transfer de căldură

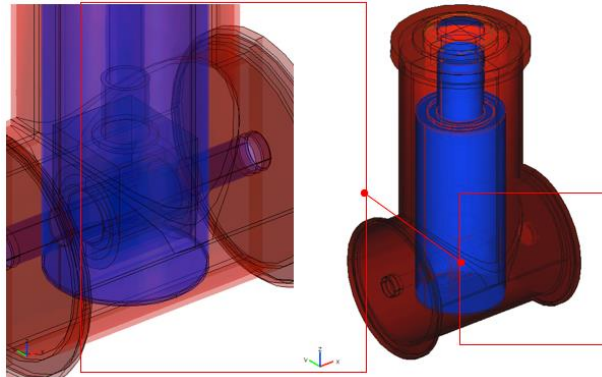


Fig. 5.8. Distribuția temperaturii în sistemul criostat și electromagnetul de tip HTS,  $T_{max} = 278 \text{ K}$ .

Figura 5.8 prezintă câmpul de temperatură în domeniul considerat (culorile sunt proporționale cu temperatura locală) considerând un  $h = 2 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

**Tabel 5.1. Sarcini termice estimate numeric și analitic**

Treapta de răcire	Puterea termică [W]	
	Analiza numerică	Calcul analitic
A 2-a incintă rece (treapta 2), 50 K	15,76	16,35
Prima incintă rece (treapta 1), 4 K	6,94	7,65
Transferul termic din exterior, $T_{mediu} = 293,15 \text{ K}$ (Sarcina termică totală)	22,70	24

Valorile din Tabel 5.1 sunt verificate experimental.

#### 5.6.1. Calculul analitic al sarcinilor termice produse de sistem (suportate de crioracitor)

*Fluxuri termice conductive în elementele solide*

A fost calculată integrala conductivității termice având ca referință temperatura de 4 K,  $\int_{4K}^{T_2} k(T)dT$ , pentru cele mai des utilizate materiale în fabricarea de criostatate:

$$\dot{q}_{cond} = \frac{A}{L} \int_{T_1}^{T_2} k(T)dT = \frac{A}{L} \left\{ \int_{4K}^{T_2} k(T)dT - \int_{4K}^{T_1} k(T)dT \right\}. \quad (5.6)$$

unde  $A$  [m<sup>2</sup>] este aria secțiunii transversale,  $L$  [m] este lungimea;  $T_1$  și  $T_2$  sunt temperaturile de la extremitățile elementului (conductori de curent HTS).

*Fluxuri termice radiative (criostat-ecran termic, ecran termic - electromagnet)*

Fluxul de căldură radiativ a fost calculat folosind următoarea formulă [50]

$$q_r = \varepsilon_r \sigma (T_{cald}^4 - T_{rece}^4). \quad (5.7)$$

Sarcinile termice calculate analitic sunt verificate de rezultatele obținute prin modelare numerică, respectiv obținute experimental (Tabel 5.1).

### 5.7. Modelarea numerică a funcționării joncțiunilor supraconductoare

În Fig. 5.9.a), câmpul magnetic este reprezentat prin linii de câmp ale inducției magnetice.

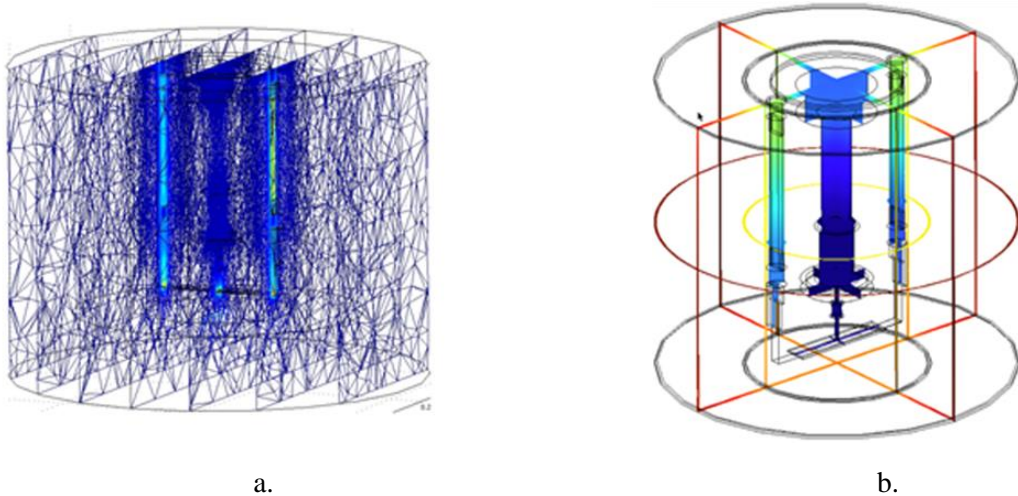


Fig. 5.9. Inducția magnetică reprezentată prin linii de câmp, valoare maximă 0,03 T (a) și distribuția temperaturii– valorile sunt în grade Kelvin, între 4,2 K și 292 K (b).

Problema de transfer termic a fost rezolvată folosind, de asemenea, tehnica FEM. Au fost folosite elemente Lagrange liniare pentru integrarea unei probleme de câmp scalar neliniară.

**Tabel 5.2. Sarcinile termice extrase de criorăcitorul G-M**

Treapta de răcire	Sarcina termică [W]
I (50 K)	30,70
II (4,2 K)	3,76

În Tabel 5.2 sunt prezentate sarcinile termice ce trebuie extrase din sistem, cu ajutorul criorăcitorului.



## CAPITOLUL 6. REALIZARE DE MODEL EXPERIMENTAL PENTRU EMSD

### 6.1. Realizarea modelului experimental

În continuare va fi prezentată realizarea principalelor componente ale sistemului electromagnetului supraconductor astfel încât să fie obținuți parametri impuși inițial [53].

#### A. Bobinele supraconductoare

Sunt două tipuri constructive de bobine: de tip „stadion” și de tip „Șa”.



Fig. 6.1. Bobinele supraconductoare HTS tip stadion.



Fig. 6.2. Bobinele supraconductoare HTS de tip „Șa”.

#### B. Suportul bobinelor

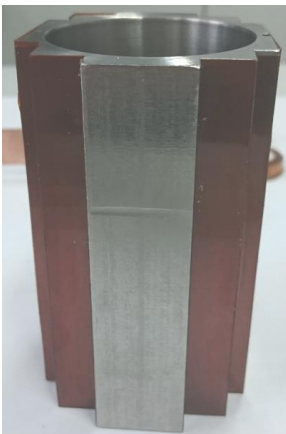


Fig. 6.3. Suportul bobinelor HTS.

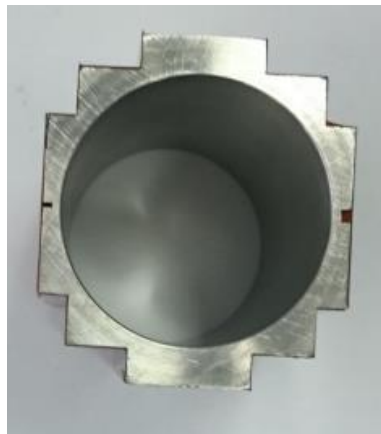


Fig. 6.4. Vedere în secțiune a suportului bobinelor.



Fig. 6.5. Ansamblul bobinelor și suportul lor.

Suportul bobinelor (Fig. 6.3, 6.4.) are rolul de a susține ansamblul (Fig. 6.5.) și de a menține poziția fixă a acestora în locațiile corespunzătoare, pentru a se asigura generarea câmpului magnetic dipolar uniform.



Fig. 6.6. Șuntul termic.

