



UNIVERSITATEA NAȚIONALĂ DE ȘTIINȚĂ ȘI
TEHNOLOGIE POLITEHNICA BUCUREȘTI
ȘCOALA DOCTORALĂ DE INGINERIE ELECTRICĂ

TEZĂ DE DOCTORAT

Rezumatul tezei de doctorat

METODE CRIOELECTROTEHNICE PENTRU CÂMPURI MAGNETICE
INTENSE

Conducător științific

Prof. Dr. Ing. Alexandru – Mihail Morega

Doctorand

Ing. Dumitru George

Cuprins

STRUCTURA CAPITOLELOR TEZEI DE DOCTORAT	5
INTRODUCERE	6
1. SUPRACONDUCTIBILITATEA	7
1.1. INTRODUCERE	7
1.2. STAREA SUPRACONDUCTOARE	7
1.3. CLASIFICAREA MATERIALELOR SUPRACONDUCTOARE	8
1.3.1. MATERIALE SUPRACONDUCTOARE DE TIP I	8
1.3.2. MATERIALE SUPRACONDUCTOARE DE TIP II	8
1.4. CLASIFICAREA MATERIALELOR SUPRACONDUCTOARE ÎN FUNCȚIE DE DOMENIUL DE TEMPERATURĂ	8
1.4.1. MATERIALE SUPRACONDUCTOARE DE TEMPERATURI JOASE (LTS)	9
1.4.2. MATERIALE SUPRACONDUCTOARE DE TEMPERATURI ÎNALTE (HTS)	9
1.5. PRINCIPALELE APLICAȚII ALE MATERIALELOR SUPRACONDUCTOARE	9
1.5.1. LINII DE TRANSPORT A ENERGIEI ELECTRICE	10
1.5.2. MAȘINI ELECTRICE	10
1.5.3. ECHIPAMENTE MEDICALE	10
1.6. CONCLUZII	10
2. GENERATOR DE CÂMP MAGNETIC INTENS ȘI UNIFORM	11
2.1. INTRODUCERE	11
2.2. ANALIZA CÂMPULUI MAGNETIC	11
2.2.1. BOBINA CU O SINGURĂ SPIRĂ	11
2.2.2. BOBINA ELICOIDALĂ	11
2.2.3. BOBINA PLANĂ (GALET)	12
2.2.4. BOBINE ÎN CONFIGURAȚIE HELMHOLTZ	12
2.3. EVALUAREA PARAMETRIILOR MATERIALELOR HTS	12
2.4. EVALUAREA NUMERICĂ A CÂMPULUI MAGNETIC GENERAT DE ANSAMBLUL HELMHOLTZ	13
2.4.1. DETERMINAREA CÂMPULUI MAGNETIC	13
2.4.2. DETERMINAREA CÂMPULUI MAGNETIC PRIN MODELARE NUMERICĂ	14
2.5. CONCLUZII	15
3. ANALIZA PARAMETRIILOR TERMICI AI SISTEMULUI DE RĂCIRE PENTRU ELECTROMAGNETUL SUPRACONDUCTOR	16
3.1. INTRODUCERE	16
3.2. FENOMENE DE TRANSFER LA TEMPERATURI JOASE	16
3.2.1. CONDUȚIA TERMICĂ	16
3.2.2. RADIAȚIA TERMICĂ	16
3.2.3. CONVECȚIA TERMICĂ	17
3.3. METODE DE RĂCIRE	17
3.3.1. RĂCIREA CU AGENȚI CRIOGENICI	17
3.3.2. RĂCIREA CU POMPĂ DE CĂLDURĂ	17
3.4. DIMENSIONAREA SISTEMULUI DE RĂCIRE PENTRU ELECTROMAGNETUL SUPRACONDUCTOR HTS	18
3.4.1. PARAMETRII TERMICI AI ANSAMBLULUI CRIOSTAT-ELECTROMAGNET	18
3.4.2. EVALUAREA TRANSFERULUI RADIAȚIV	19
3.4.3. EVALUAREA FLUXULUI CONDUCTIV	19
3.5. CONCLUZII	21
4. REALIZAREA ȘI TESTAREA ELECTROMAGNETULUI SUPRACONDUCTOR	22
4.1. INTRODUCERE	22
4.2. REALIZAREA STRUCTURII MECANICE A ELECTROMAGNETULUI	22
4.3. REALIZAREA BOBINELOR SUPRACONDUCTOARE	22
4.3.1. JONȚIONAREA BENZILOR DE TIP HTS	23

4.3.2.	REALIZAREA CONDUCTORILOR DE ALIMENTARE ELECTRICĂ.....	24
4.3.3.	REALIZAREA ELECTROMAGNETULUI.....	24
4.4.	SISTEMUL CRIOGENIC DE RĂCIRE	25
4.4.1.	CRIOSTATUL	25
4.4.2.	ECRANUL TERMIC.....	25
4.5.	TESTE EXPERIMENTALE.....	25
4.5.1.	TESTAREA BENZILOR SUPRACONDUCTOARE	26
4.5.2.	SISTEMUL DE TESTARE AL ELECTROMAGNETULUI HTS.....	27
4.5.3.	REZULTATE EXPERIMENTALE.....	27
4.6.	CONCLUZII	29
5.	CONCLUZII.....	30
C.1.	CONCLUZIILE GENERALE	30
C.2.	CONTRIBUȚII ORIGINALE.....	31
C.3.	PERSPECTIVE DE DEZVOLTARE.....	31
6.	BIBLIOGRAFIE.....	32

Cuvnte cheie: supraconductibilitate, câmp magnetic intens, uniformitate ridicată, transfer de căldură, modelare numerică, conductori HTS, jonționare materiale supraconductoare, temperaturi criogenice, agenți criogenici, pompe de căldură, proiectare, criostat, ecran termic.

STRUCTURA CAPITOLELOR TEZEI DE DOCTORAT

Teza de doctorat intitulată “ Metode criolectrotehnice pentru câmpuri magnetice intense”, este structurată în 4 capitole, concluzii și bibliografie, și are ca scop prezentarea modalității de realizare a unui generator de câmp magnetic intens și uniform utilizând materiale supraconductoare de temperaturi înalte. Având în vedere faptul că valorile de câmp necesare pentru a satisface necesitățile aplicațiilor în care acest generator va fi utilizat depășesc capabilitățile convenționale de realizare prin faptul că, utilizând conductori convenționali se pot genera câmpuri magnetice de până la 2,5 T, se impune utilizarea materialelor supraconductoare, pentru depășirea acestei limitări. Pentru realizarea acestui obiectiv, este necesară pe de o parte o evaluare riguroasă a fenomenelor asociate stării supraconductoare, cât și a caracteristicilor materialelor existente comercial, astfel încât selectarea materialelor ce urmează a fi utilizate să corespundă performanțelor pentru care acest generator va fi proiectat.

Astfel, în Capitolul 1, denumit “ SUPRACONDUCTIBILITATEA (CARACTERISTICI ȘI PERFORMANȚE)”, vor fi prezentate caracteristicile și performanțele materialelor supraconductoare utilizate în industrie, evoluția acestora în timp, dar și modul în care acestea au devenit indispensabile în ultimile decenii în realizarea dispozitivelor și instalațiilor din variate domenii.

În Capitolul 2, intitulat “GENERATOARE DE CÂMP MAGNETIC INTENS ȘI UNIFORM”, sunt tratate soluțiile tehnice pentru generatoare de câmp magnetic realizate cu acest tip de materiale supraconductoare, dar și elaborarea unui model conceptual pentru un astfel de electromagnet.

Capitolul 3, cu titlul “ANALIZA PARAMETRILOR TERMICI AI SISTEMULUI DE RĂCIRE PENTRU UN ELECTROMAGNET SUPRACONDUCTOR” tratează problemele legate de transferul de căldură asociat echipamentelor ce utilizează materiale supraconductoare, în vederea asigurării parametrilor termici de funcționare ai acestora.

În Capitolul 4, intitulat “REALIZAREA ȘI TESTAREA UNUI ELECTROMAGNET SUPRACONDUCTOR” sunt prezentate etapele de realizare a unui electromagnet supraconductor, metodele de testare ale acestuia, și rezultatele experimentale obținute în urma testelor funcționale realizate pentru acesta.

INTRODUCERE

Aplicațiile materialelor supraconductoare s-au extins în ultimile decenii în foarte multe domenii precum ingineria electrică prin realizarea liniilor de transport a energiei electrice, a căror performanță este net superioară față de liniile de transport convenționale [1], transformatoare de mare putere [2, 3], limitatoare de curent ce permit protejarea rețelelor de transport a energiei electrice [4], stocatoare de energie în câmp magnetic [5]. În industria medicală, aceste materiale au condus pe de o parte la dezvoltarea instalațiilor pentru investigații prin rezonanță magnetică [6], cât și dezvoltarea de noi metode pentru investigații precum magnetoencefalografia [7]. În industria transporturilor, materialele supraconductoare s-au impus datorită posibilității dezvoltării trenurilor de mare viteză ce se deplasează prin levitație magnetică, fiind astfel depășită viteza de deplasare maximă ce poate fi atinsă prin metode convenționale [8].

Un alt domeniu în a cărui dezvoltare materialele supraconductoare joacă un rol esențial este cel al fizicii aplicate, utilizarea materialelor supraconductoare făcând posibilă dezvoltarea de acceleratoare de particule de mari dimensiuni ce pot dezvolta energii de până la 14 TeV [9]. Datorită performanțelor superioare ale noilor materiale supraconductoare de înaltă temperatură denumite generic High Temperature Superconductor (HTS) dezvoltate în ultimile decenii, posibilitatea obținerii unor câmpuri magnetice intense, ce pot ajunge până la zeci de T [10] a deschis noi orizonturi în acest domeniu.

Realizarea generatoarelor de câmp magnetic intens și uniform utilizând materiale supraconductoare de înaltă temperatură necesită pe de o parte o cunoaștere profundă a acestor tipuri de materiale, dar și a restricțiilor impuse de acestea, restricții datorate în primul rând temperaturilor scăzute la care acestea sunt exploatate.

Proiectare a unui astfel de generator de câmp magnetic intens și uniform realizat cu materiale supraconductoare HTS pentru aplicații în spectroscopie, a modului de realizare al acestuia, cât și rezultatele experimentale obținute, prezentate în această lucrare, au ca scop depășirea limitărilor impuse de utilizarea materialelor conductoare convenționale pentru acest tip de echipamente.

1. SUPRACONDUCTIBILITATEA

1.1. INTRODUCERE

Utilizarea materialelor supraconductoare în aplicațiile practice a demonstrat prin performanțele acestora faptul că au devenit indispensabile pentru progresul tehnologic. Utilizarea acestui tip de materiale implică o cunoaștere profundă a proprietăților acestora și implicit a fenomenelor ce guvernează starea de supraconductibilitate. În acest capitol este realizată o scurtă prezentare a stării supraconductoare a materialelor, a proprietăților asociate acestora și a principalilor parametri de care trebuie ținut cont pentru utilizarea lor în aplicații practice. În a doua parte a acestui capitol sunt prezentate succint principalele aplicații ale acestor tipuri de materiale supraconductoare ce s-au impus în ultimile decenii în multe domenii de activitate.

1.2. Starea supraconductoare

Fenomenul de supraconductibilitate a fost descoperit de Heike Kamerlingh Onnes în anul 1911 [11]. Pe scurt, când, temperatura materialului studiat este menținută sub o anumită valoare, denumită temperatură critică (T_c) [11], acesta prezintă rezistență electrică zero, fiind posibil transportul unui curent electric fără pierderi Joule. În anul 1933, Walther Meissner și Robert Ochsenfeld [13] au pus în evidență faptul că acest conductor aflat la o temperatură sub temperatura critică (T_c), dacă este plasat într-un câmp magnetic constant și uniform, la suprafața acestuia apare spontan un curent denumit curent supraconductor, care ecranează materialul față de câmpul magnetic externe, materialul comportându-se ca un diamagnet perfect (efectul Meissner–Ochsenfeld) [12, 14]. Ecuațiile ce descriu efectul Meissner au fost propuse în 1935 de frații Fritz Wolfgang London și Heinz London [11]. Conform acestora, un câmp magnetic extern B_0 , paralel cu un material supraconductor nu va fi atenuat complet la interfața dintre mediul exterior și material, acesta fiind atenuat conform relației [11]:

$$B(x) = B_0 e^{-\left(\frac{x}{\lambda_L}\right)}, \quad (1)$$

unde $B(x)$ este câmpul magnetic din interiorul materialului supraconductor. Adâncimea de pătrundere London a câmpului magnetic în material λ_L , are expresia [11, 15, 16]:

$$\lambda_L = \sqrt{\frac{m_e}{\mu_0 n e^2}}. \quad (2)$$

Un curent extern aplicat materialului supraconductor va circula doar în regiunea determinată de adâncimea de pătrundere [11, 15]. Dependența adâncimii de pătrundere a câmpului magnetic este dependentă de temperatură, legea de variație a acesteia fiind [15]:

$$\lambda_L(T) = \frac{\lambda_L(0)}{\left[1 - \left(\frac{T}{T_c}\right)^4\right]^{1/2}}, \quad (3)$$

unde $\lambda_L(0)$ este adâncimea de pătrundere pentru $T = 0$ K. În starea supraconductoare, transportul curentului este realizat de electroni grupați în perechi (perechi Cooper) [17]. Variația densității de volum a purtătorilor de sarcină de la suprafața materialului către centrul acestuia este caracterizată de lungimea de coerență ξ [11, 14].

