

## PROIECTAREA UNUI ELECTROMAGNET SUPRACONDUCTOR HTS GENERATOR DE CÂMP MAGNETIC INTENS ȘI UNIFORM

George DUMITRU<sup>1</sup>, Ion DOBRIN<sup>1</sup>, Dan ENACHE<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institutul național de Cercetare-Dezvoltare pentru Inginerie Electrică ICPE-CA  
george.dumitru@icpe-ca.ro; ion.dobrin@icpe-ca.ro; dan.enache@icpe-ca.ro

**Rezumat.** În cadrul lucrării sunt prezentate elementele importante pentru proiectarea unui electromagnet supraconductor HTS, generator al unui câmp magnetic intens (5T) și de uniformitate ridicată (<1 %). Pentru stabilirea parametrilor geometrici și funcționali ai acestuia, s-au luat în considerație valoarea inducției câmpului magnetic generat și uniformitatea în zona centrală a acestuia. Modelările numerice ale câmpului magnetic generat, au fost relizate în Comsol Multiphysics. Au fost luate în calcul inclusiv caracteristicile materialului supraconductor HTS de tip YBCO. Bobinele vor fi realizate sub forma de galeți dubli din bandă supraconductoare, configurația aleasă fiind de tip Helmholtz. În acest fel, zona de câmp magnetic, centrală, a electromagnetului, este accesibilă pentru aplicații din două direcții: verticală și orizontală.

### 1. INTRODUCERE

Utilizarea materialelor supraconductoare pentru realizarea electromagneților a făcut posibilă obținerea de câmpuri magnetice intense și foarte intense ( $\sim 10^2$  T), valori ce nu pot fi obținute utilizând materiale conductoare convenționale. Aplicațiile dezvoltate utilizând aceste materiale supraconductoare sunt vaste, de la medicină, transporturi, industria energetică, fizica nucleară, etc. Utilizarea materialelor supraconductoare pentru generarea de câmpuri magnetice intense a făcut posibilă realizarea acceleratoarelor de particule de energii înalte ( $\sim$ TeV), făcând astfel posibilă dezvoltarea de noi aplicații în fizica nucleară și descoperirea de noi cunoștințe. Electromagneții supraconductori realizați cu materiale LTS (Low Temperature Superconductors), cum sunt NbTi și Nb<sub>3</sub>Sn, lucrează la temperatura heliului lichid (4,2K). Noile materiale supraconductoare HTS (High Temperature Superconductors) pot lucra și la temperatura azotului lichid (77 K). Din acest motiv, există un interes mult mai mare în acest moment, pentru realizarea și exploatarea de electromagneți supraconductori HTS. Interesul provine din avantajele evidente: costuri de exploatare mult mai mici, performanțe superioare obținute și electromagneți mai compacți. În procesul de proiectare a acestor electromagneți supraconductori se ține seama de unele constrângeri impuse atât de performanțele dorite, dar și de caracteristicile funcționale ale materialelor supraconductoare (parametrii critici ai materialului și limitările geometrice ale electromagnetului). Astfel, temperatura de lucru va fi asigurată cu un mediu criogenic corespunzător care asigură atât valoarea temperaturii criogenice cât și stabilitatea acesteia în timpul exploatării iar alimentarea electrică a acestora va fi realizată cu surse speciale de c.c., care pot asigura curenți relativ intenși și foarte intenși ( $\sim 10^2$ - $10^3$  A). Obținerea parametrilor electrici și magnetici ai electromagnetului se vor putea calcula convențional, utilizând ecuațiile electromagnetismului, dar se vor aplica limitările impuse de parametrii critici ai materialului HTS utilizat. În cele ce urmează va fi prezentat un algoritm de calcul al câmpului magnetic generat de un sistem de bobine Helmholtz realizate din material HTS.

### 2. MATERIALE SUPRACONDUCTOARE DE TEMPERATURĂ RIDICATĂ

Materialele supraconductoare de tip HTS care pot fi utilizate în diverse aplicații din ingineria electrică, s-au dovedit a fi (până în acest moment), materialele de tip BSCCO și YBCO, simbolizate astfel după componența materialelor din structura lor. Acestea au fost realizate industrial sub formă de fire și benzi cu lungimi de ordinul km, ceea ce permite utilizarea lor la realizarea de bobine și electromagneți.