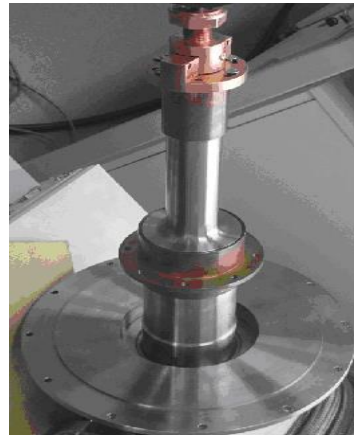


Fig. 6.7. Șunt termic asamblat pe criorăcitor.

### C. Șuntul termic

Este realizat din cupru masiv, pentru o conducție termică maximă (Fig. 6.6, 6.7).

### D. Ecranul magnetic (jug de fier)

Acesta are rolul de a închide liniile de câmp magnetic și de a contribui la uniformizarea câmpului magnetic.



Fig. 6.8. Bobinele HTS și jugul, vedere axial – frontală.

### E. Ecranul termic

Acesta are rolul de a proteja bobina supraconductoare și capul rece (4,2 K) al criorăcitorului de radiația termică provenită de la carcasa criostatului (Fig. 6.9).





Fig. 6.9. Ecranul termic al electromagnetului

### E. Criostatul

Criostatul este realizat din oțel inox nemagnetic (austenitic) într-o geometrie cu simetrie biaxială. Principalele componente ale criostatului sunt prezentate în Fig. 6.10 și 6.11. Criostatul are un corp principal (1) și trei flanșe de închidere (2). Deoarece electromagnetul funcționează într-un mediu vidat, criostatul trebuie vidat printr-o cuplă de vidare (3) conectată la pompa de vid din exterior. Alimentarea electromagnetului este făcută prin intermediul a două treceri de curent (4), iar pentru monitorizarea și testarea electromagnetului este folosită o mufă pentru semnale electrice (5) ce preia semnalele date de senzori și le transmite către aparatele de măsură.

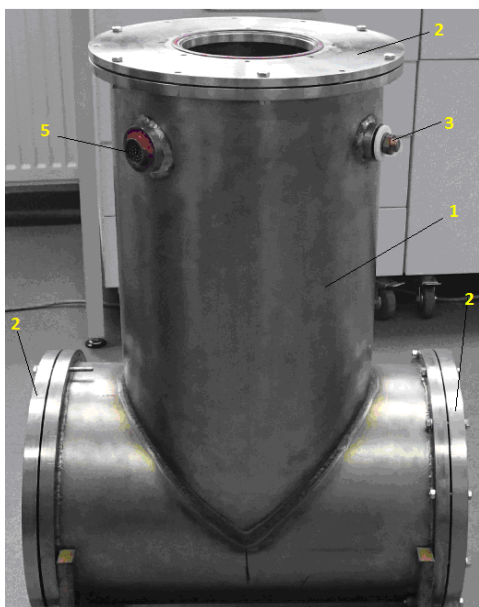


Fig. 6.10. Criostat vedere laterală.

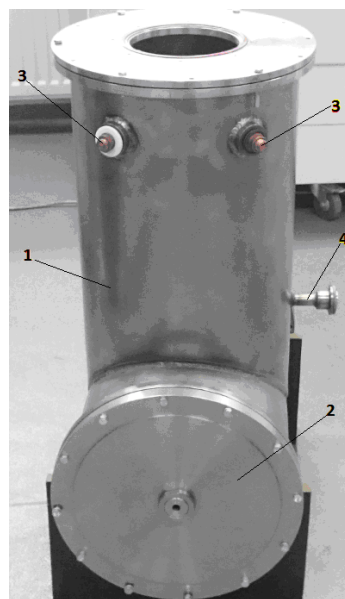


Fig. 6.11. Criostat vedere frontală.

### F. Criorăcitorul

Criorăcitorul (Fig. 6.12) este o pompă termică care lucrează în două trepte de răcire.

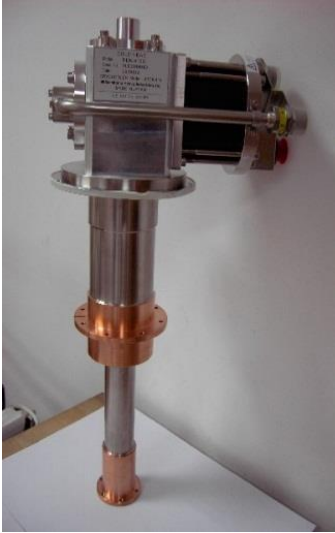


Fig. 6.12. Criorăcitor cu două trepte de răcire Gifford-McMahon RDK-415 D.

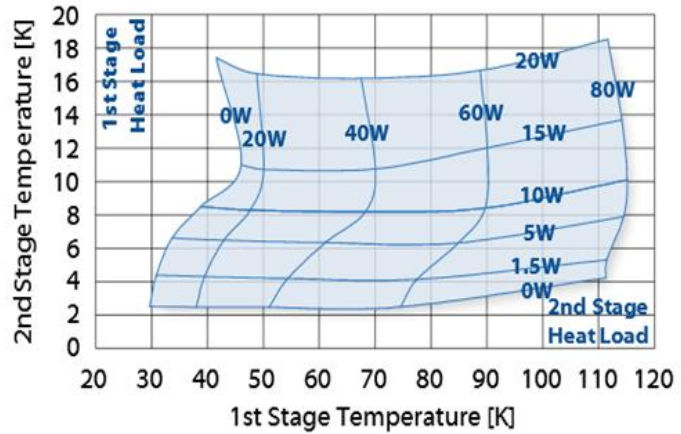


Fig. 6.13. Caracteristica de funcționare a criorăcitorului RDK-415 D [3].

## H. Conductori de curent

Acești conductori de curent asigură alimentarea bobinelor supraconductoare la curenți relativ intenși ( $\sim 200$  A).

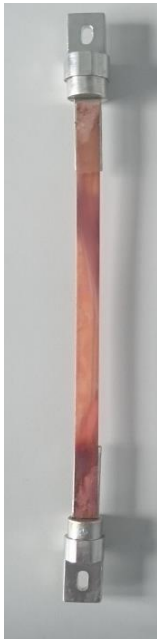


Fig. 6.14. Conductorii HTS cu joncțiunile Cu-HTS la capete.



Fig. 6.15. Conductorii HTS asamblați în carcase.



Fig. 6.16. Conductorii de cupru împreună cu criorăcitorul.

## 6.2. Asamblarea modelului experimental de EMSD

Toate componentele constitutive ale magnetului supraconductor dipolar au fost asamblate în criostat și cuplate la criorăcitor (Fig. 6.17).



c. Ansamblul criostat – bobine – ecran termic, montate în criostat.



d. Electromagnet supraconductor dipolar (EMSD) asamblat.

Fig. 6.17. Ansamblul electromagnet supraconductor dipolar.

Sistemul astfel asamblat (Fig. 6.17) a fost testat preliminar pe subansambluri (teste de vidare și răcire la temperaturi criogenice, verificarea intrării în supraconducție a bobinajelor supraconductoare) și apoi supus testelor finale de funcționare prin alimentarea de la o sursă de curent continuu.

## CAPITOLUL 7. TESTAREA ELECTROMAGNETULUI SUPRACONDUCTOR

În vederea stabilirii parametrilor funcționali experimentali ai EMSD-ului, au fost realizate montaje experimentale de măsurare a acestora, au fost realizate montaje experimentale pentru măsurarea curentului critic al benzii supraconductoare, a bobinelor supraconductoare individuale la temperatura azotului lichid, a câmpului magnetic generat și uniformității câmpului magnetic generat de electromagnetul HTS, a rezistențelor electrice ale joncțiunilor HTS / HTS și HTS / Cu. Aceste montaje și rezultatele obținute sunt descrise în continuare.

### 7.1. Teste și experimente efectuate pe EMSD

Testele efectuate preliminar au avut drept scop verificarea experimentală a condițiilor necesare pentru buna funcționare a ansamblului: nivelul de vid din criostat și funcționarea criorăcitorului, precum și măsurarea curenților critici ai bobinelor HTS a câmpului magnetic generat de EMSD în centrul său, uniformitatea câmpului magnetic generat.