1.3. Clasificarea materialelor supraconductoare

În funcție de comportamentul în câmp magnetic, materialele supraconductoare sunt materiale supraconductoare tip I și materiale supraconductoare tip II. Diferențierea materialelor de tip I față de cele de tip II este dată de raportul dintre adâncimea de pătrundere și lungimea de coerență, $k = \lambda_L/\xi$, parametrul k este denumit parametru Ghinzburg-Landau [15], unde $k < 1/\sqrt{2}$ pentru materialele de tip I, și $k > 1/\sqrt{2}$ pentru materialele de tip II [11].

Un alt parametru ce intervine în clasificarea acestor materiale este temperatura critică (T_c). În funcție de aceasta, se diferențiază trei clase de materiale supraconductoare:

- supraconductoare de temperatură joasă LTS (Low Temperature Superconductor);
- supraconductoare de temperatură medie MTS (Medium Temperature Superconductor);
- supraconductoare de temperatură înaltă HTS (High Temperature Superconductor).

1.3.1. Materiale supraconductoare de tip I

Pentru un supraconductor de tip I aflat la temperatura T , unde $T < T_c$, dacă se aplică un curent electric extern, acesta poate circula doar prin regiunea corespunzătoare adâncimii de pătrundere λ_L [11, 15]. Pentru un curent electric extern aplicat materialului aflat în starea supraconductoare, a cărui densitate J_{ext} depășește densitatea de curent J_{sc} , materialul va face tranziția din starea supraconductoare în cea normal conductoare, valoarea maximă a curentului extern suportat de acest material este denumit curent critic (I_c). Câmpul magnetic până la care poate fi menținută starea de supraconductibilitate este denumit câmp critic B_c și are forma [15]:

$$B_c(0) = \mu_0 \lambda(0) J_c(0), \quad (4)$$

unde $B_c(0)$ și $J_c(0)$ reprezintă valorile câmpului critic și respectiv a densității de curent critic, pentru $T = 0$. Dependența câmpului critic de temperatură $B_c(T)$, pentru un material supraconductor este descrisă de relația [15]:

$$B_c(T) = B_c(0) \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right]. \quad (5)$$

1.3.2. Materiale supraconductoare de tip II

Supraconductorii de tip II prezintă un câmp critic *inferior* B_{c1} și un câmp critic *superior* B_{c2} . Pentru intervalul $0 < B < B_{c1}$, comportamentul acestora este similar cu cel al celor de tip I. Pentru intervalul $B_{c1} < B < B_{c2}$, câmpul magnetic extern penetrează parțial materialul, astfel apare o zonă mixtă denumită regiunea Shubnikov [18]. Comportamentul materialelor supraconductoare de Tip II a fost descris în anul 1957 de A. Abrikosov [18]. În intervalul B_{c1} și B_{c2} , câmpul magnetic va penetra parțial materialul prin regiuni denumite fluxoni, în jurul cărora apar curenți circulari [14], caracterizați de adâncimea de pătrundere λ_L și lungimea de coerență ξ . În interiorul fluxonilor, starea supraconductoare dispare însă, în regiunea dintre acestea, materialul este supraconductor.

1.4. Clasificarea materialelor supraconductoare în funcție de domeniul de temperatură

În prezent, materialele supraconductoare uzuale sunt împărțite în funcție de domeniul de temperatură în trei categorii: materiale supraconductoare de joasă temperatură LTS a căror temperatură critică T_c este cuprinsă în intervalul 2 K și 19 K, materiale supraconductoare de

temperatură medie cu temperatura critică cuprinsă în intervalul $19 \text{ K} < T_c < 77 \text{ K}$ și materiale supraconductoare de temperaturi înalte HTS, a căror temperatură critică T_c este cuprinsă în intervalul cuprins între 90 K și 135 K .

1.4.1. Materiale supraconductoare de temperaturi joase (LTS)

Pentru utilizarea acestui tip de material în aplicații practice, au fost dezvoltate aliaje de tip NbTi sub formă de filamente, înglobate într-un suport de Cu, suportul oferind atât rezistență mecanică cât și conductivitate termică mare. Un exemplu în acest sens este supraconductorul utilizat pentru realizarea bobinelor acceleratorului de particule LHC, conductorii având dimensiunea de $0,48 \text{ mm}$ și respectiv $0,82 \text{ mm}$, suportând un câmp magnetic extern de până la 11 T [20]. În practică, pentru alegerea materialului supraconductor, trebuie să ținem cont de parametri critici ai acestuia: temperatura critică T_c , câmpul critic B_c și densitatea de curent critic J_c . În Figura 3 este prezentată variația celor trei parametri critici pentru câteva materiale supraconductoare. Suprafața descrisă de acești parametri reprezintă suprafața critică a materialului supraconductor [14].

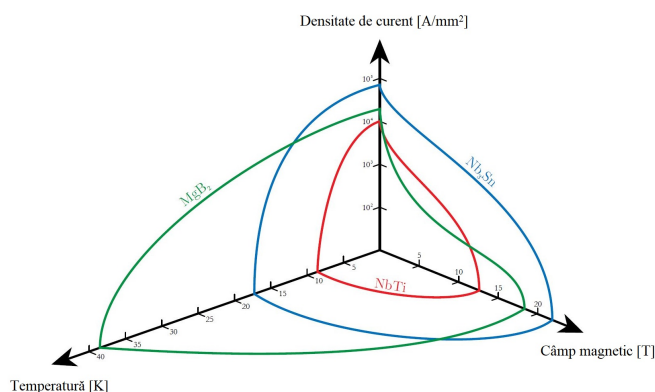


Fig. 3. Suprafața critică pentru câteva materiale supraconductoare [14].

1.4.2. Materiale supraconductoare de temperaturi înalte (HTS)

În anul 1986 când Johannes Georg Bednorz și Karl Alexander Müller au descoperit matricea de tip BaLaCuO care, la temperatura de 35 K devine supraconductor [21]. Ulterior, au fost dezvoltate materiale supraconductoare cu temperatura critică T_c de până la 107 K , fiind posibilă utilizarea azotului lichid ca agent criogenic. Cele mai răspândite materiale HTS sunt materialele de tip BiSrCaCuO, descoperite în anul 1988, cu temperatura critică cuprinsă între 85 K și 110 K , un câmp critic de maxim 200 T [14], și materialele sub formă de bandă realizate cu pământuri rare precum YBaCuO și GdBaCuO, cu temperatura critică de 92 K și un câmp critic de până la 140 T [14].

1.5. Principalele aplicații ale materialelor supraconductoare

În ciuda costului relativ scăzut al materialelor de tip LTS ($\sim 5 \text{ \$/KA}\cdot\text{m}$) [22], aplicațiile realizate cu acestea au fost extrem de limitate. Descoperirea materialelor de tip HTS a lărgit spectrul aplicațiilor în domeniul ingineriei electrice, făcând posibilă implementarea acestora în multe domenii. Datorită faptului că procesul de realizare al materialelor supraconductoare HTS este complex și costisitor comparativ cu cel al fabricației materialelor LTS, costul de achiziție al acestora era ridicat, depășind inițial pragul de $1000 \text{ \$/KA}\cdot\text{m}$ [23].

1.5.1. Lini de transport a energiei electrice

Un exemplu de linie de transport a energiei electrice este conductorul produs de Cryogenic and Vacuum Engineering (CVE) [24], acesta având o lungime totală de 1000 m, tensiunea de funcționare fiind de 154 kV, și temperatura cuprinsă în intervalul 70 – 80 K [24]. Pentru utilizarea materialelor HTS în aplicații în care densitatea de curent depășește densitatea de curent suportată de o singură bandă, este necesară realizarea unui conductor format din multiple benzi HTS, dispuse într-o construcție denumită cablu Roebel [25]. Inginerii de la Robinson Research Institute au realizat pentru prima dată un echipament complet automat de montare a acestui tip de conductor [26].

1.5.2. Mașini electrice

Eforturile susținute în dezvoltarea de mașini electrice utilizând materiale supraconductoare HTS s-au concretizat prin dezvoltarea în cadrul Laboratorului de Supraconductibilitate Aplicată din Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare pentru Inginerie Electrică ICPE-CA a unui generator electric supraconductor trifazat realizat cu materiale supraconductoare HTS, acesta având turația nominală de 1000 rpm și o putere maximă de 4,5 kW [28].

1.5.3. Echipamente medicale

Realizarea electromagneților cu materiale supraconductoare a făcut posibilă dezvoltarea echipamentelor de scanare Imagistică prin Rezonanță Magnetică Nucleară (IRM), schimbând fundamental modul de realizare a investigațiilor medicale. Tot în domeniul medical materialele supraconductoare pot fi utilizate pentru a realiza senzori magnetici denumiți SQUID (Superconducting Quantum Interference Device) capabili să măsoare gradientii ai câmpului magnetic cu rezoluție de ordinul 10^{-12} T/m [27] cu aplicații în magnetoencefalografie.

1.6. Concluzii

În cadrul acestui capitol a fost analizată starea supraconductoare și caracteristicile materialelor supraconductoare (T_c , I_c și B_c), precum și depedența de temperatură a ultimilor doi parametri, fiind trecute în revistă principalele aspecte ale modelelor London și Abrikosov asupra supraconductibilității. De asemenea au fost prezentate materialele supraconductoare cu aplicabilitate practică, atât cele de tip LTS cât și cele de tip HTS, cu punerea în evidență atât a avantajelor cât și dezavantajelor fiecărei categorii. Materialele supraconductoare de înaltă temperatură s-au dovedit a fi superioare materialelor supraconductoare de joasă temperatură, atât ca valori de temperatură critică cât și ca valori de curent critic și câmp critic. Principalele aplicații ale materialelor supraconductoare HTS prezentate în acest capitol, o parte dintre acestea fiind dezvoltate și în cadrul Laboratorului de Supraconductibilitate Aplicată în Inginerie Electrică din ICPE-CA [28], prin performanțele obținute, demonstrează necesitatea utilizării acestor tipuri de materiale în vederea îndeplinirii obiectivelor acestei lucrări.

2. GENERATOR DE CÂMP MAGNETIC INTENS ȘI UNIFORM

2.1. INTRODUCERE

Obiectivul principal al lucrării de față constă în proiectarea unui electromagnet realizat cu materiale supraconductoare de înaltă temperatură (HTS), cu aplicații în spectroscopie nucleară. Pentru proiectarea unui astfel de electromagnet supraconductor este necesar a se ține cont în primul rând de condițiile impuse de aplicația în care acesta va fi utilizat. Principalii parametri impuși de aplicație sunt câmpul magnetic maxim generat de acesta, parametrii geometrici ai zonei de câmp și uniformitatea spațială a câmpului. În procesul de proiectare a electromagneților supraconductori se va ține seama de anumite contrângeri impuse atât de performanțele ce trebuie atinse, dar și de caracteristicile funcționale ale materialelor supraconductoare (parametrii critici ai materialului). Parametrii electrici și magnetici ai electromagnetului se vor putea calcula convențional, utilizând ecuațiile electromagnetismului, dar se vor aplica limitările impuse de parametrii materialului supraconductor utilizat.

2.2. Analiza câmpului magnetic

2.2.1. Bobina cu o singură spiră

Intensitatea câmpului magnetic în orice punct P situat la distanța R' de-a lungul axei z a unei bobine cu o singură spiră de rază r , parcursă de curentul I este [16, 29]:

$$H_z = \frac{Ir^2}{2\sqrt{(r^2 + R'^2)^3}}. \quad (8)$$

2.2.2. Bobina elicoidală

Pentru determinarea câmpului magnetic generat de o bobină reală, trebuie introdus parametrul adimensional λ , acesta reprezentând raportul dintre secțiunea utilă a conductorului utilizat și secțiunea totală ce include și izolatorul, acesta fiind denumit factor de umplere.

Considerăm o bobină cu o densitate de curent uniformă, cu raza interioară r_1 , raza exterioară r_2 , înălțimea totală $2h$ și numărul de spire N , se poate determina intensitatea câmpului magnetic în centrul bobinei generat de curentul staționar I ce parcurge elementul de arie dA , acesta fiind:

$$dB_z(0,0) = \frac{\mu_0 r^2 \lambda J dA}{2\sqrt{(r^2 + R'^2)^3}}, \quad (9)$$

unde J [A/m^2] reprezintă densitatea de curent și A [mm^2] este aria conductorului. Produsul dintre factorul de umplere λ și densitatea de curent J , are forma [16]:

$$\lambda J = \frac{NI}{2h(r_2 - r_1)}. \quad (10)$$

Introducând parametrii adimensionali $\alpha = r_2/r_1$ și $\beta = h/r_1$, câmpul magnetic în centrul bobinei este [16]:

$$B_z(0,0) = \mu_0 \lambda J r_1 \beta \ln \left(\frac{\alpha + \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}{1 + \sqrt{1 + \beta^2}} \right). \quad (11)$$

Introducând factorul de câmp $F(\alpha, \beta)$, ecuația (11) se poate scrie sub forma [30]:

$$B_z(0,0) = \mu_0 \lambda J r_1 F(\alpha, \beta). \quad (12)$$

2.2.3. Bobina plană (galeț)

Realizarea materialelor supraconductoare sub formă de bandă poate constitui o limitare în proiectarea anumitor geometrii în funcție de aplicația în care acestea vor fi utilizate. Un parametru restrictiv al acestui tip de material îl reprezintă raza de îndoire minimă (\sim cm). Datorită limitărilor impuse de geometria materialelor supraconductoare se impune realizarea bobinelor sub formă de galeți, însă pentru această configurație β devine foarte mic.