- Principalii producători de materiale supraconductoare de înaltă temperatură (HTS) sunt:
- SuperPower (Furukawa), SUA;
- AMSC.- American Superconductor, SUA;
- Theva Dünnschichttechnik GmbH, Germania.

Materialele supraconductoare de temperatură ridicată, produse de companiile enumerate mai sus sunt realizate sub formă de bandă, în figura 1 fiind prezentată structura benzilor supraconductoare comercializate de companiile Theva [1], AMSC [2] și SuperPower [3].

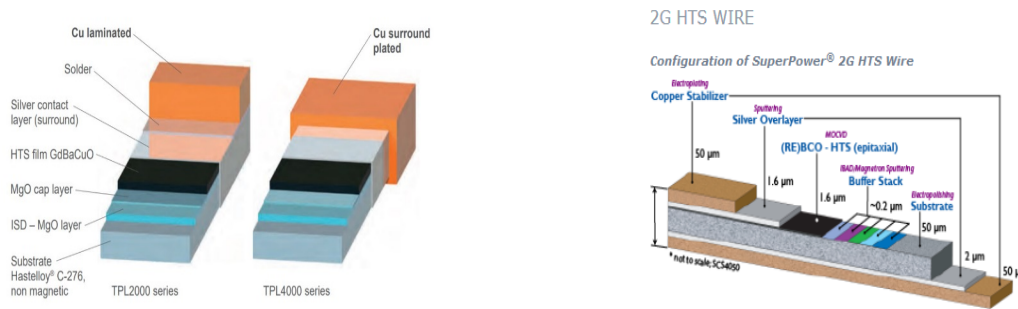


Fig. 1 – Structura benzii HTS [2, 3]

Principalele caracteristici și performanțe ale materialelor supraconductoare de înaltă temperatură HTS produse de companiile THEVA, AMSC și SuperPower sunt prezentate în Tabelele 1, 2 și 3.

Tabelul 1

Caracteristici bandă supraconductoare Theva Pro-Line [1]

Grosime substrat ( $\mu\text{m}$ )	50/100
Lățime (mm)	4; 6; 12;
Lungime (m)	300
Curent critic (A) pentru $T=(77\text{ K})$	360
Grosime totală ( $\mu\text{m}$ )	210

Tabelul 2

Caracteristici bandă supraconductoare AMSC [2]

Grosime substrat ( $\mu\text{m}$ )	170 - 220
Lățime (mm)	4;8; 12
Curent critic (A) pentru $T=(77\text{ K})$	300
Grosime strat Cu ( $\mu\text{m}$ )	200
Diametru minim de indoire (mm)	100

Tabelul 3

Caracteristici bandă supraconductoare SuperPower[3]

Grosime totală ( $\mu\text{m}$ )	100
Lățime (mm)	2; 4; 6; 12
Curent critic (A) pentru $T=(77\text{ K})$	330
Grosime strat Cu ( $\mu\text{m}$ )	2 x 20
Diametru minim de îndoire (mm)	11
Curent critic (A) pentru $T=(20\text{ K})$	600

Pentru proiectarea electromagnetului supraconductor a fost aleasă banda supraconductoare cu lățimea de 12 mm produsă de compania SuperPower, aceasta având grosimea de 100  $\mu\text{m}$ , și curentul critic  $I_c$  de 600 A pentru temperatura de 20 K. În Fig. 2 este prezentată variația curentului critic al benzii în funcție de câmpul magnetic perpendicular pe aceasta, temperatura benzii fiind menținută la temperatura de 22 K [4].

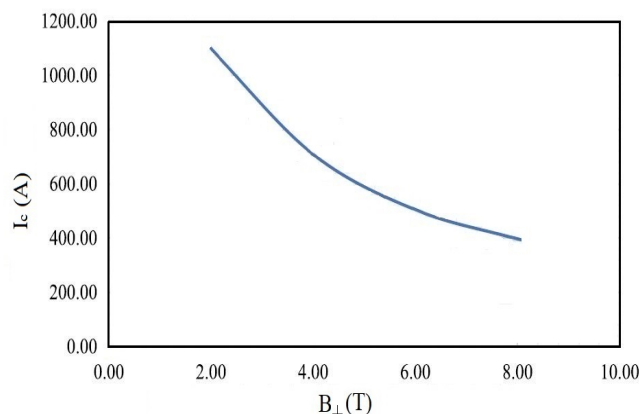


Fig. 2 – Curentul critic în funcție de câmpul magnetic perpendicular pe bandă [4]

### 3. DETERMINAREA CÂMPULUI MAGNETIC GENERAT DE ANSAMBLUL DE BOBINE HELMHOLTZ

Proiectarea electromagnetului supraconductor va fi realizată urmărind obținerea parametrilor impuși de aplicație, aceștia fiind prezentați în tabelul 4.