#### 7.1.1. Testarea condițiilor de vid în criostat

Pentru efectuarea vidării ansamblului magnet supraconductor (criostat), s-a utilizat un sistem de vidare cu pompă turbomoleculară EDWARDS [55], cu capacitate de 50 l/min și o presiune finală de  $10^{-8}$  mbar, după cum se poate vedea din Fig. 7.1.

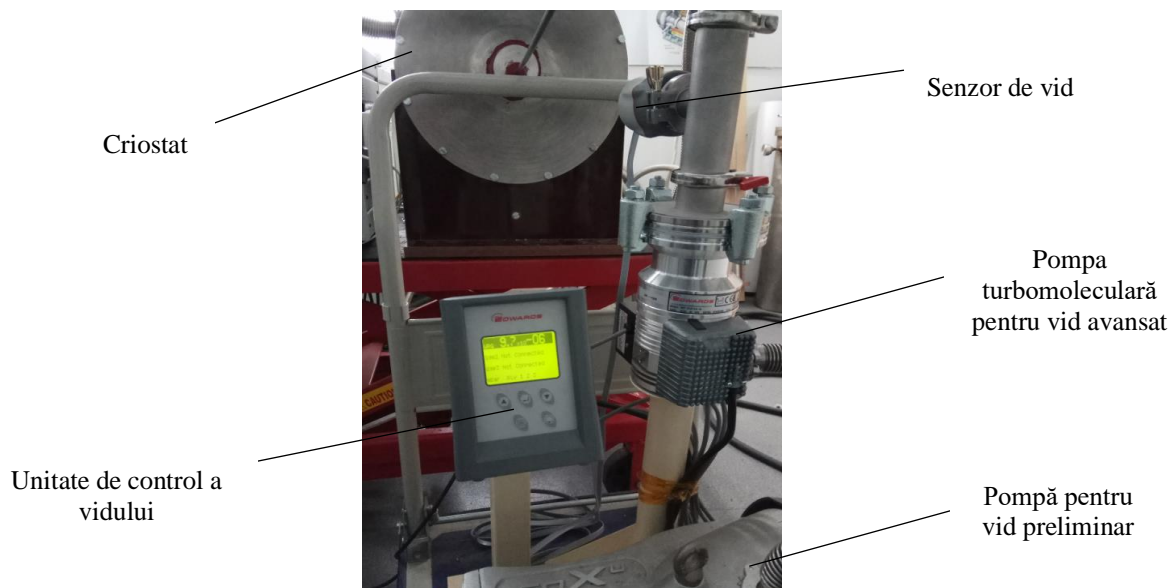


Fig. 7.1 Vidarea criostatului electromagnetului EMSD.

Presiunea de lucru din criostat a fost de  $10^{-6}$  mbar.

### 7.1.2. Testarea parametrilor funcționali ai criorăcitorului

Criorăcitorul este de tip RDK-D415, produs al companiei SHI- Cryogenics [30]. Caracteristica funcțională a acestui criorăcitor este prezentată în Fig. 7.2.

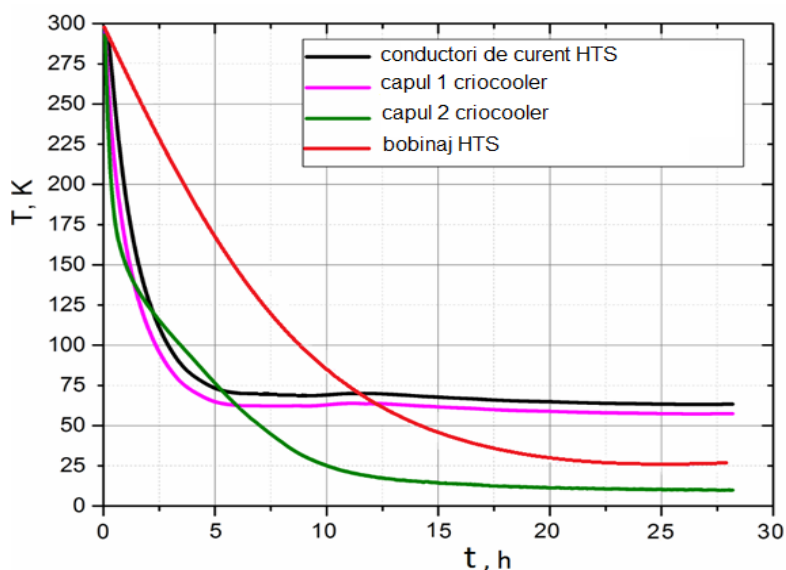


Fig. 7.2. Teste de răcire a magnetului dipolar HTS cu criorăcitorul RDK 415D.

### 7.1.3. Măsurarea parametrilor caracteristici ai bobinelor supraconductoare

Au fost realizate opt bobine supraconductoare, ai căror număr de spire și parametrii electrici sunt prezentați în Tabel 7.1.

**Tabelul 7.1. Parametrii bobinelor supraconductoare HTS**

Nr. Bobină	Număr spire	Rezistență electrică [ $\Omega$ ]	Inductivitate [H]
1	56	3,095	$1,15 \cdot 10^{-3}$
2	56	3,017	$1,10 \cdot 10^{-3}$
3	73	3,94	$1,80 \cdot 10^{-3}$
4	68	3,41	$1,36 \cdot 10^{-3}$
5	68	3,715	$1,59 \cdot 10^{-3}$
6	73	4,43	$2,28 \cdot 10^{-3}$
7	38	0,9123	$0,21 \cdot 10^{-3}$
8	38	0,94125	$0,22 \cdot 10^{-3}$

Temperatura la care s-au efectuat măsurătorile în cadrul laboratorului a fost de 25°C.

### Sistemul de măsură al curentului critic

Schema de principiu a montajului experimental utilizat pentru măsurarea curentului critic al bobinelor supraconductoare este prezentată în Fig. 7.5.

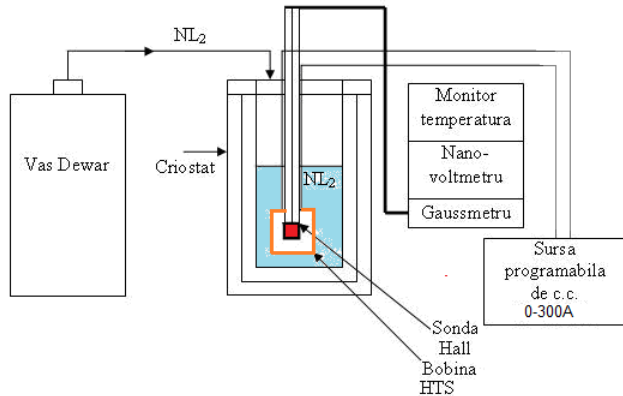


Fig. 7.3. Schema montajului de măsură a curentului critic pentru bobinele supraconductoare.

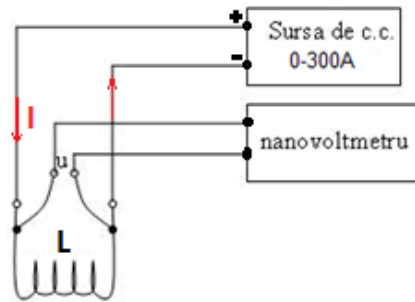


Fig. 7.4. Principiul metodei de măsură.

Curentul critic ( $I_c$ ) a fost determinat folosind metoda de măsură în 4 puncte (Fig. 7.4.), conexiunile fiind efectuate direct pe proba de măsurat (Fig. 7.5).

Folosind aceeași metodă, s-a determinat experimental curentul critic al benzii supraconductoare HTS cu lățime de 6 mm, la temperatura de 77 K, rezultatul fiind prezentat în graficul din Fig. 7.6.