2.2.4. Bobine în configurație Helmholtz

Pentru generarea unui câmp magnetic cu uniformitate ridicată într-o anumită regiune de-a lungul axei Oz , este considerat un sistem de bobine Helmholtz, constând în două bobine identice de rază r , așezate coaxial la distanța h una față de cealaltă, prima bobină fiind aliniată pe axa z la distanța $z = h/2$, și cea de-a doua bobină fiind la distanța $z = -h/2$. Intensitatea câmpului magnetic generat de cele două bobine într-un punct oarecare situat pe axa z este [16]:

$$H_z(0, z) = \frac{I r^2}{2} \left\{ \left[r^2 + \left(z + \frac{h}{2} \right)^2 \right]^{-3/2} + \left[r^2 + \left(z - \frac{h}{2} \right)^2 \right]^{-3/2} \right\}. \quad (13)$$

O condiție impusă de aplicația pentru care electromagnetul supraconductor urmează a fi utilizat o reprezintă generarea unui câmp magnetic cu uniformitate ridicată într-o anumită regiune de-a lungul axei Oz , accesul pe direcția razei în zona de câmp magnetic uniform fiind o altă condiție de care trebuie ținut cont în alegerea configurației electromagnetului. Astfel, modelul de electromagnet ce poate satisface ambele condiții este reprezentat de un sistem de bobine în configurație Helmholtz.

2.3. Evaluarea parametrilor materialelor HTS

Pentru realizarea electromagnetului supraconductor se impune o analiză riguroasă a materialelor supraconductoare disponibile pe piață. Cele mai importante companii producătoare ale acestor tipuri de materiale supraconductoare, sunt [31]: Theva Dünnschichttechnik GmbH [32], FURUKAWA ELECTRIC GROUP (Superpower) [33], AMSC [34], FARADAY FACTORY [35]. Cei mai importanți parametri ai benzilor supraconductoare comercializate de companiile THEVA, AMSC și SuperPower, de care trebuie ținut cont în dezvoltarea aplicațiilor în care aceste materiale sunt utilizate sunt prezentați în Tabelul 1 [31].

Tabel 1. Caracteristici bandă supraconductoare [31].

	Theva Pro-Line TPL2000 [32]	AMSC 8502 [34]	SuperPower SCS12050 [36, 37]	Faraday [35]
Lățime (mm)	12	12	12	12
I_c (A) la temperatura $T = 77$ K	400	300	360	400
Lungime totală (m)	25 – 300	-	200 – 500	10 – 400
Grosime strat Cu (μ m)	50/100	-	10 – 110	2 x 5
Grosime substrat Hastelloy (μ m)	50	-	30/50	38
Grosime (μ m)	60	180 - 220	100	-
Diametru minim de indoire (mm)	30	30	11	10

Banda supraconductoare cu lățimea de 12 mm și grosimea de 0,1 mm model SCS12050, a fost selectată în vederea proiectării electromagnetului supraconductor.

2.4. Evaluarea numerică a câmpului magnetic generat de ansamblul Helmholtz

Parametrii impuși de aplicația în care electromagnetul trebuie să funcționeze, prezentați în Tabelul 2, sunt determinați de dimensiunile geometrice ale sistemului în care acesta urmează să fie montat.

Tabel 2. Parametrii electromagnetului [31].

Diametrul interior (D_i)	≤ 70 mm
Diametrul exterior (D_e)	≤ 200 mm
Câmpul magnetic	5 T
Eroarea de liniaritate a câmpului magnetic pentru $z = \pm 10$ mm (%)	$\leq 0,25$
Temperatura de funcționare	≤ 77 K

Datorită geometriei materialului supraconductor selectat, pentru realizarea bobinelor acestuia va fi aleasă configurația de galet, fiecare bobină a electromagnetului fiind realizată din doi galetii dublii (Figura 4).

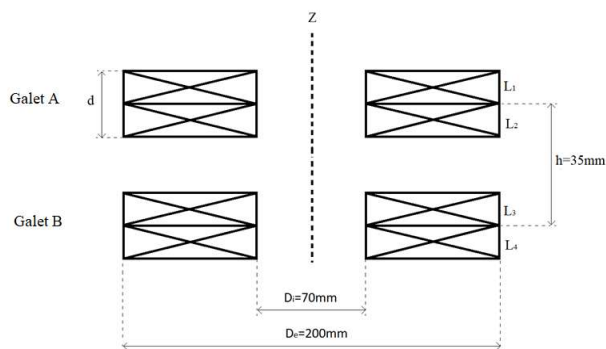


Fig. 4. Ansamblul Helmholtz.

Pentru reducerea spațiului dintre spirele bobinelor, se va utiliza bandă supraconductoare neizolată [31]. Pronind de la datele inițiale ale electromagnetului prezentate în Tabelul 2., au fost calculați parametrii geometrici ai acestuia, valorile rezultate fiind prezentate în Tabelul 3.

Tabel 3. Parametrii geometrici ai electromagnetului [31].

Factor de umplere	0,95
Rază medie	67,5 mm
Numărul de spire al unui galet	591
Număr spire al unui galet dublu	1182
Număr total spire al electromagnetului	2364
Lungimea medie a unei spire	423,9 mm
Lungimea totală a conductorului	1002,1 m
Înălțimea galetului dublu d	24 mm

2.4.1. Determinarea câmpului magnetic

Au fost calculați parametrii $\alpha = 2,857$ și $\beta = 0,342$ pentru ansamblul din Figura 5. Pentru distanța dintre bobine $h = D_i/2 = 35$ mm a fost calculat câmpul magnetic $B = 5,012$ T în centrul ansamblului ($z = 0$, $r = 0$) [31], și curentul de alimentare $I = 242$ A, eroarea de liniaritate

obținută pentru ($r = 0$ și $z = \pm 10$ mm) fiind de 2,1%, această valoare fiind mai mare decât valoarea impusă de aplicație. A fost mărită distanța dintre cele două bobine ale electromagnetului până la 53 mm, fiind obținut un câmp magnetic în centrul ansamblului de 5,012 T corespunzător unui curent de 280 A, eroarea de liniaritate a câmpului magnetic pentru $r = 0$ și $z = \pm 10$ mm fiind de 0,311%, această valoare depășind de asemenea valoarea impusă de aplicație. Mărind distanța dintre bobine până la 59 mm, a fost obținut un câmp magnetic de 5,003 T, curentul de alimentare calculat pentru această distanță fiind de 295 A, eroarea de liniaritate obținută pentru $r = 0$ și $z = \pm 10$ mm fiind 0,217 % [31], rezultatele obținute fiind prezentate în Figura 5 [31].

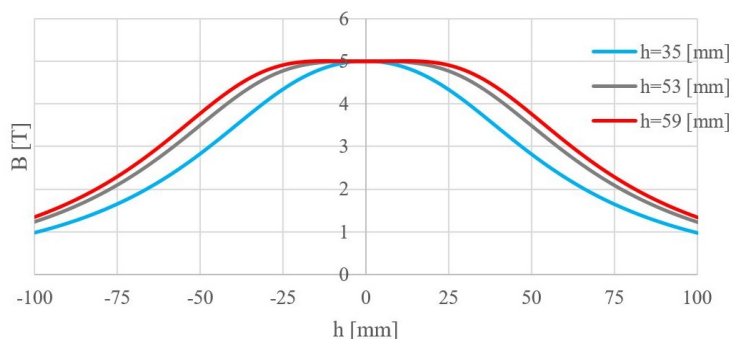


Fig. 5. Distribuția câmpului magnetic de-a lungul axei Oz , calculat pentru ansamblul de bobine în configurație Helmholtz, având distanța dintre bobine de 35 mm, 53 mm și 59 mm [31].

2.4.2. Determinarea câmpului magnetic prin modelare numerică

Au fost realizate modelări numerice pentru ansamblul de bobine prezentat în Figura 4. Pentru distanța dintre bobine $h = 35$ mm, fiind obținut câmpul magnetic de 4,978 T în centrul ansamblului ($z = 0$, $r = 0$), și un curent electric de alimentare de 242 A, spectrul câmpului magnetic obținut pentru modelul analizat, este prezentat în Figura 6. Pentru acest model, eroarea relativă dintre valoarea câmpului magnetic calculat și cea rezultată în urma modelării numerice este de 0,694 % [31].

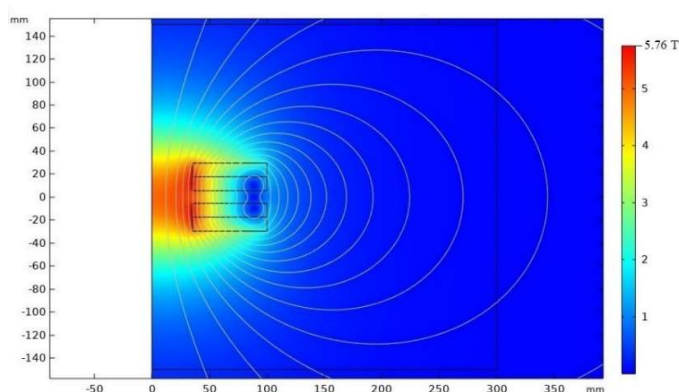


Fig. 6. Spectrul câmpului magnetic obținut prin modelare numerică pentru ansamblul Helmholtz prezentat în Figura 5 având distanța dintre bobine de 35 mm [31].

Au fost reluate modelările numerice pentru distanța de 53 mm dintre bobinele ansamblului, fiind obținut în centrul acestuia un câmp magnetic de 4,974 T pentru un curent electric de 280 A, eroarea relativă dintre valoarea câmpului magnetic calculat și valoarea obținută în urma modelării numerice fiind de 0,758 % [31]. Pentru distanța de 59 mm dintre bobinele ansamblului Helmholtz a fost obținut un câmp magnetic de 4,965 T în centrul acestuia ($z = 0, r = 0$), curentul electric de alimentare în acest caz fiind de 280 A, distribuția câmpului magnetic obținut prin modelare numerică pentru acest ansamblu este prezentată în Figura 7. Pentru această distanță, eroarea relativă dintre valoarea câmpului magnetic calculat și valoarea obținută prin modelare numerică este de 0,755 % [31].

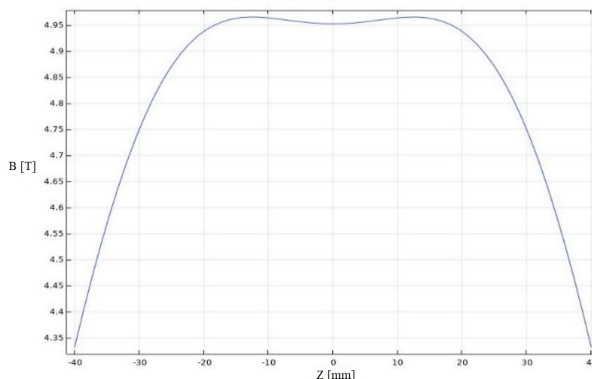


Fig. 7. Distribuția câmpului magnetic obținut prin modelare numerică pentru ansamblul Helmholtz prezentat în Figura 5 având distanța dintre bobine de 59 mm [31].

2.5. Concluzii

În acest capitol au fost prezentate principalele elemente ce intervin în proiectarea unui electromagnet realizat cu materiale supraconductoare HTS, pornind de la un model conceptual, la elaborarea acestui modelul conceptual s-a ținut cont de caracteristicile finale ale electromagnetului: câmpul magnetic maxim generat, dimensiunile geometrice ale zonei în care este generat câmpul magnetic, uniformitatea impusă a câmpului magnetic într-o anumită regiune. Ținând cont de faptul că aplicația pentru care a fost proiectat acest electromagnet impune o regiune de ± 10 mm de-a lungul axei Oz a acestuia pentru care uniformitatea câmpului magnetic generat trebuie să fie ridicată, a fost selectat în acest scop ansamblul de bobine în configurație Helmholtz. Pentru realizarea bobinelor electromagnetului a fost selectat materialul supraconductor de tip YBCO. De asemenea a fost prezentat un model de calcul pentru determinarea câmpului magnetic al acestui ansamblu de bobine, fiind determinată distanța optimă dintre bobine pentru care eroarea de liniaritate a câmpului este mai mică de 0,25 %. Rezultatele obținute prin calcul analitic au fost validate de modelările numerice realizate, în urma cărora a fost obținută o eroare relativă mai mică de 1%.