Tabelul 4

Parametrii impuși pentru electromagnet

Diametrul interior al electromagnetului (mm)	70
Diametrul exterior al electromagnetului (mm)	200
Modulul inducției maxime a câmpului magnetic (T)	5
Uniformitatea câmpului magnetic pentru $z=\pm 10\text{mm}$ (%)	$\leq 0,25$

În urma analizei parametrilor materialelor HTS existente comercial, a fost aleasă banda supraconductoare având lățimea de 12 mm produsă de compania SuperPower pentru proiectarea acestui electromagnet, datorită grosimii reduse a acesteia și a valorii ridicate a curentului critic ( $I_c$ ) suportat când temperatura benzii este de 20 K. Determinarea parametrilor constructivi ai electromagnetului se va face având în vedere atât parametrii impuși de aplicație, cât și parametrii materialului supraconductor ce va fi utilizat pentru această aplicație. Datele inițiale utilizate pentru proiectarea acestui electromagnet sunt prezentate în Tabelul 5:

Tabelul 5

Date inițiale

grosime spira (mm)	0,1
diametru exterior (mm)	200
diametru interior (mm)	70
raza interioară $r_i$ (mm)	35
raza exterioară $r_e$ (mm)	100
câmp magnetic generat (T)	5

Pentru a obține un câmp magnetic uniform într-o regiune bine determinată, a fost aleasă configurația Helmholtz pentru acest electromagnet. Luând în considerare faptul că sensul curentului ce străbate bobinele unui electromagnet Helmholtz este același pentru ambele bobine, și densitatea de curent trebuie să fie de asemenea constantă, cele două bobine ale ansamblului vor fi înseriate. Datorită geometriei specifice a materialului supraconductor ales, acesta fiind sub formă de bandă, și a faptului că raza de curbură minimă a benzii supraconductoare este mare ( $\sim\text{cm}$ ), bobinele ansamblului Helmholtz vor fi realizate în formă de galeți. În această configurație, înserierea celor doi galeți realizați din bandă supraconductoare este destul de dificilă, necesitând elemente suplimentare de circuit. Pentru a

evita această problemă, a fost aleasă configurația de tipul galet dublu pentru realizarea ansamblului Helmholtz, această configurație constând în faptul că sunt realizate două bobine identice de tip galet, acestea fiind poziționate coaxial, lipite între ele, înserierea celor două perechi de galetii dubli fiind mult mai ușor de realizat. Un alt avantaj important al acestei configurații îl reprezintă reducerea considerabilă a diametrului exterior al acestui ansamblu de tip galet dublu comparativ cu galetul simplu pentru același număr de spire. În Fig. 3 este prezentată geometria rezultată a electromagnetului, ținând cont de diametrul interior și cel exterior necesare pentru construcția acestuia.

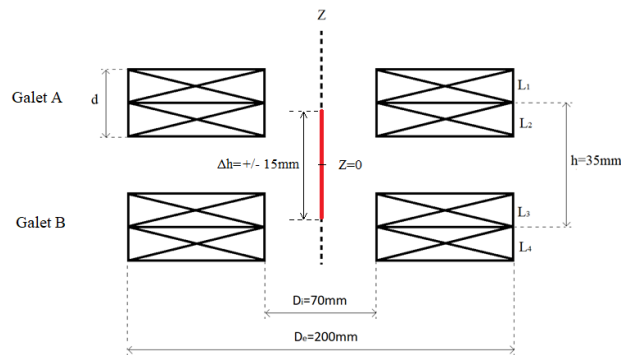


Fig. 3 – Ansamblul bobinelor Helmholtz

Banda supraconductoare ce urmează a fi utilizată pentru realizarea acestui electromagnet nu va fi acoperită cu materiale izolatoare (rășini sau lacuri), realizarea unei astfel de bobine neizolată permite obținerea unui factor de umplere ridicat ( $\lambda > 90$ ), și asigurând o răcire prin conducție ridicată. Parametrii geometrici calculați pentru acest electromagnet sunt prezentați în Tabelul 6.