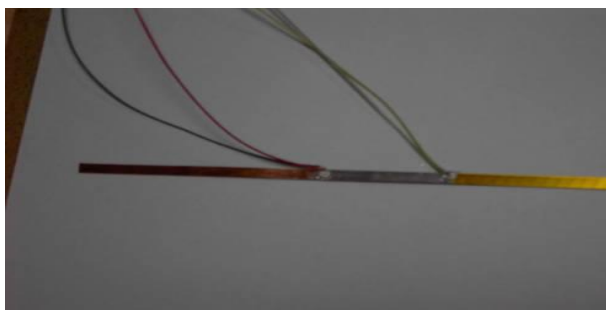


Fig. 7.5. Conexiuni de tensiune pe proba supraconductoare HTS.

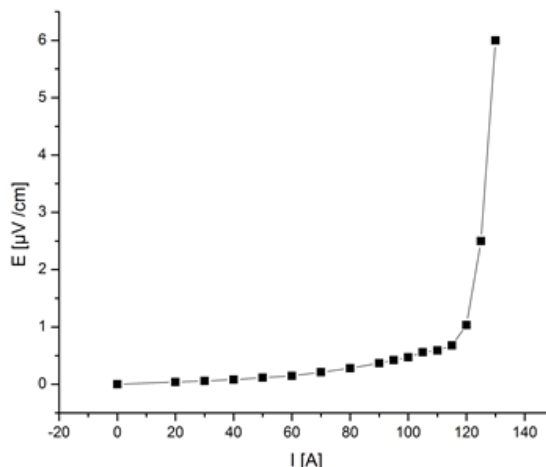


Fig. 7.6. Curentul critic pentru banda supraconductoare HTS, de tip YBCO.

**Tabel 7.2. Curenții critici ai bobinelor HTS în câmp magnetic propriu**

Nr. Bobină	Ic [A] la 77 K	B  S (f <sub>a</sub> = 6)		B ⊥ S (f <sub>a</sub> = 3)	
		Ic·f <sub>a</sub>	Ic·f <sub>a</sub>	Ic·f <sub>a</sub>	Ic·f <sub>a</sub>
1	110	660	330		
2	72	432	216		
3	70	420	210		
4	75	450	225		
5	115	690	345		
6	75	450	225		
7	84	504	251		
8	75	450	225		

Astfel, în prezența câmpului magnetic și la o temperatură de referință de 20 K, pentru bobinele supraconductoare ale magnetului dipolar, sunt următoarele valori ale curentului critic, multiplicat corespunzător cu așa numitul „factor de amplificare” – f<sub>a</sub> considerat atât pentru B||S cât și pentru B⊥S, pentru 2,5 T, considerată ca fiind cea mai mare valoare a inducției câmpului (Tabel 7.2).

#### 7.1.4. Măsurarea câmpului magnetic generat de EMSD

Conectarea sursei de curent continuu programabilă (Fig. 7.7) care poate genera max. 300 A la bornele exterioare ale electromagnetului (EMSD), permite alimentarea acestuia și generarea de câmp magnetic dipolar.

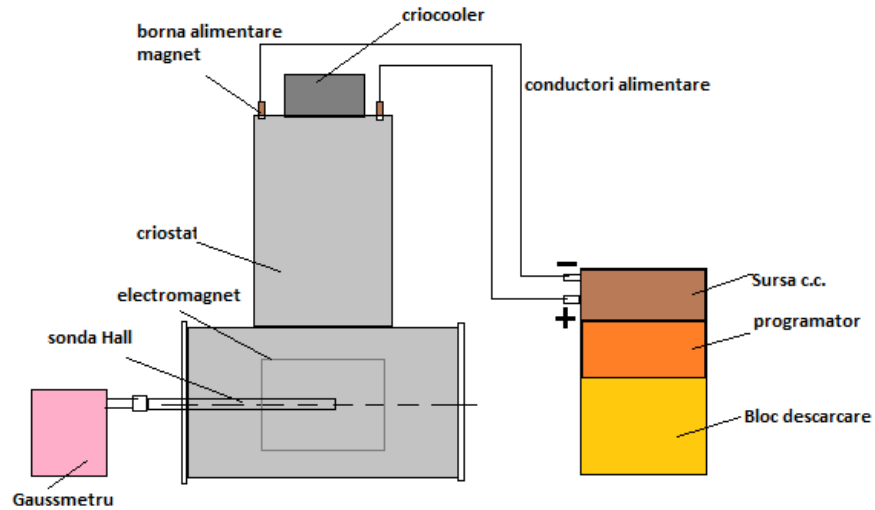


Fig. 7.7. Schema de alimentare și de măsurarea a câmpului magnetic generat de electromagnetul HTS.

În Figura 7.8 este prezentat ansamblul experimental de măsură a câmpului magnetic.



Fig. 7.8. Ansamblul EMSD și sistem de măsură a câmpului magnetic.

Câmpul generat a fost măsurat în centrul electromagnetului. Rezultatele reprezentate grafic în Fig. 7.9 și 7.10.



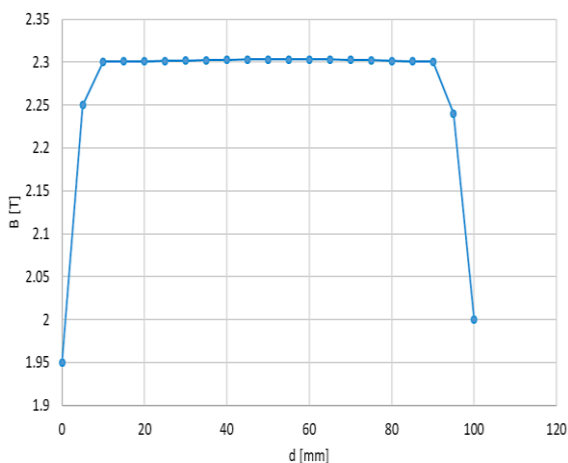


Fig. 7.9. Câmpul magnetic generat de EMSD pe axul geometric al magnetului.

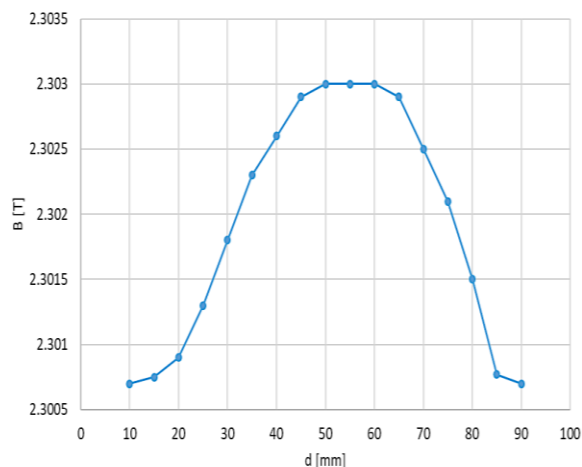


Fig. 7.10. Uniformitatea câmpului magnetic măsurat pe axul geometric al EMSD.

În Figura 7.23 este reprezentată neuniformitatea câmpului magnetic măsurat de-a lungul axei geometrice a magnetului din care rezultă o neuniformitate maximă de aproximativ 0,1% considerând zona de câmp magnetic măsurat între 10 – 90 mm.

## 7.2. Măsurarea experimentală a joncțiunilor

În prima fază s-a determinat experimental rezistența joncțiunilor la azot lichid, (77 K), rezultate prezentate în Tabel 7.3.

**Tabel 7.3. Rezistența joncțiunilor măsurată la 77 K**

Tip joncțiune/aliaj de lipire	Rezistență electrică [ $\mu\Omega$ ]
Cu-HTS/SnPb	11,50
Cu-HTS/InAg	5,88
HTS-HTS/SnPb	0,44
HTS-HTS/InAg	0,55

Se observă că cele mai bune valori obținute sunt pentru Cu – HTS folosind un aliaj de lipire InAg, în timp ce pentru HTS – HTS, valorile cele mai bune s-au obținut folosind ca aliaj de lipire SnPb.