3. ANALIZA PARAMETRIILOR TERMICI AI SISTEMULUI DE RĂCIRE PENTRU ELECTROMAGNETUL SUPRACONDUCATOR

3.1. INTRODUCERE

Utilizarea materialelor de tip LTS sau HTS în aplicații practice, implică menținerea temperaturii acestora în intervalul 4 K – 80 K [38]. Modalitatea obținerii temperaturilor criogenice depinde de tipul materialelor utilizate (LTS sau HTS) dar și de durata de exploatare a acestora. Principala metodă de răcire utilizată în aceste aplicații constă în utilizarea agenților criogenici. O altă modalitate de obținere a temperaturilor criogenice o constituie utilizarea pompelor de căldură, denumite generic crioracitoare [40]. În acest capitol vor fi prezente principalele metode de obținere a temperaturilor criogenice, cât și modalitatea de dimensionare a sistemului de răcire necesar pentru utilizarea unui electromagnet supraconductor realizat cu materiale supraconductoare de înaltă temperatură.

3.2. Fenomene de transfer la temperaturi joase

Performanțele materialelor supraconductoare, depind în mod direct de regimul termic de funcționare, parametrii critici ai acestor materiale având o puternică dependență cu temperatura. Mecanismele de transfer de căldură sunt conducția termică, predominantă în mediile solide și lichide, convecția și radiația termică.

3.2.1. Conducția termică

Pentru un material termoconductor, având suprafața S_1 conectată la un termostat a cărui temperatură este T_1 și suprafața S_2 conectată la un termostat cu temperatura T_2 , unde $T_1 > T_2$, restul suprafețelor fiind adiabate, puterea termică de conducție \dot{Q}_{cond} [W] transferată printr-o suprafață S [m²] perpendiculară pe direcția de variație a temperaturii este [41]:

$$\dot{Q}_{\text{cond}} \frac{S}{L} \int_{T_1}^{T_2} k(T) dT. \quad (14)$$

unde k [W/mK] este conductivitatea termică a materialului, T [K] este temperatura și L [m] este lungimea materialului. Pentru o evaluare rapidă a puterii termice \dot{Q}_{cond} se pot utiliza valorile integralelor conductivității termice, acestea fiind disponibile pentru majoritatea materialelor utilizate în criogenie.

3.2.2. Radiația termică

Un factor important în dimensionarea sistemului de răcire necesar asigurării regimului termic de funcționare al echipamentelor utilizate la temperaturi criogenice îl reprezintă transferul de căldură prin radiație termică. Pentru două suprafețe paralele S_1 și S_2 , unde $S_1 = S_2$, având emisivitățile ε_1 și ε_2 și temperaturile corespunzătoare T_1 și respectiv T_2 , căldura transferată de la suprafața S_1 către suprafața S_2 prin radiație \dot{Q}_{rad} [W] este [16, 43]:

$$\dot{Q}_{\text{rad}} = \frac{S\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} = \frac{S\sigma(T_1^4 - T_2^4) \varepsilon_1 \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 - \varepsilon_1 \varepsilon_2}. \quad (15)$$

3.2.3. Convecția termică

Pentru determinarea transferului de căldură prin convecție, pentru o placă termoconductoare cu suprafața S aflată la temperatura T_s și plasată într-un fluid a cărui temperatură este T_m , și viteza (orizontală, uniformă) U_{in} . Pentru cazul în care curgerea fluidului este laminară, fluxul termic convectiv q_{cv} [Wm^{-2}] este descris de legea lui Newton [42]:

$$q_{cv} = h(T_s - T_m), \quad (16)$$

unde h [$Wm^{-2}K^{-1}$] reprezintă coeficientul de transfer termic convectiv. Între suprafața S a plăcii și *stratul limită hidrodinamic* de grosime δ , viteza fluidului variază între $u = 0$ la placă, până la viteza $u = 0,99U_{in}$. Pentru fluidele vâscoase, la perete, viteza de curgere $u = 0$, schimbul de căldură dintre perete și fluid (q_s) este realizată prin conducție [42].

3.3. Metode de răcire

Alegerea metodei de răcire a unui sistem în care sunt utilizate materiale supraconductoare în vederea menținerii temperaturii acestora sub temperatura critică (T_c) depinde în primul rând de tipul de material supraconductor utilizat. Pentru materialele de tip HTS, temperatura trebuie menținută în intervalul 20 K – 80 K. Un alt factor de care depinde stabilirea metodei de răcire ce urmează a fi utilizată îl reprezintă puterea termică totală necesară pentru menținerea sistemului într-un anumit interval de temperatură. Principalele metode de răcire utilizate în astfel de aplicații sunt răcirea cu agenți criogenici și răcirea cu pompe de căldură.

3.3.1. Răcirea cu agenți criogenici

Cea mai răspândită metodă de răcire pentru echipamentele realizate cu materiale supraconductoare o reprezintă utilizarea agenților criogenici. Un exemplu în acest sens este răcirea realizată prin imersare directă a unui echipament într-un criostat în care se află agenți criogenici în stare lichidă. Această metodă este cea mai des utilizată în aplicațiile de laborator în care este necesară o putere mare de răcire. Fluxul termic dintre suprafața unui corp și fluid, în funcție de ΔT_c (diferența dintre temperatura suprafeței corpului T_s și temperatura fluidului saturat T_{fs}) prezintă o valoare maximă ($q_{f,max}$), denumit flux critic [47], și un minim ($q_{f,min}$), denumit și punctul Leidenfros, acestea pot fi evaluate (pentru lichide criogenice) utilizând corelația Kutateladze [46, 47].

3.3.2. Răcirea cu pompă de căldură

O metodă modernă de răcire constă în utilizarea unei pompe de căldură denumită generic criorăcitor. În prezent sunt disponibile diferite tipuri de criorăcitoare, cu puteri ce variază de la câțiva mW până la 10^{10} W, tipurile de criorăcitoare uzuale utilizate în prezent sunt [44]: Criorăcitor JT (Joule-Thomson), Criorăcitor Bryton și Criorăcitorul Gifford-McMahon (GM). Criorăcitor GM este o pompă de căldură cu una sau două trepte de răcire, cu circuit închis, ce utilizează heliu gaz. Un exemplu de criorăcitor cu două trepte de răcire este criorăcitorul model RDK 415D, produs de compania Sumitomo, în Figura 8 este prezentată diagrama de funcționare a acestuia. Pentru treapta I, puterea termică corespunzătoare temperaturii de 50 K este de 40W și 1,5 W pentru treapta II, pentru temperatura de 4,2 K.

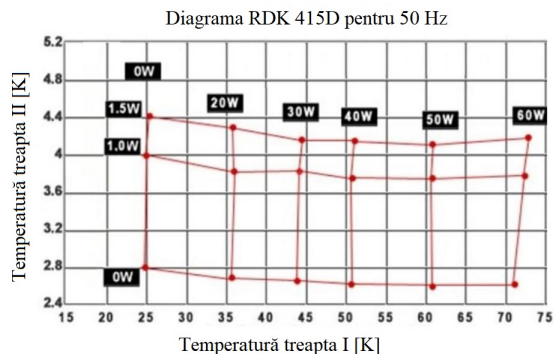


Fig. 8. Diagrama de funcționare a criorăcitorului RDK 415D [45].

3.4. Dimensionarea sistemului de răcire pentru electromagnetul supraconductor HTS

Pentru menținerea temperaturii electromagnetului HTS la o valoare sub temperatura critică a materialului supraconductor, trebuie evaluat fluxul termic radiativ pe care acesta îl primește de la pereții criostatului. Pentru a limita acest flux, electromagnetul este acoperit cu un ecran termic din cupru, ancorat termic la criorăcitor. Pentru determinarea dimensiunilor ecranului și criostatului cât și a distanțelor dintre acestea se va lua în considerare distanța dintre treptele criorăcitorului, și dimensiunile electromagnetului. Parametrii geometrici rezultați ai ansamblului criostat – ecran sunt prezentați în Tabelul 5.

Tabelul 5. Parametrii geometrici ai ansamblului ecran-criostat.

Înălțimea ecran (mm)	410
Diametrul exterior al ecranului (mm)	340
Înălțime criostat (mm)	710
Diametru exterior criostat (mm)	510

3.4.1. Parametrii termici ai ansamblului criostat-electromagnet

Ansamblul format din electromagnetul HTS, sistemul de răcire și circuitul de alimentare este prezentat în Figura 9 [46], elementele constructive ale acestui ansamblu sunt: 1. Criostatul; 2. Criorăcitorul; 3. Trecerile de curent; 4. Conductorii de cupru; 5. Ecranul termic; 6. Conductorii HTS; 7. Electromagnetul supraconductor.

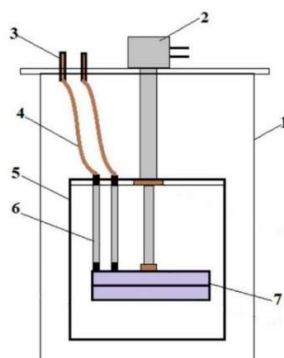


Fig. 9. Circuitul de alimentare pentru un electromagnet supraconductor HTS [46].

3.4.2. Evaluarea transferului radiativ

Cunoscând temperatura suprafeței ecranului termic ($T_1 = 50 \text{ K}$) și a emisivității acestuia, a temperaturii suprafeței criostatului ($T_2 = 293,15 \text{ K}$) și a emisivității acesteia, a fost calculată cantitatea de căldură radiativă absorbită de ecran, rezultând o putere termică de $8,11 \text{ W}$.

Pentru evaluarea fluxului termic radiativ prin modelări numerice a fost realizat un model geometric pentru ansamblu care include atât criostatul cât și ecranul termic plasat în interiorul acestuia. În urma modelării numerice a fost obținută o putere termică radiativă absorbită de ecran de $7,65 \text{ W}$, rezultatul acestei modelări fiind prezentat în Figura 10.

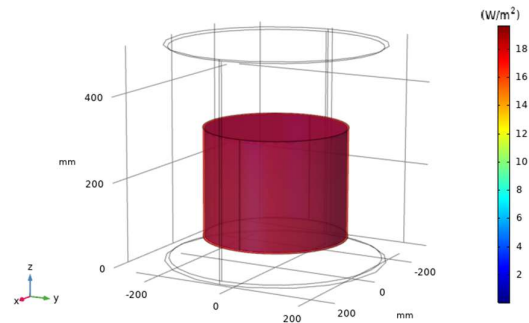


Fig. 10. Flux termic radiativ primit de ecranul termic de cupru de la pereții criostatului [46].

3.4.3. Evaluarea fluxului conductiv

Lungimea conductoarelor de cupru este impusă de distanța dintre partea superioară a ecranului termic și flanșa superioară a criostatului, aceasta fiind de 190 mm . Acestea sunt ancorate termic la un capăt de ecranul termic ce se află la temperatura $T_1 = 50 \text{ K}$ și în celălalt capăt la flanșa superioară a criostatului, a cărei temperatură $T_2 = 293,15 \text{ K}$. A fost calculată puterea Joule și fluxul de căldură conductiv pentru diferite lungimi ale conductoarelor de cupru, volumul acestuia fiind menținut constant (Figura 11).

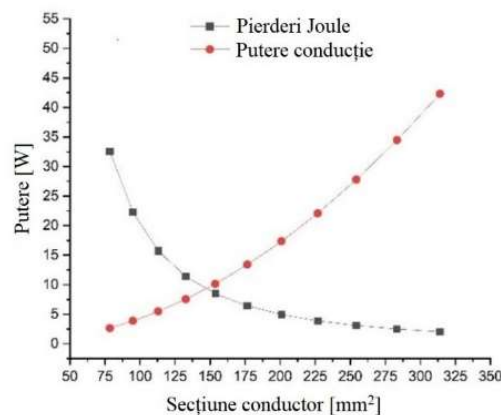


Fig. 11. Pierderile Joule și fluxul termic conductiv calculate pentru diferite secțiuni ale conductoarelor [46].

A fost determinată secțiunea transversală optimă a conductoarelor de cupru, pentru care puterea totală (Joule și de conducție) este de $22,368 \text{ W}$, puterea termică totală calculată, ce

include și puterea termică radiativă a ecranului fiind de 30,48 W, această valoare fiind mai mică decât puterea maximă a treptei I a criorăcitorului, care permite funcționarea acesteia la temperatura de 50 K. Au fost realizate modele geometrice ale conductorilor de alimentare, pentru diferite lungimi și secțiuni ale acestora, în vederea determinării pierderilor prin efect Joule și a fluxului termic conductiv. Rezultatele obținute pentru conductorii având lungimea de 1619 mm sunt prezentate în Figura 12.

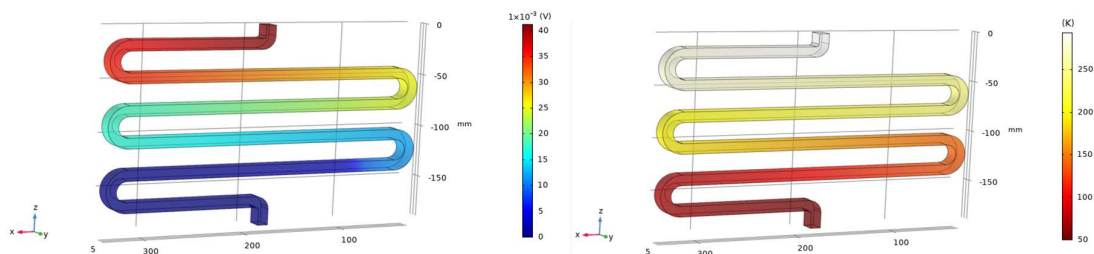


Fig. 12. Conductor 1619 mm, 300 A; potențial electric (stânga) și profilul termic (dreapta) [46].