Tabelul 6  
Parametrii geometrici

factorul de umplere $\lambda$	0,95
raza medie (mm)	67,5
număr spire galet	591
Număr spire galet dublu	1182
număr total spire	2364
lungime medie spiră (mm)	423,9
Lungime totală conductor (m)	1002,1

Intensitatea câmpului magnetic generat de cele două bobine, într-un punct oarecare situat pe axa z este dat de relația [5]:

$$H_z(0, z) = \frac{I r^2}{2} \left\{ \left[ r^2 + \left( z + \frac{h}{2} \right)^2 \right]^{-3/2} + \left[ r^2 + \left( z - \frac{h}{2} \right)^2 \right]^{-3/2} \right\}. \quad (1)$$

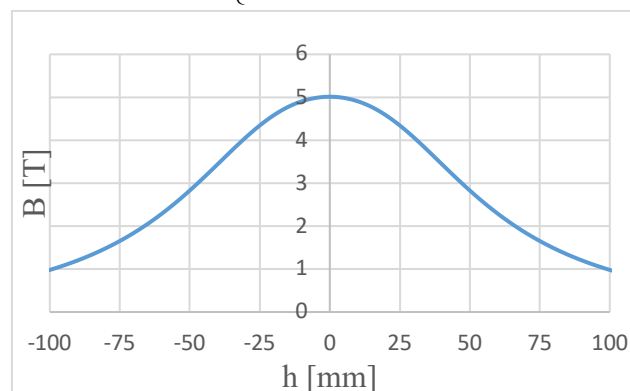


Fig. 4 – Câmpul magnetic pe direcția z pentru ansamblul Helmholtz, galet dublu, h=35 mm

Utilizând ecuația (1) pentru ansamblul Helmholtz și luând în considerare condiția  $h=r_i=35$  mm a fost obținută o valoare a curentului  $I=242$  A pentru un câmp  $B=5.0127$  T. Distribuția câmpului magnetic al ansamblului ales pe direcția  $z$ , ținând cont de parametrii geometrici ai acestuia este prezentată în Fig. 4.

Neuniformitatea câmpului magnetic pe direcția  $z$  pentru o distanță determinată se poate calcula utilizând relația [6]:

$$\text{Neuniformitate [\%]} = \frac{B_{\max} - B_{\min}}{B_{\max}} 100. \quad (2)$$

În Fig. 5 este prezentată uniformitatea câmpului magnetic pentru valori ale lui  $z$  cuprinse între 2,5 mm și 15 mm. Se poate observa că pentru ansamblul Helmholtz având distanța  $h=r_i$ , neuniformitatea câmpului magnetic pentru intervalul  $z = \pm 10$  mm față de centrul sistemului este de 2,1%, această valoare fiind mult mai mare decât valoarea impusă de 0,25%.

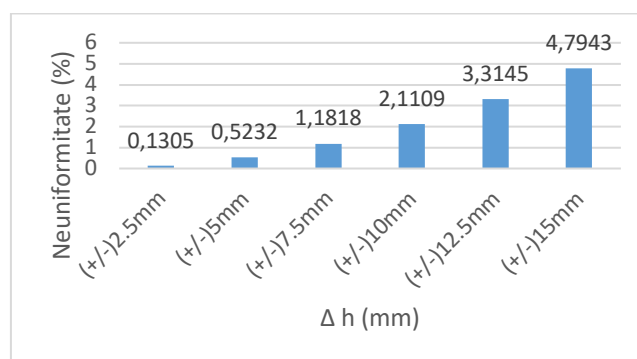


Fig. 5 – Neuniformitatea câmpului magnetic pentru  $h=35$  mm

Crescând distanța dintre galeți până la  $h=53$  mm, pentru un câmp magnetic  $B=5,012$  T a fost calculat un curent de alimentare  $I=280$  A, distribuția câmpului magnetic pentru această nouă configurație fiind prezentată în Fig. 6.