A doua fază experimentală a reprezentat-o testarea joncțiunilor, folosind modelul experimental prezentat în subcapitolul anterior.



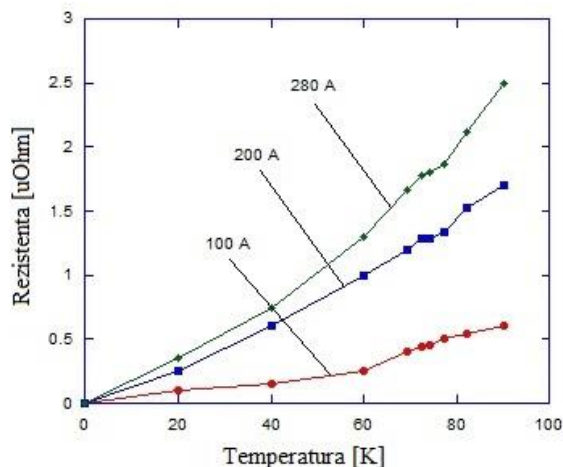


Fig. 7.11. Dependența rezistenței joncțiunii HTS – HTS în funcție de temperatură, la diferiți curenți.

## CONCLUZII

### C.1. Concluziile generale

În Capitolul 1 sunt prezentate aspecte teoretice generale ce fac legătura dintre teoria clasică și cea a materialelor supraconductoare, în ingineria electrică.

Producerea de materiale supraconductoare  $MgB_2$ , BSCCO și YBCO performante și accesibile a condus la dezvoltarea de aplicații la scară industrială, sunt prezentate în Capitolul 2. Superioare supraconductorilor clasici, materialele HTS au permis dezvoltarea de aplicații cu performanțe ridicate în ingineria electrică, cum ar fi: mașini electrice, electromagneți, stocarea energiei, cabluri electrice. De asemenea, în transportul feroviar s-a dezvoltat MAGLEV-ul, trenul de mare viteză cu suspensie magnetică, care a mărit foarte mult viteza de deplasare: la aproximativ 500 km/h. Numărul relativ încă mic de aplicații este datorat costului lor actual, ridicat.

Folosirea materialelor supraconductoare HTS, ce au performanțe ridicate în ceea ce privește curentul critic și capacitatea de transport, în realizarea a diferite aplicații, a făcut ca masa și volumul dispozitivelor realizate pe baza lor, să fie reduse foarte mult. Astfel, dispozitivele pe bază de materiale HTS au fost reduse la aproximativ 1/2 din masa și 1/3 din volumul dispozitivelor convenționale similare (cifre la nivelul anului 2005).

Lucrarea de față reprezintă tendința actuală internațională în acest domeniu, în care se înscriu și alte laboratoare de specialitate din alte țări, și anume de a realiza aplicații în domeniul electromagneților supraconductorilor cu noile materiale HTS. Astfel, miza o constituie atât creșterea performanțelor acestora (obținerea de câmpuri magnetice intense de peste 15 T), cât și înlocuirea electromagneților supraconductorilor convenționali pentru înlocuirea răcirii cu heliu lichid, cu azot lichid sau criocoolere, ceea ce ar reduce semnificativ costurile de exploatare a acestora.

Capitolul 3 reprezintă punctul de plecare în stabilirea unui model matematic pentru electromagnetul supraconductor dipolar ce a fost proiectat în capitolul 4 și s-a modelat numeric în capitolul 5.

În capitolul 4 al lucrării au fost prezentate elementele de proiectare ale modelului experimental de EMSD, împreună cu caracteristicile principale ale diverselor elemente componente.

Pentru realizarea EMSD-ului s-a ales o configurație sinusoidală pentru distribuția solenăției, alcătuit din 7+7 bobine HTS. Înfășurarile au fost proiectate și realizate sub formă de „șă”, în principal, și în formă de „stadion” restul.

Conductorii de curent HTS au fost proiectați și realizați să conducă un curent de maxim 300 A la temperatura de 77 K, motiv pentru care au fost realizați din bandă HTS de 12 mm lățime.

Criorăcitorul ales este de tip G-M cu două nivele de răcire: nivelul 1 la 50 K și nivelul 2 la 4,2 K.

În Capitolul 6 al lucrării sunt prezentate elemente constructive ale EMSD, așa cum au fost realizate în cadrul Laboratorului de Supraconductibilitate Aplicată din ICPE-CA. Au fost realizate și asamblate următoarele componente critice: criostatul electromagnetului, criorăcitorul, bobinele HTS, jugul de fier, conductorii de curent HTS, suportul electromagnetului și ecranul termic. Cu excepția criorăcitorului produs de firma Sumitomo (ShiCryogenics), de tip Gifford-McMahon, toate celelalte componente ale EMSD-ului au fost realizate, testate și asamblate în Laboratorul de Supraconductibilitate Aplicată.

## C.2. Contribuții originale

Lucrarea de doctorat „*Studii privind realizarea unui electromagnet supraconductor HTS generator de câmp magnetic, intens și uniform*” reprezintă o abordare teoretică și practică de utilizare a supraconductorilor de temperatură ridicată (HTS) la realizarea unui electromagnet supraconductor dipolar, prin efectuarea de studii specializate, proiectarea, realizarea și testarea de bobine supraconductoare cu caracteristici speciale, care intră în componența unui electromagnetului dipolar supraconductor (EMSD), prezentând totodată avantajele folosirii materialelor HTS în domeniul ingineriei electrice. Principalele domenii în care se regăsesc aceste aplicații specifice sunt: mașini electrice, medicină (RMN, CT), laboratoare de cercetare sau fizica energiilor înalte.

Contribuțiile originale ale tezei sunt:

- O sinteză a proprietăților și a parametrilor materialelor supraconductoare HTS și a aplicațiilor acestora în cercetare și industrie, cu accent pe producerea de câmpuri magnetice intense.
- Participare la proiectarea și realizarea bobinelor HTS cu forme speciale ce sunt parte componentă a unui electromagnet supraconductor. Datorită condițiilor speciale de realizare (natura materialului, condițiile de utilizare și forma specială de tip șă) algoritmul de proiectare a fost modificat astfel încât să corespundă noilor criterii.
- Studiul experimental al parametrilor critici ai materialelor HTS ( $T_c$ ,  $I_c$ ), precum și curentul critic al bobinelor HTS, durata răcirii bobinelor etc. Aceste studii au evidențiat un curent maxim de 115 A, care poate fi suportat de materialul HTS. Dependența  $U - I$  s-a dovedit a fi similară cu cea din literatura de specialitate și anume, liniară și crescătoare.