În Figura 13 sunt prezentate pierderile (conductive și Joule) obținute în urma modelărilor numerice pentru diferite lungimi și secțiuni ale conductorilor de cupru. A fost determinată secțiunea optimă a acestora pentru care puterea termică totală (de conducție și Joule) este minimă, aceasta fiind de 147,39 mm², cu o lungime de 1619 mm, pentru o putere totală de 23,019 W. Puterea termică totală a ansamblului ecran – conductoare (ce include și puterea termică radiativă) fiind de 30,669 W.

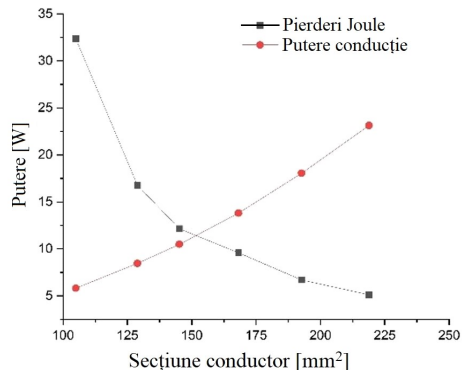


Fig. 13. Pierderile Joule și fluxul termic conductiv obținute în urma modelării numerice pentru diferite secțiuni ale conductoarelor [46].

Pentru evaluarea influenței conductorilor de cupru asupra ecranului termic al electromagnetului, a fost realizată modelarea numerică pentru un model geometric ce cuprinde ansamblul criostat-ecran termic împreună cu cele două conductoare din cupru. În urma acestei modelări, a fost obținută o putere termică totală de de 35,571 W pentru acest ansamblul, aceasta incluzând fluxul termic radiativ, conductiv și pierderile Joule.

Pentru limitarea fluxului termic conductiv dinspre conductoarele de cupru către electromagnet, circuitul de alimentare dintre conductoarele de cupru și electromagnet a fost realizat din bandă HTS, aceasta având partea inferioară ancorată termic la treapta a II-a a criorăcitorului, partea superioară fiind conectată la treapta I a criorăcitorului. În această configurație, temperatura benzii supraconductoare este menținută sub valoarea temperaturii

critice a acesteia (~ 92 K), asigurând astfel alimentarea electromagnetului cu pierderi Joule neglijabile, pentru un curent de alimentare de 300 A. În Figura 14 [47] este prezentat modelul conductorului de alimentare realizat cu bandă supraconductoare HTS, elementele constructive ale acestuia sunt: 1. bornă de cupru; 2. banda supraconductoare; 3. carcasă.



Fig. 14. Conductor electric realizat cu bandă HTS [47].

Pentru evaluarea fluxului termic conductiv prin acest conductor, au fost realizate modelări numerice succesive pentru diferite materiale și grosimi ale acestuia. În urma modelărilor numerice, a fost determinată puterea termică conductivă minimă de 87,01 mW pentru conductorul HTS având suportul din inox, cu grosimea peretelui de 0,5 mm [47].

Pentru determinarea regimului termic de funcționare al electromagnetului, a fost realizat un model geometric pentru întreg ansamblul format din ecran termic, electromagnetul supraconductor HTS, conductorii de cupru și conductorii HTS. În urma modelării numerice a fost obținută o putere termică conductivă de 123,5 mW pentru conductorii de tip HTS, și o putere termică radiativă a electromagnetului de 68,52 mW. Astfel, puterea termică totală calculată pentru ansamblul electromagnet – conductori HTS este de 315,52 mW, aceasta fiind sub valoarea maximă a puterii maxime disponibile pentru treapta a II-a a criorăcitorului de 1,5 W pentru temperatura de 4,2 K.

3.5. Concluzii

În acest capitol a fost realizată modelarea numerică pentru sistemul de alimentare al electromagnetului supraconductor HTS, pentru determinarea conductorilor optimi de cupru care fac parte din sistemul de alimentare electrică al electromagnetului.

Ecranul termic al electromagnetului HTS este ancorat termic la treapta I a criorăcitorului, care primește căldură din două surse: radiativă, de la criostat, și conductivă, de la cei doi conductori de cupru. Căldura transmisă de conductorii de cupru are și aceasta două componente: conductivă și puterea Joule. Evaluările numerice folosind tehnica FEM au evidențiat următoarele valori pentru conductorii de cupru: lungimea de 1619 mm și secțiunea transversală de 147,39 mm². Aceste valori au fost obținute pentru o putere termică totală de 35,571 W, evaluarea fiind efectuată luând în considerare toate efectele termice implicate și deja enumerate. Electromagnetul HTS cât și un capăt al conductorilor realizați cu bandă HTS sunt conectați termic la treapta a II-a a criorăcitorului. Puterea termică (conductivă și radiativă) a acestora obținută în urma modelărilor numerice este de 367.36 mW, această valoare fiind mai mică decât puterea disponibilă, de 1,5 W pentru temperatura de 4,2 K. Întrucât puterile termice pentru cele două trepte ale criorăcitorului nu depășesc valorile limită de 40 W și respectiv 1,5 W, electromagnetul supraconductor poate fi răcit cu acest tip de criorăcitor.

4. REALIZAREA ȘI TESTAREA ELECTROMAGNETULUI SUPRACONDUCTOR

4.1. INTRODUCERE

Pentru realizarea electromagnetului supraconductor HTS este necesară atât o structură mecanică de susținere a bobinelor, cât și un criostat pentru izolarea termică a electromagnetului față de mediul ambiant. Celelalte elemente constructive se referă la asigurarea regimului termic de funcționare a bobinelor HTS, și la alimentarea cu energie electrică a acestora. În acest capitol va fi prezentat modul de realizare al unui electromagnet HTS, construcția acestuia implicând o testare riguroasă a materialului supraconductor cu care acesta va fi realizat.

4.2. Realizarea structurii mecanice a electromagnetului

Realizarea elementelor mecanice ale electromagnetului a fost făcută având în vedere parametrii geometrici, electrice și magnetici ai acestuia. Elementele constructive ale structurii mecanice a electromagnetului de tip HTS (Figura 15), sunt următoarele: 1. inel central suport; 2. capac electromagnet; 3. suportți pentru distanțare perechi de galeți; 4. distanțare exterioare.

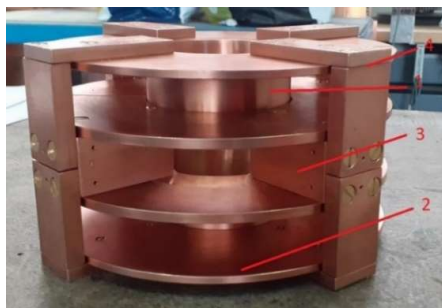


Fig. 15. Suport mecanic electromagnet supraconductor.

4.3. Realizarea bobinelor supraconductoare

Pentru execuția bobinelor electromagnetului HTS, a fost proiectat și realizat un dispozitiv specific acestui tip de bobinaj, prezentat în Figura 16. Materialul supraconductor de înaltă temperatură ales pentru realizarea bobinajului este produs de compania SuperPower [36], acesta este realizat sub formă de bandă cu lățimea de 12 mm și grosimea de 0,1 mm.

Pentru realizarea unui galet dublu, banda HTS (1) bobinată pe suportul de aluminiu (2) este ghidată printr-o rolă din teflon (4). Pentru o distribuție uniformă a tensiunii mecanice a benzii, platanul de aluminiu (2) este conectat la o frână magnetică (3) a cărei cuplu poate fi reglată în intervalul 0 – 36 Nm [48]. Suportul bobinelor electromagnetului (7) este fixat mecanic pe un platan de aluminiu (6), acesta fiind antrenat de un motor electric (5). Banda HTS este distribuită simetric pe două platane identice (2 și 9), bobinarea galetului inferior fiind realizată utilizând banda așezată pe platanul (2), în timp ce a doua jumătate a cantității de bandă necesară realizării bobinajului (10) este așezată pe platanul (9), fixarea acestuia fiind realizată cu un ax metalic (8). După realizarea primului galet, platanul (9) ce conține banda necesară realizării celui de al doilea galet este fixată pe frâna magnetică (3), continuându-se astfel bobinarea galetului superior. Determinarea numărului de spire pentru fiecare galet este realizată cu un numărător electronic echipat cu senzor Hall (11).

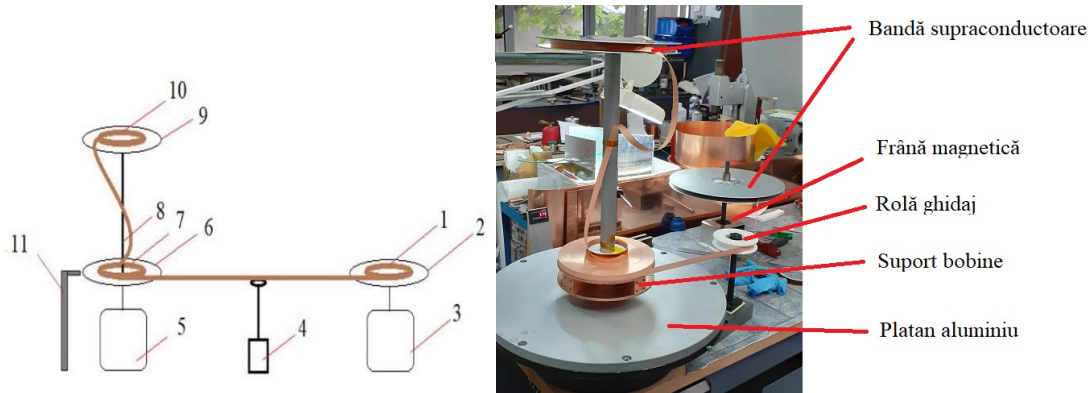


Fig. 16. Schema de principiu a dispozitivului pentru realizarea bobinelor HTS ale electromagnetului în partea stângă și imaginea cu dispozitivul utilizat pentru realizarea electromagnetului în dreapta.

4.3.1. Joncționarea benzilor de tip HTS

Pentru realizarea unui galet dublu este necesară o bandă supraconductoare cu lungimea de 501 m, lungimea benzii HTS livrată fiind de ~ 350 m [36]. În această situație se impune o îmbinare a sectoarelor de bandă HTS. Pentru realizarea joncțiunii benzilor a fost proiectată și realizată o plită termostatăă, cu intervalul de temperatură $50\text{ }^{\circ}\text{C} - 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ [49]. În Figura 17 este prezentată o bandă HTS de 12 mm joncționată, în timpul testării. Elementele constructive ale instalației utilizate pentru aceste măsurători sunt: 1. criostatul; 2. placa suport; 3. conductorii electrici; 4. cablurile de măsură; 5. banda supraconductoare joncționată. Pentru determinarea rezistenței joncțiunilor (Figura 18), au fost realizate teste succesive utilizând diferite tipuri de aliaje de lipire, pentru o distanță de suprapunere de 100 mm. Măsurarea rezistenței joncțiunilor a fost realizată utilizând o sursă de alimentare American Magnetics (AMI) [50], cu un curent maxim de 300 A, și o rezoluție a curentului măsurat de $18,7\text{ }\mu\text{A}$, măsurarea tensiunii a fost realizată cu nanovoltmetrul Keithley 2182, cu o rezoluție este de 1 nV [51].

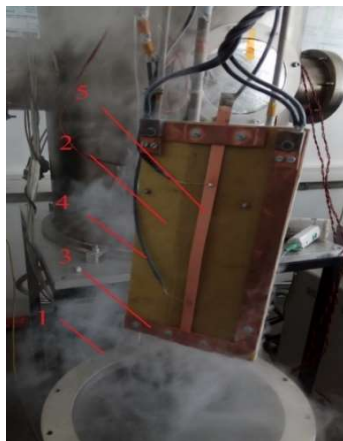


Fig. 17. Joncțiunea benzii HTS de 12 mm montată pe suportul de testare.

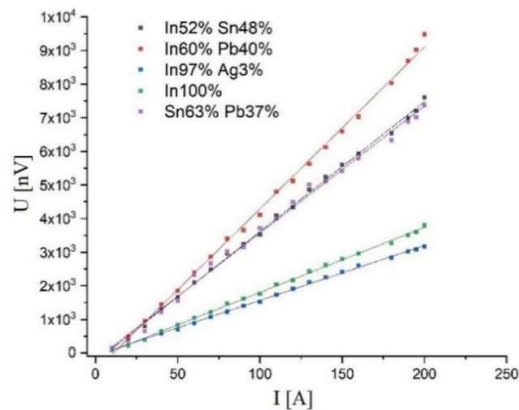


Fig. 18. Valorile rezistențelor joncțiunilor benzii HTS 12 mm [49].

Utilizând sursa de alimentare AMI, a cărei precizie este de 0.015 % pentru curentul de 100 A, și nanovoltmetrul Keithley cu precizia de 2,614 % corespunzătoare tensiunii măsurate, pentru aliajul 97 % In / 3 %Ag, a fost calculată o rezistență de $15,3\text{ n}\Omega \pm 2,63\text{ \%}$.