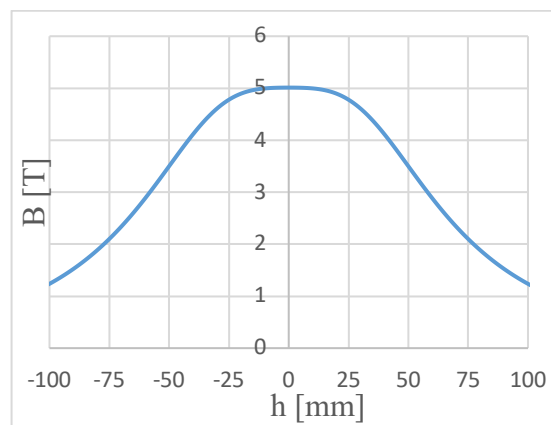


Fig. 6 – Variația câmpului magnetic pe direcția  $z$  pentru ansamblul Helmholtz în configurație galeț dublu, având  $h=53$  mm

Prin evaluarea neuniformității câmpului magnetic pentru această nouă configurație, prezentată în Fig. 7, se observă o creștere a distanței pentru care neuniformitatea câmpului magnetic se află în limitele impuse de aplicație, de la  $z=\pm 2,5$  mm pentru  $h=35$  mm la  $z=\pm 7,5$  mm, neuniformitatea câmpului magnetic pentru intervalul  $z=\pm 10$  mm față de centrul sistemului fiind de 0,311%, această valoare fiind mai mare decât valoarea impusă de aplicație (0,25 %).

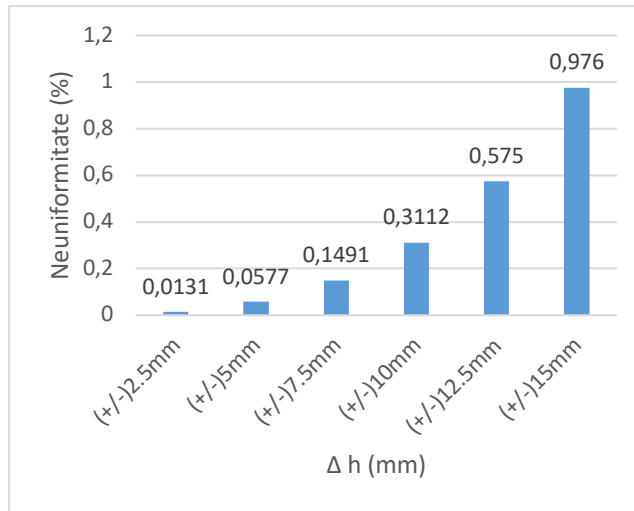


Fig.7. Neuniformitatea câmpului magnetic pentru  $h=53$  mm

Mărind distanța dintre galeți la  $h = 59$  mm, pentru un câmp magnetic  $B = 5,003$  T a fost calculat un curent de alimentare  $I = 295$  A, distribuția câmpului magnetic pentru această configurație este prezentată în Fig. 8.

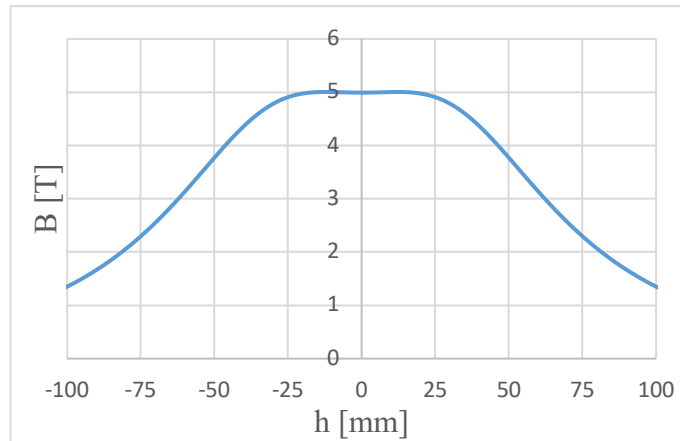


Fig.8. Variația câmpului magnetic pe direcția z pentru ansamblul Helmholtz în configurație galeț dublu, având  $h=59$  mm

Pentru acest ansamblu având distanța dintre bobine  $h=59$  mm, neuniformitatea câmpului magnetic este de 0,245% pentru intervalul  $z=\pm 15$ mm față de centrul sistemului, și 0,217% pentru intervalul  $z=\pm 10$  mm, distribuția neuniformității este prezentată în Fig. 9.