- Pentru a fi măsurate, bobinele HTS au fost răcite cu azot lichid. Măsurarea curentului critic a arătat o caracteristică liniară a tensiunii la bornele bobinelor, funcție de curentul de alimentare. S-a determinat de asemenea curentul optim de funcționare al bobinelor supraconductoare HTS. Curentul critic pentru bobine a fost determinat folosind criteriul de  $1 \mu\text{V} / \text{cm}$  (conform standardelor internaționale), astfel s-a stabilit curentul maxim de funcționare pentru electromagnetul supraconductor.
- Implementarea unui model analitic și unul numeric pentru calculul câmpului magnetic generat de electromagnetul supraconductor, rezultate verificate și de datele experimentale obținute în cadrul laboratorului.
- Implementarea unui model numeric termic al întregului ansamblu criostat – magnet ce este verificat și de un model analitic pentru calculul sarcinilor termice ce apar în sistem.
- Implementarea unui model numeric pentru proiectarea și testarea joncțiunilor supraconductoare, elemente importante în structura întregului ansamblu criostat – magnet.
- Implementarea unui model numeric pentru evaluarea forțelor Laplace, identificarea zonelor unde aceste forțe sunt cele mai puternice și astfel au putut fi luate măsuri care să prevină deteriorarea electromagnetului.
- Participare la proiectarea, realizarea și testarea unui electromagnet supraconductor HTS dipolar pentru acceleratoare de particule dar și pentru alte aplicații ale fizicii nucleare (spectroscopie energetică, momente magnetice nucleare etc.), generator al unui câmp magnetic de 2,5 T și uniformitate  $< 5\%$ .
- Participare la proiectarea, realizarea și testarea unui sistem criogenic de răcire a electromagnetului supraconductor la temperaturi de 20 – 50 K), pe baza unor sisteme de răcire cu ciclu închis de funcționare, numite criorăcitoare;
- Implementarea unor tehnici criogenice de răcire de ultimă generație (criorăcitoare cu ciclu închis de tip G-M), cu două trepte de răcire care reclamă modelarea numerică și proiectarea termică a sistemului de răcire care funcționează prin conducție și nu prin utilizarea clasică a agenților criogenici.

### C.3. Perspective de dezvoltare

Datorită avantajelor pe care le aduc materialele supraconductoare HTS (capacitate de transport a curentului mult mai mare, generarea de câmpuri magnetice mult mai mari decât cu materiale convenționale, masa și volumul reduse semnificativ față de mașinile convenționale), în domeniul ingineriei electrice, acestea vor cunoaște o dezvoltare intensă în perspectivă.

Deocamdată, numărul mic de aplicații este datorat costului relativ ridicat al producerii acestor materiale supraconductoare HTS, însă perspectivele sunt optimiste, în sensul așteptării ca prețul să scadă vertiginos.

Principalul interes în ingineria electrică pentru materialele HTS, constă în fabricarea de bobine supraconductoare, folosite la producerea de mașini electrice și electromagneți supraconductori pentru diverse aplicații fie de cercetare, industrie, medicină sau transporturi.

Principalele motive care fac ca folosirea de materiale HTS în ingineria electrică și în special în realizarea de electromagneți supraconductori HTS să fie atractivă, o reprezintă posibilitatea generării unui câmp magnetic mai puternic (5 – 20 T) și absența pierderilor Joule. Electromagneții supraconductori (dipolari, cvadripolari și sextupolari) din acceleratoarele de particule sunt realizați cu precădere din materiale supraconductoare LTS (NbTi și Nb<sub>3</sub>Sn) și care sunt răciți cu heliu lichid (4,2 K). Există un interes major pentru înlocuirea acestora cu electromagneți realizați cu materiale HTS datorită exploataării mult mai economice a acestora, răcirea criogenică putând fi realizată cu azot lichid (77 K), ceea ce reduce mult costurile aferente. Ca urmare, în viitorul apropiat, eforturile noastre se vor înscrie în acest trend care este totodată și o provocare tehnică și științifică datorită problemelor care trebuie depășite și rezolvate prin introducerea materialelor HTS în construcția acestor electromagneți. O altă dezvoltare de interes o constituie obținerea de electromagneți HTS pentru realizarea de sisteme MRI de imagistică medicală. Interesele sunt de același ordin: exploatare mult mai economică și performanțele superioare. Astfel, introducerea în realizarea acestor tipuri de solenoizi supraconductori HTS a mai nou sositului material, MgB<sub>2</sub>, este deosebit de promițătoare datorită prețului mic de obținere.

O altă direcție importantă de dezvoltare actuală și viitoare o constituie obținerea de câmpuri magnetice intense unde materialele HTS (BSCCO și YBCO) s-au dovedit a fi foarte potrivite datorită câmpurilor critice  $H_{c2}$  de valoare mult superioară celor LTS (aproximativ 100 T).

Astfel, bobinele supraconductoare HTS stau și vor sta la baza tuturor dezvoltărilor viitoare de electromagneți și generatori de câmpuri magnetice intense sau gradienti ridicați de câmp magnetic și evident a mașinilor electrice supraconductoare (motoare și generatoare) cu eficiență ridicată de funcționare. Transportul energiei se va face prin utilizarea cablurilor supraconductoare, realitate deja prezentă în unele țări. Totodată, medicina va avea de câștigat prin realizarea de aparate MRI de înaltă performanță, dar și transporturile, prin dezvoltarea trenurilor de mare viteză, care deja au devenit realitate.

## BIBLIOGRAFIE

- [1] C.P. Poole Jr., *Handbook of Superconductivity*, ISBN: 0-12-561460-8, Library of Congress Catalog Card Number: 99-60091, Academic Press, 2000.
- [2] <http://cmms.triumf.ca/theses/Sonier/PhD/node7.html>
- [3] C. Mantea, I. Puflea, *Teorii Fenomenologice ale Supraconductibilității*, Editura Electra, 2006, ISBN (10) 973-7728-64-5, ISBN (13) 978-973-64-7.
- [4] S.S. Kalsi, *Applications of High Temperature Superconductors to Electric Power Equipment*, Wiley-IEEE Press, ISBN: 978-0-470-16768-7, April 2011.
- [5] *American Superconductor*, <http://www.amsc.com/index.html>, 2012.
- [6] *Sumitomo Heavy Industries Ltd.*, <http://www.shicryogenics.com/>.
- [7] L.J. Masur, J.Kellers, F.Li, S.Fleshler, E.R. Podtburg, “Industrial high temperature superconductors: perspectives and pilestones”, *IEEE Trans. Appl. Superconductivity*, **12**, 1, pp. 1145 – 1150, mai 2002.
- [8] J. Nagamatsu, N. Nakagawa, T. Murakana, Y. Zenitani, J. Akimitsu, “Superconductivity at 39K in magnesium diboride”, *Nature*, **410**, pp. 63-64, 2001.
- [9] *Hyper Tech Research*, <http://www.hypertechresearch.com/>, 2010.
- [10] K. Berger, et. al., “Influence of temperature and/or field dependences of the E-J power law on trapped magnetic field in bulk YBaCuO”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **17**, 2, pp. 3028 -3031, 2007.
- [11] E. Barzi, L.Del Frate, D. Turrioni, R. Johnson, M. Kuchnir, “High temperature superconductors for high field superconducting magnets”, *Adv. Cryogenic Eng.*, **52**, p. 416, 2006.
- [12] R.M. Scanlan, A.P. Malozemoff, D.C. Larbaies, “Superconducting materials for large scale applications“, *Proc. IEEE*, **92**, 10, pp.1639-1654, 2004, DOI 10.1109 / JPROC.2004.833673.
- [13] <https://www.bruker.com/best.html>.
- [14] L.J. Masur, J. Kellers, S. Kalsi, et al., “Industrial HTS conductors: status and applications”, EUCAS 2003, Sorrento, Italy.
- [15] <http://www.qdusa.com/>.
- [16] A.M. Morega, I. Dobrin, M. Popescu, M. Morega, “Heat transfer analysis in the design phase of a high temperature superconductor motor”, OPTIM 2010, 12th Conference, 22-24 May 2010, Brasov, Romania.
- [17] *SuperPower*, <https://www.superpower-inc.com/>, 2012.
- [18] P.M. Grant, “Potential electric power applications for magnesium diboride”, *The Industrial Physicist*, **7**, 22, 2001.
- [19] W.-J. Yeh, L. Chen, F. Xu, B. Bi, P. Yang, “Persistent current in Ba-Y-Cu-O in liquid nitrogen”, *Phys. Rev.*, **B 36**, p. 2414, 1987.
- [20] Y. Shiohara, T. Taneda, M. Yoshizumi, “Overview of materials and power applications of coated conductors project”, *Japanese Journal of Applied Physics*, **51**, (2012), 010007.
- [21] N. Amemiya, N. Enomoto, S. Shirai, “FEM analysis of AC loss in twisted Bi-2223 multifilamentary tapes carrying AC transport current in ac transverse magnetic field with arbitrary orientation”, *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, **14**, 2, June 2004.
- [22] F. Metani, J. Jiang, M. Matras, D.C. Larbaestier, “Comparison of growth texture in round Bi2212 and flat Bi2223 wires and its relation to high critical current density development”, *Scientific Reports*, **5**, pp. 8285, februarie 2015.