4.3.2. Realizarea conductorilor de alimentare electrică

Pentru asigurarea alimentării electrice a electromagnetului supraconductor, au fost realizați conductorii electrici din cupru și conductorii electrici de tip HTS. Pentru realizarea conductorilor HTS, a fost utilizată plita realizată pentru joncționarea benzilor HTS. În Figura 19 sunt prezentate conductoarele HTS fără carcasă, realizate cu plita termostată. Pentru conectarea conductorilor electrici de tip HTS la bobinajul electromagnetului supraconductor (Figura 20), au fost realizate elemente mecanice din cupru (1), acestea fiind ancorate mecanic pe o placă suport din cupru (2), placa fiind ancorată termic de suportul electromagnetului (3), pe aceste elemente au fost lipite capetele bobinajului electromagnetului.



Fig. 19. Conductorii HTS fără carcasă realizați cu plita termostată.



Fig. 20. Element de alimentare electrică a electromagnetului

Rezistența electrică dintre borna de cupru a electromagnetului și borna conductorului HTS a fost măsurată după montare, fiind obținută valoarea de $\sim 300 \mu\Omega$.

4.3.3. Realizarea electromagnetului

Pentru realizarea bobinelor electromagnetului a fost aleasă soluția bobinării galeților cu bandă supraconductoare neizolată. Pentru izolarea bobinelor față de carcasa electromagnetului, între perechea de galeți dublii și discurile superioare și inferioare a fost aplicat un strat de carton, grosimea acestuia fiind de 0,017 mm. După realizarea bobinajului galeților, au fost montate bornele de alimentare electrică a electromagnetului (Figura 21.). Pentru monitorizarea temperaturii bobinajului electromagnetului HTS au fost montați 4 senzori de temperatură cu platină, de tip PT100, carcasa acestora fiind izolată electric față de carcasa electromagnetului prin intermediul unor garnituri de teflon, acești senzori fiind în contact termic cu bobinele supraconductoare (Figura 22).



Fig. 21. Ansamblul electromagnetului supraconductor.

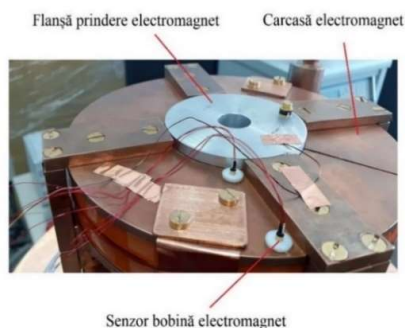


Fig. 22. Electromagnetul supraconductor cu senzori de temperatură montați.

4.4. Sistemul criogenic de răcire

Sistemul criogenic de răcire al electromagnetului este bazat pe utilizarea unui criorăcitor Gifford-McMahon model RDK415D cu două trepte de răcire, cu temperatura de 50 K și respectiv 4,2 K, răcirea electromagnetului fiind realizată prin conducție. Sistemului criogenic de răcire al electromagnetului este alcătuit dintr-un criostat vidat la presiunea de $\sim 10^{-6}$ mbar, în care este montat capul de răcire al criorăcitorului, acesta asigurând răcirea electromagnetului supraconductor și a ecranul termic.

4.4.1. Criostatul

Pentru asigurarea regimului termic de funcționare a electromagnetului HTS, a fost realizat un criostat din inox nemagnetic OL304, cu diametru interior de 500 mm și înălțimea de 710 mm, având grosimea peretelui de 5 mm (Figura 23). În partea superioară, este prevăzut cu o flanșă de 10 mm diametru, pentru accesul sondei Hall de măsură a câmpului magnetic.



Fig. 23. Criostatul montat pe cadrul suport.

4.4.2. Ecranul termic

Ecranul termic necesar ecranării fluxului termic radiativ dinspre pereții criostatului către electromagnetul supraconductor de tip HTS este realizat din tablă de cupru, cu grosimea de 1 mm. Partea inferioară a acestuia este ancorată termic la treapta I a criorăcitorului, la temperatura de 50 K. În partea superioară este prevăzut cu un orificiu de 10 mm diametru, pentru accesul sondei Hall de măsură, în vederea măsurării câmpului magnetic generat de electromagnetul supraconductor. Datorită faptului că în timp cuprul oxidează, crescând considerabil emisivitatea acestuia, ecranul a fost acoperit la exterior cu mylar aluminizat, pentru asigurarea unei emisivități reduse.

4.5. Teste experimentale

În scopul stabilirii performanțelor electromagnetului supraconductor HTS, a fost realizat un sistem de testare experimentală (Figura 24) care să permită asigurarea condițiilor optime de funcționare ale acestuia, elementele constructive: 1- Flanșă criostat; 2- Incintă vidată (criostat); 3- Ecran termic; 4- Criorăcitor G-M; 5- Placă-suport pentru electromagnet; 6-

Conductori electrici din cupru; 7- Electromagnet HTS; 8- Conductori electrici de tip HTS; 9- Sondă Hall criogenică; 10- Suport susținere ansamblu testare.

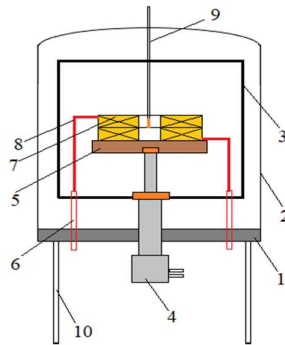


Fig. 24. Sistemul de testare a electromagnetului HTS [52].

4.5.1. Testarea benzilor supraconductoare

Banda HTS utilizată a fost livrată cu lungimi de ~ 350 m. Fiecare sector de bandă comercializat este bobinat pe suporturi de aluminiu, pentru asigurarea unei protecții mecanice adecvate. Pentru fiecare sector de bandă achiziționat au fost realizate teste preliminare în vederea determinării curenților critici ai acestora. În Figura 25 este prezentat un suport de aluminiu cu 350 m de bandă supraconductoare supus testării. Banda HTS bobinată în suportul de aluminiu (1) este așezată pe o placă de cupru (2) ce se află în contact termic cu treapta II a criorăcitorului, alimentarea electrică fiind realizată prin conductoarele de cupru (3), conductoarele electrice utilizate pentru măsurarea tensiunii (4) sunt cositorite direct pe banda supraconductoare, testarea benzilor fiind realizată pentru un curent de maxim 350 A. În urma măsurărilor de curent critic, a fost calculată valoarea medie de $0,51 \text{ n}\Omega \pm 43,8 \%$, nefiind atins curentul critic I_c corespunzător pragului câmpului electric de $1 \text{ }\mu\text{V/cm}$ [36] (Figura 26).



Fig. 25. Rolă cu bandă supraconductoare 12 mm.

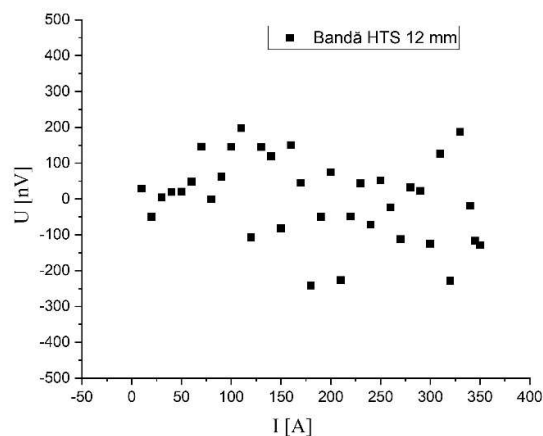


Fig. 26. Tensiunea măsurată în funcție de curentul de alimentare pentru banda HTS de 12 mm, cu lungimea de 350 m.

4.5.2. Sistemul de testare al electromagnetului HTS

Lanțul de măsură necesar pentru testarea electromagnetului supraconductor (Figura 27) este alcătuit din: 1. Sursa de alimentare, model AMI 430 cu un curent de alimentare de maxim 500 A [50]; 2. Monitor de temperatură LakeShore model 218 [53]; 3. Nanovoltmetru Keythlei 2182 [51]; 4. Gaussmetru LakeShore DSP475 [53]; 5. Calculator.



Fig. 27. Lanțul de măsură utilizat pentru testarea electromagnetului HTS.

4.5.3. Rezultate experimentale

Electromagnetul supraconductor a fost supus testelor criogenice, fiind măsurate temperaturile bobinelor și temperatura treptei a II-a a criorăcitorului, amplasarea senzorilor de temperatură utilizați este prezentată în Figura 28. Au fost utilizați 5 senzori de temperatură, o diodă cu siliciu de tip DT670 produsă de compania LakeShore [53], temperatura minimă măsurabilă de acesta fiind de 1,4 K, și o precizie de ± 12 mK, montat pe treapta II a criorăcitorului. Senzorii pentru măsurarea temperaturii bobinelor electromagnetului sunt termorezistențe cu platină, cu domeniul de temperatură 14 K – 873 K, și precizia de ± 20 mK. Răcirea electromagnetului a fost evaluată pentru un interval de timp de 3 zile, temperatura bobinajului electromagnetului situându-se în intervalul 24 K și 42 K, temperatura treptei II a criorăcitorului atingând valoarea de 16 K. Electromagnetul răcit a fost alimentat cu un curent maxim de 295 A. În Figura 29 este prezentată variația temperaturii electromagnetului în timpul funcționării.

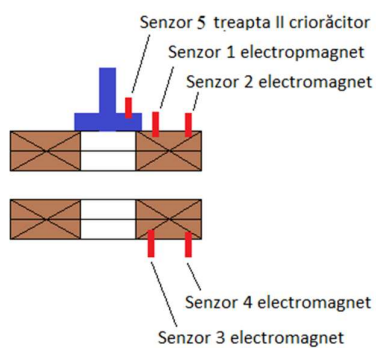


Fig. 28. Poziționarea senzorilor de temperatură.

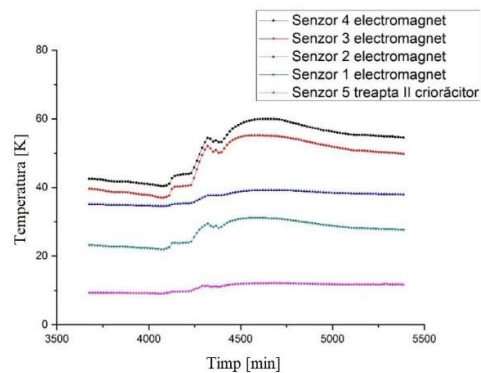


Fig. 29. Temperatura electromagnetului HTS în timpul funcționării.

Temperatura bobinei inferioare a acestuia, fiind cea mai depărtată de treapta II a criorăcitorului, prezintă o variație mai mare a temperaturii comparativ cu temperatura bobinei superioare. Creșterea temperaturii electromagnetului, urmată de o răcire treptată este datorată căldurii produse de curenții turbionari induși în carcasa de cupru a electromagnetului, produși de variația curentului de alimentare.

Pentru determinarea câmpului magnetic generat de electromagnetul supraconductor HTS în funcție de curentul de alimentare al acestuia, a fost plasată în centrul ansamblului de bobine o sondă Hall criogenică echipată cu un senzor axial, produsă de compania LakeShore, model HMCA-2560-WN, cu domeniul de măsură cuprins în intervalul 3,5 mT – 35 T, precizia acestui senzor fiind de $\pm 2\%$ din valoarea măsurată. Aceasta este conectată la un Gaussmetru LakeShore model DSP475, precizia de măsură fiind de $\pm 0,05\%$ din valoarea citită și $0,005\%$ din domeniul de măsură, și rezoluția de 0,1 mT pentru domeniul de 35 T. În urma măsurătorilor, pentru un curent de alimentare de 295 A a fost obținut un câmp magnetic de 5,05 T.

După atingerea valorii curentului de alimentare al electromagnetului HTS de 295 A, sonda Hall de măsură a câmpului magnetic a fost deplasată pe direcția axei Oz , pentru intervalul $\Delta z = \pm 28$ mm, în vederea evaluării uniformității câmpului magnetic generat de-a lungul acestei axe. În Figura 30 este prezentat graficul cu rezultatele măsurătorilor câmpului magnetic pe axa Oz în intervalul $\Delta z = \pm 28$ mm, centrat în origine ($z = 0, r = 0$). Se constată o asimetrie a câmpului magnetic de 7,1 mT, aceasta fiind datorată erorilor apărute în procesul de execuție a bobinelor corespunzătoare celor doi galeți dublii ai electromagnetului.

În vederea evaluării uniformității câmpului magnetic măsurat în centrul electromagnetului (Figura 31) de-a lungul axei Oz , pentru distanța de ± 10 mm față de centrul acestuia ($z = 0, r = 0$) a fost calculată eroarea de liniaritate, fiind obținută valoarea de 0,112 % la distanța de +10 mm, pentru distanța de -10 mm fiind obținută valoarea de 0,059 %, valoarea impusă de aplicație pentru distanța ± 10 mm fiind $\leq 0,25\%$.