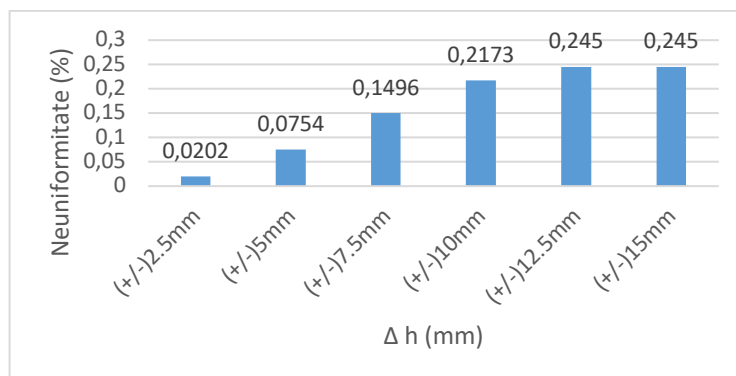


Fig. 9 – Neuniformitatea câmpului magnetic pentru  $h=59$  mm

Ca urmare a realizării calculelor analitice pentru ansamblul Helmholtz în configurație galet dublu, folosind material supraconductor sub formă de bandă cu lățimea de 12 mm, a fost pusă în evidență o variație a uniformității câmpului magnetic generat în funcție de distanța dintre galeți, aceasta fiind prezentată în Fig. 10.

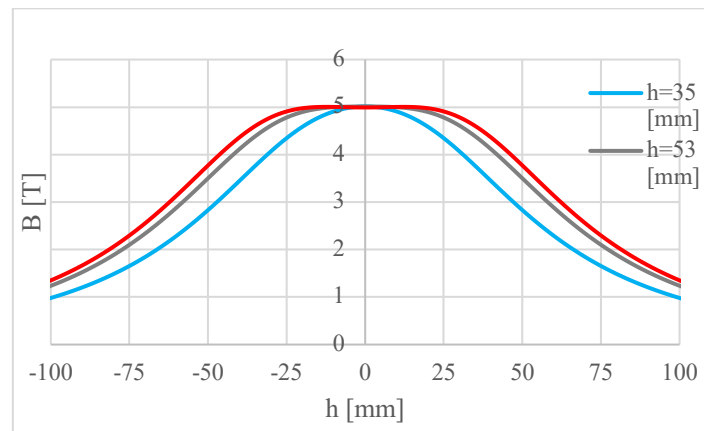


Fig. 10 – Variația câmpului magnetic pe direcția z pentru ansamblul Helmholtz în configurație galet dublu pentru diferite distanțe dintre galeți

#### 4. MODELAREA NUMERICĂ A ELECTROMAGNETULUI

##### 4.1. Modelul matematic

Problema de câmp magnetic este rezolvată pentru regimul staționar, definit de ecuația:

$$\nabla \times (\mu_0^{-1} \mu_r^{-1} B) - \sigma v \times B = J \quad (3)$$

unde  $J[A/m^2]$  este densitatea de curent și  $B [T]$  este inducția magnetică

*Legea fluxului magnetic:*

$$\text{div} B = 0 \Rightarrow B = \text{rot} A \quad (4)$$

unde  $A[T/m]$  este potențialul magnetic vector.

Modelul matematic este închis de condiția de izolație magnetică:

$$n \times A = 0 \quad (5)$$

unde  $n$  reprezintă vectorul normalei ce iese din plan.

A fost realizat un model numeric pentru a verifica rezultatele obținute prin calcul analitic ale ansamblului Helmholtz, Astfel, prin modelarea numerică cu programul COMSOL [7] realizată pentru acest ansamblu de bobine, având distanța  $h=35$  mm, a fost obținut în centrul ansamblului un câmp magnetic cu inducția  $B=4,978$  T pentru curentul de alimentare  $I=242$  A. În Fig. 11 este prezentată distribuția câmpului magnetic rezultată în urma modelării numerice pentru acest ansamblu în configurație galet dublu.

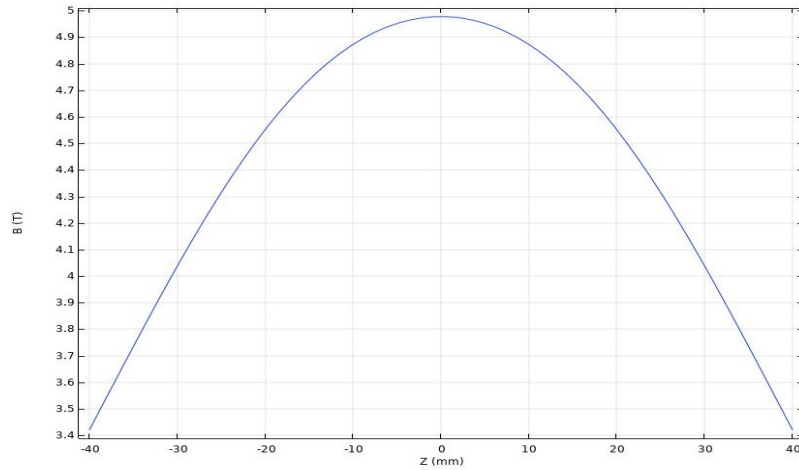


Fig. 11 – Variația câmpului magnetic pe direcția z pentru ansamblul Helmholtz în configurație galet dublu, având  $h=35$  mm

Rețeaua de discretizare pentru modelul analizat este prezentată în Fig. 12.