- [23] *A.P. Malozemoff, S. Annavarapu, L. Fitzemeier, Q. Li, V. Prunier, M. Rupich, C. Thieme, W. Zhang, A. Goyal, M. Paranthaman, D.F. Lee*, “Low-cost YBCO coated conductor technology”, *Superconductor Science & Technology*, **13**, 5, p. 473, 2000.
- [24] *D. Verebelyi, E. Harley, J. Scudiere, A. Otto, U. Schoop, C. Thieme, M. Rupich, A. Malozemof*, “Practical neutral axis conductor geometries for coated conductor composite wire”, *Supercond. Sci. Technol.*, **16**, pp. 1158-1161, 2003.
- [25] *D. Verebelyi, U. Schoop, C. Thieme, et al.*, “Uniform performance of continuously processed MOD-YBCO coated conductors using a textured Ni-W substrate”, *Supercond. Sci. Technol.*, **16**, pp. 19-23, 2003.
- [26] *X. Xiong, K.P. Lenseth, J.L. Reeves, Y. Qiao, R.M. Schmidt, Y. Chen, Y. Li, Y-Y Xic, V. Selvamanicm*, “High throughput processing of long-length IBAD MgO and Epi-Buffer templates at SuperPower”, Paper 4MA3, Presented at the IEEE Applied Superconductivity Conference, August 2006.
- [27] *R. Flukiger, H.L. Suo, N. Musolino, C. Benedict, P. Toulemonde, P. Lezza*, “Superconducting properties of MgB<sub>2</sub>. Tapes and wires”, *Physica*, **385**, pp. 286-305, 2003.
- [28] *C.I. Mocanu*, *Teoria Câmpului Electromagnetic*, Editura Didactică și Pedagogică, 1981
- [29] *A.M. Morega*, *Principles of Heat Transfer*, Chapter VII in *Mechanical Engineer’s Handbook*, Ed. D.B. Marghitu, Academic Press 2001, ISBN: 012471370X, pp. 446-557.
- [30] <https://www.shicryogenics.com/>
- [31] <https://chemistry.illinois.edu/system/files/inline-files/Dean%20Giolando.pdf>
- [32] [https://indico.cern.ch/event/286275/contributions/651700/attachments/531414/732823/JUAS\\_14\\_lect\\_1\\_intro\\_matls.pdf](https://indico.cern.ch/event/286275/contributions/651700/attachments/531414/732823/JUAS_14_lect_1_intro_matls.pdf)
- [33] <https://www.bnl.gov/magnets/hts-magnet-program.php>
- [34] <https://www.imaios.com/en/e-Courses/e-MRI/MRI-instrumentation-and-MRI-safety/Magnets>
- [35] <https://www.fnal.gov/>
- [36] *PANDA*, <https://www.gsi.de/work/forschung/pandahsd.htm>
- [37] <https://www.fujikura.co.uk/products/energy-and-environment/2g-ybco-high-temperature-superconductors/>
- [38] <https://www.nipne.ro/facilities/facilities/>
- [39] <https://www.nuclearvacuum.eu/index.php>
- [40] <http://www.jinr.ru/main-en/>
- [41] <https://www.cem.tu-darmstadt.de/researching/topics/superconductivity/index.en.jsp>
- [42] <http://www.icpe-ca.ro/icpe-ca/pdf/raport-nucleu-2009.pdf>
- [43] <https://home.cern/>
- [44] *A.M. Morega, I. Dobrin, M. Morega, D. Enache*, “Înfășurare supraconductoare pentru câmp magnetic iniform, intens”, Simpozionul de Mașini Electrice (SME 2015), Bucuresti, Romania.
- [45] <https://www.comsol.com/>
- [46] <https://isis2.cc.oberlin.edu/physics/dstyer/Electrodynamics/MaxwellStressTensor.pdf>
- [47] *I. Dobrin, A.M. Morega, D. Enache, A. Dobrin, M. Morega, A. Dobre, I.R. Popovici*, “High temperature superconductor dipolar magnet for high magnetic field generation – design and fabrication elements”, The 10th International Symposium on ADVANCED TOPICS IN ELECTRICAL ENGINEERING - ATEE 2017, Bucuresti.
- [48] *O. Culha, I. Birlik, M. Toparli, E. Celik, S. Engel, B. Holzappel*, “Characterization and determination of mechanical properties of YBCO superconducting thin films with



- manganeseusing the tfa-mod method”, ISSN 1580-2949.
- [49] *J.W. Ekin, Experimental Techniques for Low-Temperature Measurements – Cryostat Design, Material Properties, and Superconductor Critical-Current Testing*, Oxford Univeristy Press, 2006, ISBN 0-19-857054-6; 978-0-19857054.
- [50] *Y. Iwasa, Case Studies in Superconducting Magnets Design and Operational Issues Second Edition*, ISBN: 978-0-387-09799-2, e-ISBN: 978-0-387-09800-5, DOI: 10.1007/b112047, Library of Congress Control Number: 2009922081, © Springer Science+Business Media, LLC 2009.
- [51] *D. Enache, I. Dobrin, A.M. Morega, M. Morega, A. Dobrin*, “Experiments on YBCO tape type high temperature superconductor junctions”, (The International Conference on Applied and Theoretical Electricity ICATE 2016), Craiova, Romania, ISBN: 978-1-4673-8562-6.
- [52] <https://www.lakeshore.com/>
- [53] <http://www.icpe-ca.ro>
- [54] <https://www.epotek.com/>
- [55] <https://www.edwardsvacuum.com/en>
- [56] [https://www.hioki.com/en/products/detail/?product\\_key=5832](https://www.hioki.com/en/products/detail/?product_key=5832)
- [57] <https://www.tek.com/keithley>
- [58] <http://www.americanmagnetics.com/index.php>
- [59] *A.M. Morega, I. Dobrin, M. Morega*, “Thermal and magnetic design of a dipolar superferic magnet for high uniformity magnetic field”, 7<sup>th</sup> International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering - ATEE, pp. 589-592, May 2011, ISBN 978-1-4577-0507-6.
- [60] *I. Dobrin, A.M. Morega, D. Enache, A. Dobrin, I. Popovici, S. Zamfir*, “Bobine supraconductoare pentru acceleratoare de particule și sistemul criogenic de răcire al acestora”, Simpozionul de Mașini Electrice SME'16 ediția a XIIa 11 Noiembrie 2016 FIE-UPB București, pp. 2067-4147.
- [61] *A. Bartalesi*, “Design of high field solenoids made of high temperature superconductors”, pp. 2008-2009.
- [62] *N.N. Balashov, P.N. Degtyarenko, S.S. Ivanov*, “Investigation of soldered low-resistance joints for coated conductors”, *Progress in Superconductivity and Cryogenics*, **17**, 1, pp. 25-27, 2015.
- [63] *G. Celentano et al.*, “Electrical and mechanical characterization of coated conductors lap joints”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, **20**, 2010.
- [64] *D.K. Park et al.*, “Analysis of a joint method between superconducting YBCO coated conductors”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, **17**, 2007.
- [65] *M. Sugano et al.*, “Stress tolerance and fracture mechanisms of solder joint of YBCO coated conductors”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, **17**, 2007.
- [66] *I. Dobrin, A. Chernikov et al.*, “A 4T HTS magnetic field generator conduction cooled for condensed matter studies by neutron scattering”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, January 2016.
- [67] *T. Lecrevisse, J.M Ghellera, O. Loucharta, J.M Reya, P. Tixador*, “Critical current and junction between pancake studies for HTS coil design”, *Physics Procedia*, **36**, 2012, pp. 681-686, 2011.
- [68] *D. Enache, I. Dobrin, A.M. Morega, S. Apostol*, “Superconductive dipolar electromagnets for particle accelerators. Two constructive models”, *Proc. of the 10th international Conference on electromechanical and power systems*, pp. 351-355, 2015, ISBN 978-606-567-284-0.
- [69] *A.M. Morega, I. Dobrin, M. Morega, A. Nedelcu, V. Stoica*, “Design and numerical simulations of a superconducting dipolar electromagnet cooled by conduction”, *The 9<sup>th</sup> International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering ATEE 2015*, pp. 79-83, May 7–9,