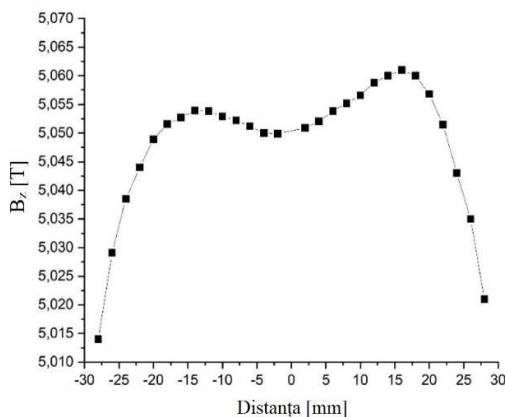


Fig.30. Distribuția câmpului magnetic măsurat de-a lungul axei Oz pentru electromagnetul supraconductor HTS.

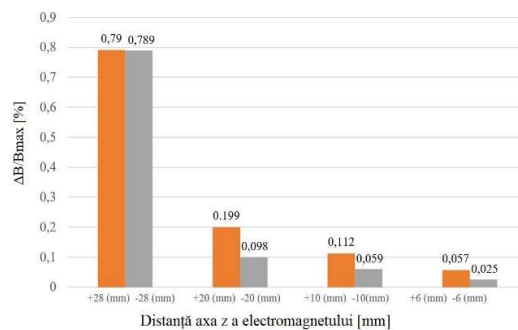


Fig. 31. Eroarea de liniaritate a câmpului magnetic de-a lungul axei Oz .

În capitolul 2 a fost calculat câmpul magnetic de 5,003 T generat de ansamblul de bobine HTS în configurație Helmholtz pentru valoarea curentului de alimentare de 295 A, eroarea de liniaritate calculată pentru intervalul $\Delta z = \pm 10$ mm față de origine ($r = 0, z = 0$) fiind de 0,217 %. În Figura 32 sunt prezentate valorile câmpului magnetic calculat și al câmpului

magnetic obținut experimental, pentru $r = 0$, și $\Delta z = \pm 28$ mm. Eroarea relativă dintre cele două valori ale câmpului magnetic (calculată și măsurată) este de 1,13 %.

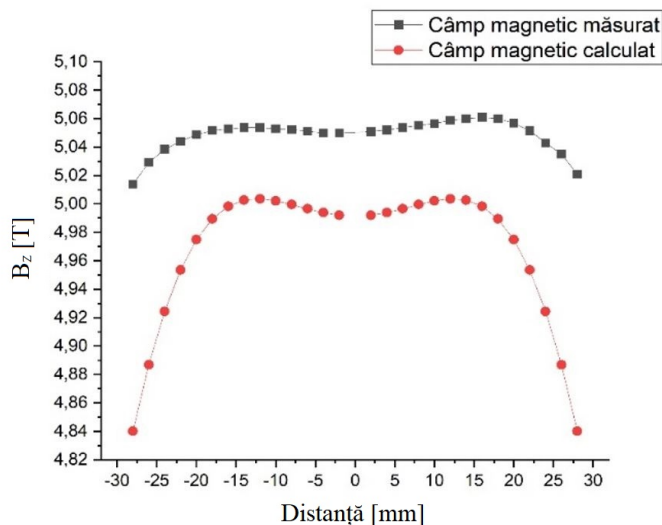


Fig. 32. Distribuția câmpului magnetic de-a lungul axei Oz .

4.6. Concluzii

În cadrul acestui capitol au fost prezentate etapele realizării și testării unui electromagnet în configurație Helmholtz realizat cu materiale HTS. Pentru jonctionarea benzii HTS în vederea obținerii unei lungimi necesare realizării galeților electromagnetului, au fost realizate studii experimentale cu privire la tipul de aliaj utilizat, valoarea obținută experimental a rezistenței joncțiunilor benzilor supraconductoare este de ~ 15 n Ω pentru In 97 % Ag 3 %. În urma testelor criogenice realizate pentru electromagnetul supraconductor HTS, temperatura benzii supraconductoare s-a încadrat în intervalul 24 K și 42 K, valoarea temperaturii treptei I a criorăcitorului fiind de 16 K. Nefiind depășită temperatura critică T_c a benzii supraconductoare (92 K), electromagnetul poate fi menținut în starea supraconductoare pentru o perioadă de timp nedeterminată. În cadrul testelor electromagnetului supraconductor HTS, a fost măsurat câmpul magnetic generat de acesta pentru diferite valori ale curentului de alimentare. Astfel, pentru o valoare a curentului de 295 A, câmpul magnetic de-a lungul axei Oz , pentru $r = 0$, prezintă un minim de 5,05 T și un maxim de 5,06 T. Eroarea de liniaritate a câmpului magnetic măsurat de-a lungul axei z este de 0,112 % pentru distanța de +10 mm, respectiv 0,059 % pentru distanța de -10 mm, valorile obținute fiind mai mici decât valoarea impusă de aplicație pentru distanța ± 10 mm, aceasta fiind $\leq 0,25$ %. În urma măsurătorilor de câmp magnetic realizate pentru acest electromagnet, pentru distanța $\Delta z = \pm 15$ mm față de centrul acestuia ($z = 0$, $r = 0$) s-a constatat o asimetrie a acestuia de 7,1 mT, aceasta fiind datorată erorilor apărute în procesul de execuție a bobinelor corespunzătoare celor doi galeți dublii ai electromagnetului, eroarea relativă dintre valorile câmpului magnetic obținut experimental și valorile calculate pentru acest ansamblu de bobine este de 1,13 %.

5. CONCLUZII

C.1. Concluziile generale

Capitolul I prezintă fenomenele ce guvernează starea supraconductoare a materialelor și a parametrilor acestor tipuri de materiale precum câmpul critic B_c , curentul critic I_c și temperatura critică T_c , acestia determinând clasificarea acestor materiale. În funcție de temperatură, se disting trei categorii de materiale: materiale LTS (Low Temperature Superconductor), pentru utilizarea acestora fiind necesară utilizarea heliului lichid, materiale MTS (Medium Temperature Superconductor) și materiale HTS (High Temperature Superconductor). De asemenea, au fost prezentate principalele aplicații în care aceste materiale s-au impus prin performanțele superioare față de materialele convenționale.

În Capitolul II au fost prezentate principalele elemente ce intervin în proiectarea unui electromagnet realizat cu materiale supraconductoare HTS. De asemenea, au fost prezentate principalele caracteristici ale materialelor HTS disponibile pe piață, în urma analizei acestora fiind selectat tipul de material utilizat pentru proiectarea și realizarea electromagnetului.

A fost prezentată o modalitate de calcul pentru evaluarea câmpului magnetic produs de electromagnetul supraconductor, ținând cont de parametrii geometrici ai acestuia, fiind aleasă configurația de galeți dublii pentru realizarea bobinelor electromagnetului, datorită restricțiilor geometrice ale benzii supraconductoare pe de o parte, dar și constrângerile geometrice impuse de aplicația în care acest electromagnet va funcționa. Pentru acest electromagnet a fost realizat un model geometric în vederea evaluării numerice prin metoda elementului finit a câmpului magnetic în funcție de curentul de alimentare, fiind obținută o eroare relativă mai mică de 1% între rezultatele obținute prin modelare numerică față de rezultatele calculate.

În Capitolul 3 au fost evaluate principalele metode de răcire utilizate pentru astfel de aplicații, fiind aleasă ca soluție pentru asigurarea regimului termic de funcționare a electromagnetului un criorăcitor cu circuit închis de tip Gifford-McMahon cu două trepte de răcire, treapta I având o putere termică de 40W corespunzătoare temperaturii de 50 K, a II-a treaptă având 1,5 W pentru temperatura de 4,2 K. Datorită puterilor termice mici disponibile pentru celor două trepte ale criorăcitorului, au fost evaluate puterile termice (de conducție și Joule) pentru conductorii de alimentare ai electromagnetului, fiind determinată atât lungimea cât și secțiunea optimă pentru care pierderile sunt minime, puterea termică totală a elor doi conductori fiind de 23,019 W. Datorită temperaturii scăzute a electromagnetului (4,2 K), acesta este acoperit cu un ecran din cupru conectat la treapta I a criorăcitorului. Pentru acesta a fost evaluat fluxul termic radiativ, valoarea obținută fiind de 7,65 W. Au fost proiectați conductori HTS de alimentare capabili să suporte curenți de alimentare mari (300 A), puterea termică conductivă a unui astfel de conductor fiind evaluată la 87,01 mW. A fost realizat un model 3D al ansamblului alcătuit dintr criorostat, ecran termic, electromagnet HTS, conductorii de cupru și conductori HTS, pentru evaluarea sarcinii termice totale, fiind obținută o putere termică (radiativă și conductivă) de 315,52 mW pentru electromagnet și o putere termică totală (conductivă, radiativă și Joule) de 35,571 W pentru ansamblu ecran – conductori din cupru.

În capitolul 4 este prezentată realizarea electromagnetului supraconductor. A fost realizat un studiu experimental asupra posibilității joncționării sectoarelor de bandă supraconductoare, rezistența obținută utilizând aliajul de lipire In 97 % Ag 3 % pentru aceste joncțiuni fiind de $\sim 15,3 \text{ n}\Omega$, corespunzătoare unei puteri totale de 2,61 mW pentru un curent de alimentare de

295 A. De asemenea au fost realizate teste criogenice pentru electromagnetul realizat, temperatura bobinelor fiind cuprinsă în intervalul 24 K și 42 K. Ținând cont de faptul că temperatura critică a benzii supraconductoare utilizată este de 92 K, electromagnetul realizat poate funcționa pentru perioade mari de timp.

În urma măsurătorilor magnetice pentru acest electromagnet a fost obținută o valoare a câmpului magnetic în centrul acestuia de 5,05 T, corespunzătoare unui curent de 295 A. În urma măsurătorilor magnetice realizate de-a lungul axei ($\Delta z = \pm 10$ mm), eroarea de liniaritate obținută este de 0,112 %, această valoare fiind sub pragul impus de aplicația pentru care a fost proiectat acest electromagnet ($\leq 0,25$ %). Pentru distanța $\Delta z = \pm 15$ mm, a fost constatată o asimetrie a câmpului magnetic de 7,1 mT, o posibilă cauză a acestei asimetrii fiind erori apărută în procesul de execuție mecanică a elementelor constructive ale electromagnetului.

C.2. Contribuții originale

Lucrarea de doctorat intitulată „*Metode criolectrotehnice pentru câmpuri magnetice intense*” prezintă un model de proiectare și realizare a unui generator de câmp magnetic intens și uniform realizat cu materiale supraconductoare de înaltă temperatură.

Contribuțiile originale ale tezei sunt:

- o sinteză asupra parametrilor materialelor supraconductoare în vederea selectării tipurilor de materiale utilizabile în funcție de natura aplicației în care acestea urmează a fi utilizate;
- proiectarea și realizarea unui electromagnet supraconductor de tip HTS în configurație Helmholtz ce poate funcționa perioade de timp ce pot ajunge până la zeci de mii de ore, fără necesitatea realimentării cu agenți criogenici sau a oricărui tip de mentenanță;
- studiul experimental al lor joncțiunilor benzilor supraconductoare, în vederea determinării aliajului de lipire și ale condițiilor optime de realizare, pentru care rezistența electrică a acestora este minimă, în scopul limitării puterii Joule disipate;
- proiectarea și realizarea unor conductori de alimentare (Cu - HTS) pentru electromagnetul supraconductor, pentru minimizarea fluxurilor termice conductive și a pierderilor Joule.
- realizarea unui model pentru calculul câmpului magnetic generat de electromagnetul supraconductor pe care l-am validat prin modelări numerice;
- un model numeric termic al întregului ansamblu criostat – electromagnet;
- un model numeric pentru proiectarea și testarea conductorilor de tip HTS necesari pentru reducerea fluxului termic de conducție către electromagnetul supraconductor;
- proiectarea, realizarea și testarea unui sistem criogenic de răcire pentru asigurarea regimului termic de funcționare a electromagnetului supraconductor.

C.3. Perspective de dezvoltare

Noile materiale HTS având performanțe ridicate din punct de vedere electric și magnetic, sunt din ce în ce mai intens utilizate pentru realizarea de electromagneți supraconductori generatori de câmpuri magnetice intense, utilizați în aplicații din fizica experimentală (acceleratoare de particule) sau din medicină (imagistică medicală) sau transporturi de mare viteză (trenuri maglev).

În perspectivă, fenomene conexe care pot apare în funcționarea bobinajelor supraconductoare vor fi abordate și studiate experimental: influența magnetizării materialului și a curenților de ecranare, asupra câmpului magnetic generat.