Valoarea modulului inducției câmpului magnetic obținut în urma modelării numerice realizate pentru acest ansamblu de bobine este în conformitate cu valoarea obținută prin calcul analitic, eroarea relativă obținută între calculul analitic și modelarea numerică pentru acest ansamblu de bobine este de 0,694%. În Fig. 13 este prezentat spectrul câmpului magnetic, rezultate în urma modelării numerice.

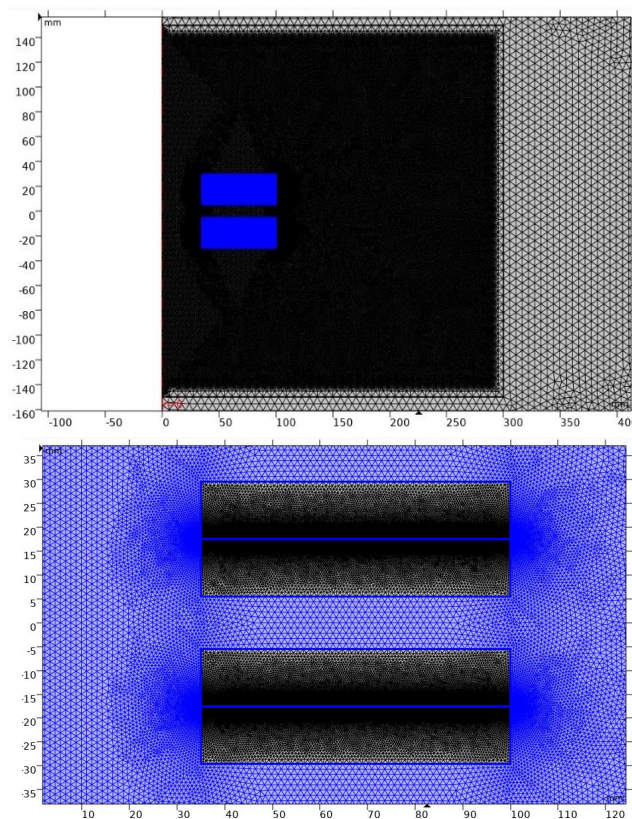


Fig. 12 – Rețeaua de discretizare pentru ansamblul Helmholtz în configurație galet dublu, având  $h = 35$  mm



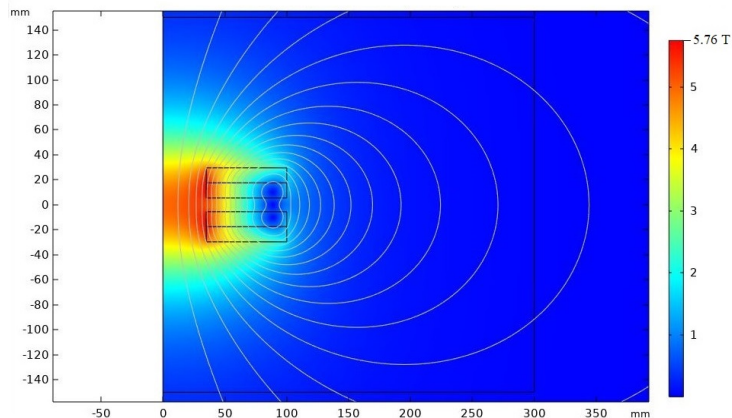


Fig. 13 – Inducția magnetică pentru ansamblul Helmholtz, galet dublu, având  $h=35$  mm

De asemenea a fost realizată modelarea numerică pentru acest ansamblu de bobine în configurație galet dublu având distanța dintre galetii  $h=53$  mm. În urma modelării numerice realizate pentru acest ansamblu de bobine având distanța  $h=53$  mm a fost obținut în centrul sistemului un câmp magnetic  $B=4,974$  T pentru curentul de alimentare  $I=280$  A. Eroarea relativă obținută între calculul analitic și modelarea numerică pentru acest ansamblu de bobine este de 0,758%. În Fig. 14 este prezentată distribuția câmpului magnetic rezultată în urma modelării numerice.