- 2015, ISBN 978-1-4799-7514-3.
- [70] A.M. Morega, I. Dobrin, M. Morega, “Thermal and magnetic design of a dipolar superferric magnet for high uniformity magnetic field”, Proc. 7<sup>th</sup> Int. Symp. (ATEE), pp. 589-592, May 2011.
- [71] Y. Dai et al., “An 8T superconducting split magnet system with large crossing warm bore”, IEEE Trans. Appl. Supercond., **20**, 3, pp. 608-611, Jun. 2010.
- [72] E. Demikhov, F. Kostrov, V. Lysenko, N. Piskunov, V. Troitskiy, “8T cryogen free magnet with variable temperature insert using a heat switch”, IEEE Trans. Appl. Supercond., **20**, 3, pp. 612-615, Jun. 2010.
- [73] F. Giebler, G. Thummes, K.J. Best, “A 5 T persistent current niobium-titanium magnet with 4 K pulse tube cryocooler”, Supercond. Sci. Technol., **17**, 5, pp. 135-139, 2004.
- [74] J. Shi et al., “Development of conduction cooled HTS SMES”, IEEE Trans. Appl. Supercond., **17**, 3, pp. 3846-3850, Sep. 2007.
- [75] <http://www.hts-110.com/currentleads>.
- [76] <http://www.superox.ru/en/>.
- [77] K.L. Kim et al., “Feasibility study for elimination of the screening currents-induced fields in HTS coils”, J. Supercond. Nov. Magn., **28**, pp. 83-88, 2015.
- [78] H. Miyazaki, S. Iwai, T. Tosaka, K. Tasaki, Y. Ishii, “Degradation-free impregnated YBCO pancake coils by decreasing radial stress in the windings, method for evaluating delamination strength of YBCO-coated conductors”, IEEE Trans. Appl. Supercond., **24**, 3, pp. 1-5, Jun. 2014.
- [79] I. Dobrin, I. Puflea, N. Stancu, S. Zamfir, “Magnet Superferric Dipolar pentru acceleratoare de particule”, Rev. EEA, **58**, pp. 39-42, 2010.
- [80] I. Dobrin, *Dipole Superferric Magnet*, 2010
- [81] M. Britcliffe, T. Hanson, J. Fernandez, “A 2.5-Kelvin Gifford-McMahon/Joule-Thomson cooler for cavity maser applications”, IPN Progress Report, pp. 42-147, Nov. 2001.
- [82] <http://www.dupontteijinfilms.com/>.
- [83] A. Bejan, *Heat Transfer*, NY:Wiley, 1998.
- [84] A.M. Morega, I. Dobrin, M. Morega, “Thermal and magnetic design of a dipolar superferric magnet for high uniformity magnetic field”, The 7<sup>th</sup> International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering-ATEE, May 12-14, Bucharest, pp. 589-592, 2011, IEEE no: CFP1114P-PRT, ISBN 978-1-4577-0507-6.
- [85] I. Dobrin, A.M. Morega, A. Nedelcu, M. Morega, D. Daniel, “Thermal and magnetic design of a HTS high magnetic field generator using superconducting Helmholtz coils”, The 18<sup>th</sup> ICIT Conference with international participation Progress in Cryogenics and Isotopes Separation, October 2012.
- [86] A.M. Morega, I. Dobrin, A. Nedelcu, M. Morega, “A quadrupolar superferric magnet”, OPTIM 2012 13<sup>th</sup> International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, pp. RD-006777, 24–26 May 2012.
- [87] K.L. Kim et al., “Feasibility study for elimination of the screening currents-induced fields in HTS coils”, J. Supercond. Nov. Magn., **28**, pp. 83-88, 2015.
- [88] I. Yukikazu, *Case Studies in Superconducting Magnets*, Springer-Verlag, 2009.
- [89] N.V. Zamfir et al., “Extreme Light Infrastructure: nuclear physics”, Proc. SPIE, **8080**, 2011.
- [90] G. Suliman et al., “Gamma-Beam industrial applications at ELI-NP”, Romanian Reports in Physics, **68**, pp. 799-845, 2016.
- [91] S. Balascuta, I.C.E. Turcu, “A conceptual design of an electron spectrometer for ELI-NP”, AIP



- Conf. Proc, pp. 296-300, 2015.
- [92] W. Kappel, N. Stancu et al., “Magnetic automated installation for Yu Mo spectrometer”, *Revue Roumaine Des Sciences Techniques-Serie Electrotechnique et Energetique*, **53**, 2, pp. 79-84, 2008.
- [93] J. Tanabe, *Iron Dominated Electromagnets*, World Scientific, 2005.
- [94] A.B. Holder, H. Keller, ”High-temperature superconductors: underlying physics and applications”, *Zeitschrift für Naturforschung B*, **75**, 1-2, DOI: <https://doi.org/10.1515/znb-2019-0103>, 2019.
- [95] A. Devred, *Practical Low-Temperature Superconductors*, <https://cds.cern.ch/record/796105/files/CERN-2004-006.pdf>, CERN, 2004
- [96] R. Zeng, V. Murashov, T.P. Beales, H.K. Liu, S.X. Dou, “High temperature superconducting magnetic levitation train”, *Applied Superconductivity*, **5**, 1–6, January–June 1997, pp. 201-204.
- [97] W.V. Hassenzohl, D.W. Hazelton, B.K. Johnson, Ch.T. Reis, “Electric Power Applications”, *Proceedings of the IEEE*, **92**, 10, Oct. 2004.
- [98] Santosh Miryala, *Recent Superconducting Applications in the Medical Field*, High Temperature Superconductors, ISBN 978-1-53613-341-7, Nova Science Publishers, Inc., 2018., Chapter 15.
- [99] <https://www.luvata.com/products/ultra-pure-copper-products>
- [100] D.Bruce Montgomery, *Solenoid Magnet Design. The Magnetic and Mechanical Aspects of Resistive and Superconducting Systems*, Interscience (Wiley), New York, 1969.
- [101] <https://kgw-isotherm.com/>
- [102] [https://trc.nist.gov/cryogenics/materials/OFHC%20Copper/OFHC\\_Copper\\_rev1.htm](https://trc.nist.gov/cryogenics/materials/OFHC%20Copper/OFHC_Copper_rev1.htm)
- [103] <http://www.sunpowerinc.com/>
- [104] J. Minervini, M. Parizh, M. Schippers, “Design of a HTS cuadrupolar magnet focus on superconducting magnets for hadron radiotherapy and MRI”, *Superconductor Science and Technology*, **31**, 3, 2018
- [105] E. Darie, E. Darie, “Fault current limiters based on high temperature superconductors”, 8<sup>th</sup> International Conference on Electric Fuses and their Applications, Clermont-Ferrand, 2007, pp. 69-73, doi: 10.1109/ICEFA.2007.4419969.
- [106] I. Dobrin, D. Enache, A. Dobrin, G. Dumitru, “Numerical modeling and design of a superconducting solenoid generator of 6T magnetic flux density”, *Scientific Bulletin of University Politehnica of Bucharest*, 2020.