6. BIBLIOGRAFIE

-
- [1] Seok Ju Lee, Minwon Park, In-Keun Yu, Youngjin Won, Yangho Kwak și Chulhyu Lee, „Recent Status and Progress on HTS Cables for AC and DC Power Transmission in Korea,” *APPLIED SUPERCONDUCTIVITY*, vol. 28, nr. doi: 10.1109/TASC.2018.2820721, 2018.
- [2] S.W. Schwenterly, B.W. McConnell, J.A. Demko, A. Fadnek, J. Hsu, F.A. List, M.S. Walker, D.W. Hazelton, F.S. Murray, J.A. Rice, C.M. Trautwein, X. Shi, R.A. Farrell, J. Bascuiian, R.E. Hintz, S.P. Mehta, N. Aversa, J.A. Ebert, B.A. Bednar, D.J. Neder, A.A. McIlheran, P.C. Michel, J.J. Nemeč, E.F. Pleva, R.C. Longsworth, R.C. Johnson, R.H. Jones, J.K. Nelson, R.C. Degeneff și S.J. Salon , „Performance of a 1-MVA HTS Demonstration Transformer,” *IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY*, VOL. 9, NO. 2, JUNE 1999, nr. doi: 1051-8223/99\$10.00.
- [3] Jianxun Jin și Xiaoyuan Chen, „Development of HTS Transformers,” *2008 IEEE International Conference on Industrial Technology, Chengdu, 2008*, pp. 1-6, , nr. doi: 10.1109/ICIT.2008.4608455..
- [4] Joachim Bock, Achim Hobl, Simon Krämer și Mark O Rikel, „HTS Fault Current Limiters—First Commercial Devices for Distribution Level,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity · July 2011*, nr. DOI: 10.1109/TASC.2010.2099636.
- [5] S.S. Kalsi, D. Aized, B. Connor, G. Snitchler, J. Campbell, R.E. Schwall, J. Kellers, Th. Stephanblome și A. Tromm, „HTS SMES Magnet Design and Test Results,” *IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY*, VOL. 7, NO. 2, JUNE 1997, nr. doi: 10.1109/77.614667.
- [6] Shinji Matsumoto, Tsukasa Kiyoshi, Gen Nishijima, Kenjiro Hashi, Masato Takahashi, Takashi Noguchi, Shinobu Ohki, Hideaki Maeda și Tadashi Shimizu, „Equipment for Power Outage in Operation of Driven-Mode NMR Magnet,” *IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY*, VOL. 26, NO. 4, JUNE 2016, nr. vol. 26, no. 4, pp. 1-4, June 2016, Art no. 4301004, doi: 10.1109/TASC.2016.2519515..
- [7] M. I. Faley, U. Poppe, R. E. Dunin-Borkowski, M. Schiek, F. Boers, H. Chocholacs, J. Dammers, E. Eich, N. J. Shah, A. B. Ermakov, V. Y. Slobodchikov, Y. V. Maslennikov și V. P. Koshelets, „superconducting magnetoencephalography,” *IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY*, VOL. 23, NO. 3, JUNE 2013, nr. doi: 10.1109/TASC.2012.2229094.
- [8] Kazuo Sawada, „Outlook of the Superconducting Maglev,” *in Proceedings of the IEEE*, vol. 97, no. 11, pp. 1881-1885, Nov. 2009, , nr. doi: 10.1109/JPROC.2009.2030246..
- [9] CERN, „CERN Accelerating science,” [Interactiv]. Available: <https://home.cern/science/engineering/restarting-lhc-why-13-tev>. [Accesat 04 2024].
- [10] H. Seungyong, K. Kwanglok, K. Kwangmin, H. Xinbo, P. Thomas, D. Iain, K. Seokho, R. B. Kabindra, N. So, J. Jan și C. L. David , „45.5-tesla direct-current magnetic field generated with a high-temperature superconducting magnet,” *LETTER*, nr. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1293-1>.
- [11] P. Schmuser, Superconductivity, Institut fur Experimentalphysik der Universitat Hamburg: <https://www.desy.de/~pschmues/Superconductivity.pdf>.
- [12] P. H. Rudolf , „The Path to Type-II Superconductivity,” *MDPI metals*, nr. 682, p. 9, 2019.
- [13] A. M. Forrest, "Meissner and Ochsenfeld revisited," *European Journal of Physics, Volume 4, Number 2*, vol. 4, no. 2, pp. 1-5, 1983.
- [14] D. Guillaume, Etude expérimentale et numérique des courants d'e' crantage dans les aimants supraconducteurs a' haute tempe' rature critique REBCO, Grenoble, France: Université Grenoble Alpes (ComUE), 11.10.2017.
- [15] C. Poole, H. Farach și R. Creswick, Handbook of Superconductivity, eBook ISBN: 9780080533216: Academic Press, 15th October 2000.

- [16] Y. Iwasa, *Case Studies in Superconducting Magnets: Design and Operational Issues*, Springer Science + Business Media, LLC 2009: DOI: 10.1007/b112047_1.
- [17] Voicu Dolocan, „SUPRACONDUCTIBILITATEA PRINCIPIILE FIZICE ȘI APLICAȚII,” *EDITURA UNIVERSITĂȚII DIN BUCUREȘTI*, nr. ISBN-973-575-069, 1997.
- [18] A.G. Shepelev, „The Discovery of Type II Superconductors (Shubnikov Phase),” *Superconductor*, 2010, doi: 10.5772/10117.
- [19] Teruo Matsushita, *Flux Pinning in Superconductors*, Library of Congress Control Number: 2006933137, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2007.
- [20] T. Boutboul, S. Le Naour, D. Leroy, L. Oberli and V. Previtali, "Critical Current Density in Superconducting Nb-Ti Strands in the 100 mT to 11 T Applied Field Range," *19th International Conference on Magnet Technology (MT19)*, 18-23.09.2005, Genova, Italy, <https://cds.cern.ch/record/970378/files/lhc-project-report-885.pdf>.
- [21] The Slovenian Academy of Sciences and Arts (SASA), „SLOVENSKA AKADEMIJA ZNANOSTI IN UMETNOSTI,” [Interactiv]. Available: <https://www.sazu.si/en/members/karl-alexander-muller>.
- [22] L. Cooley and I. Pong, "Cost drivers for very high energy p-p collider magnet conductors," Fermilab, FCC 2016, <https://slideplayer.com/slide/11550286/>, Rome, Italy.
- [23] P. M. Grant și T. P. S. Epri, „Cost Projections for High Temperature Superconductors,” Applied Superconductivity Conference, Palo Alto and Palm Desert, California, September 1998.
- [24] "Superconducting Power Cable," *Cryogenic & Vacuum Engineering (CVE)*, [Online]. Available: <https://www.cve.co.kr/en/project/m1513/>. [Accessed 2021].
- [25] W. Goldacker, F. Grilli, E. Pardo, A. Kario, Schlachter, S. I. Schlachter și M. Vojenčiak, „Roebel cables from REBCO coated conductors: a one-century-old concept for the superconductivity of the future,” *Superconductor Science and Technology*, vol. 27, nr. 9, 2014.
- [26] Dr Nick Long, „Roebel cable industrial optimization - General Cable Superconductors,” 2014. [Interactiv]. Available: https://indico.cern.ch/event/308828/contributions/1680710/attachments/589811/811815/WA_MHTS-1_presentation_GCS_May_2014-N.Long.pdf.
- [27] J. KLARKE, „Low-Frequency Applications OF Superconducting Quantum Interference Devices,” Vol. %1 din %2PROCEEDINGS OF THE IEEE, VOL. 61, NO. 1, 1973.
- [28] D. E. G. D. A. D. Dobrin Ion, *Aplicatii ale supraconductibilitatii in ingineria electrica*, ed. Electra, Bucuresti, 2020, ISBN 978-606-507-129-2.
- [29] M. P. Edward, "BERKLEY PHYSICS COURSE," in *Magnetism and Electricity*, 1982.
- [30] D. Bruce Montgomery, *Solenoid Magnet Design*, New: Robert Krieger Publishing, 1980.
- [31] George DUMITRU, Ion DOBRIN și Dan ENACHE, „PROIECTAREA UNUI ELECTROMAGNET SUPRACONDUCTOR HTS GENERATOR DE CÂMP MAGNETIC INTENS ȘI UNIFORM,” *APME*, Vol. %1 din %218, 1, pp. 125-135, 2022, nr. ISSN / ISSN-L: 1843-5912.
- [32] „Theva,” [Interactiv]. Available: https://www.theva.de/wp-content/uploads/2021/05/210412_Flyer_Supraleiter_A5_THEVA_small.pdf. [Accesat 2021].
- [33] „FURUKAWA ELECTRIC GROUP,” [Interactiv]. Available: <https://www.furukawa.co.uk/products/super-conductor/>. [Accesat 2024].
- [34] „Amsc,” Available: <https://www.amsc.com/gridtec/amperium-hts-wire/>. [Accesat 2021].
- [35] „FARADAY FACTORY,” Available: <https://www.faradaygroup.com/en/>. [Accesat 2024].
- [36] SuperPower, „Superpower Inc.,” [Interactiv]. Available: <https://www.superpower-inc.com/specification.aspx>. [Accesat 2021].

- [37] A. W. Zimmermann și S. M. Sharkh, „Design of a 1 MJ/100 kW high temperature superconducting magnet for energy storage,” *Faculty of Engineering and Physical Sciences, University of Southampton, Highfield Campus, Southampton, SO17 1BJ, UK*, 22 March 2020.
- [38] R. Raderburgh, Refrigeration of superconductors, National Institute of Standards and Technology, CO 80305 USA, PROCEEDINGS OF THE IEEE, VOL. 92, NO. 10, 2004.
- [39] A. Ishiyama, M. Yanai, T. Morisaki, H. Ueda, S. Akita, S. Kouso, Y. Tatsuta, H. Abe și K. Tasaki, „Transient Thermal Characteristics of Cryocooler-Cooled HTS Coil for SMES,” *IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 15, NO. 2, JUNE 2005*, nr. doi: 10.1109/TASC.2005.849321.
- [40] K. Watazawa, J. Sakuraba, F. Hata, T. Hasebe, C. K. Chong și Y. Yamada, „A Cryocooler Cooled 6T NbTi Superconducting Magnet with Room Temperature Bore of 220 mm,” *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 32, NO. 4, JUL. 1996*, nr. doi: 10.1109/20.511404.
- [41] W. E. Jack, EXPERIMENTAL TECHNIQUE FOR LOW TEMPERATURE MEASUREMENTS, National Institute of Standards and Technology, Boulder, CO, USA: Oxford University Press 2006, ISBN 0-19-857054-6 978-0-19-857054-7, 2006.
- [42] A. M. Morega, Principles of Heat Transfer, chapter VII in Mechanical Engineer’s Handbook, Bucharest: Ed. Marghitu D.B., Academic Press, 2001, p. 446-557.
- [43] FRANK P. INCROPERA, DAVID P. DEWITT, THEODORE L. BERGMAN și ADRIENNE S. LAVINE, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 6th ed. ISBN 13 978-0-471-45728-2.
- [44] RAY RADEBAUGH, Refrigeration for Superconductors, Cryogenic Technologies Group, National Institute of Standards and Technology, Boulder, CO 80305 USA: PROCEEDINGS OF THE IEEE, VOL. 92, NO. 10, OCTOBER 2004, April 21, 2004.
- [45] Michael A. Green, Magnet and Absorber Heat Loads Cooling with Various Small Coolers, University of Oxford Department of Physics Oxford OX1 3RH, UK, 18.06.2004.
- [46] George Dumitru, Alexandru Morega, Ion Dobrin, Dan Enache și Adrian Nedelcu, Analysis of the thermal and electrical parameters of the supply system of an HTS superconducting electromagnet, Iasi: 2022 International Conference and Exposition on Electrical And Power Engineering (EPE) | 978-1-6654-8994-2/22/\$31.00 ©2022 IEEE | DOI: 10.1109/EPE56121.2022.9959852 , 2022.
- [47] George Dumitru, Alexandru-Mihail Morega, Ion Dobrin, Dan Enache și Constantin Dumitru, „THE DESIGN OF THE POWER SUPPLY CURRENT LEADS TO A HIGH-TEMPERATURE SUPERCONDUCTING ELECTROMAGNET,” *Rev. Roum. Sci. Techn.–Électrotechn. et Énerg.* Vol. 68, 4, pp. 431–435, Bucarest, 2023, DOI: 10.59277/RRST-EE.2023.68.4.18.
- [48] M. T. LTD, „<https://www.magnetictech.com/products/>,” [Interactiv].
- [49] GEORGE DUMITRU, ALEXANDRU-MIHAIL MOREGA, ION DOBRIN, DAN ENACHE și CONSTANTIN DUMITRU, „THE DESIGN OF THE POWER SUPPLY CURRENT LEADS TO A HIGH-TEMPERATURE SUPERCONDUCTING ELECTROMAGNET,” *Rev. Roum. Sci. Techn.–Électrotechn. et Énerg.*, vol. 68, nr. Vol. 68, 4, pp. 431–435, Bucarest, 2023, DOI: 10.59277/RRST-EE.2023.68.4.18.
- [50] <http://www.americanmagnetics.com/power.php>.
- [51] <https://www.tek.com/en/products/keithley/low-level-sensitive-and-specialty-instruments/nanovoltmeter-model-2182a>.
- [52] Dan ENACHE, George DUMITRU, Ion DOBRIN și Mihai GUȚU, „A Measuring System for HTS Wires and Coils Properties at Low Temperatures,” *Electrotehnica, Electronica, Automatica (EEA)*, Vol. %1 din %2 vol. 71 (2023), nr. 3, pp. 03-11, nr. <https://doi.org/10.46904/eea.23.71.3.1108001>.
- [53] L. S. Cryotronics, „<https://www.lakeshore.com/products/categories/specification/temperature-products/cryogenic-temperature-sensors/dt-670-silicon-diodes/>,” [Interactiv].