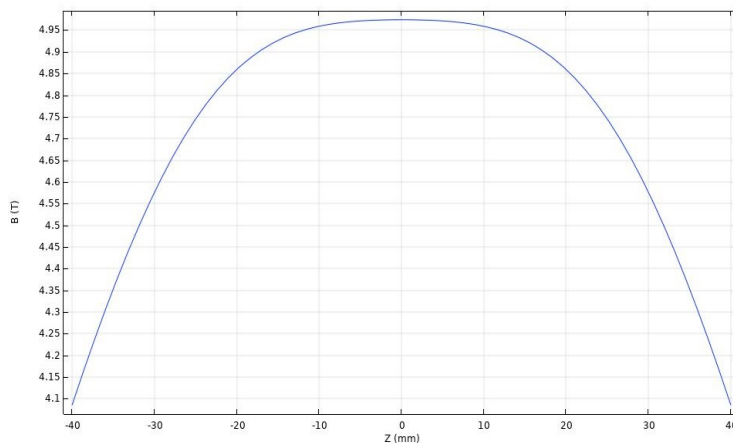


Fig. 14 – Variația câmpului magnetic pe direcția  $z$  pentru ansamblul Helmholtz în configurație galet dublu, având  $h=53$  mm

Modelarea numerică realizată pentru ansamblul de bobine având distanța  $h=59$  mm a pus în evidență un câmp magnetic  $B=4,965$  T pentru curentul de alimentare  $I=295$  A. Eroarea relativă obținută între calculul analitic și modelarea numerică pentru acest ansamblu de bobine este de 0,755%. În Fig. 15 este prezentată distribuția câmpului magnetic rezultată în urma modelării numerice.

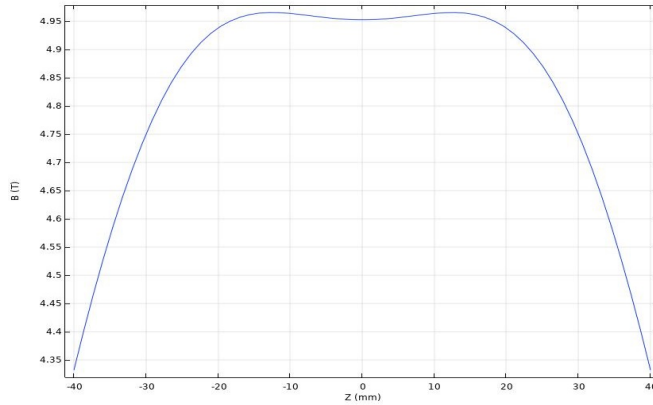


Fig. 15 – Variația câmpului magnetic pe direcția z pentru ansamblul Helmholtz în configurație galet dublu, având  $h=59\text{mm}$

A fost realizat un model 3D pentru ansamblul de bobine. În Fig. 16 și 17 sunt prezentate rețeaua de discretizare și spectrul inducției câmpului magnetic rezultat în urma modelării numerice pentru modelul 3D realizat.

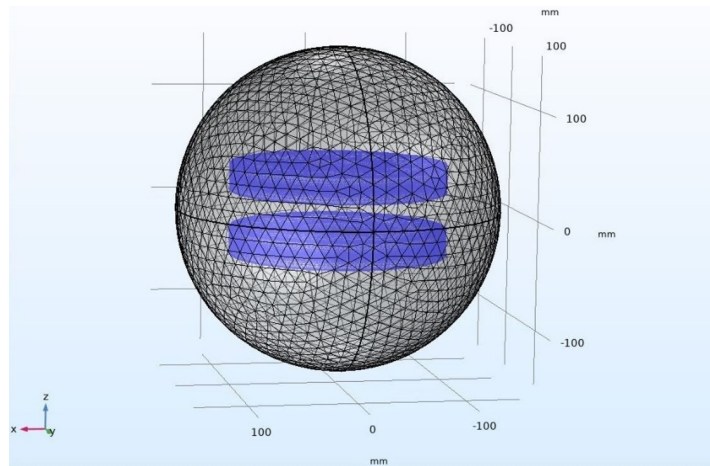


Fig. 16 – Rețeaua de discretizare pentru modelul 3D al ansamblului Helmholtz în configurație galet dublu, având  $h=59\text{mm}$

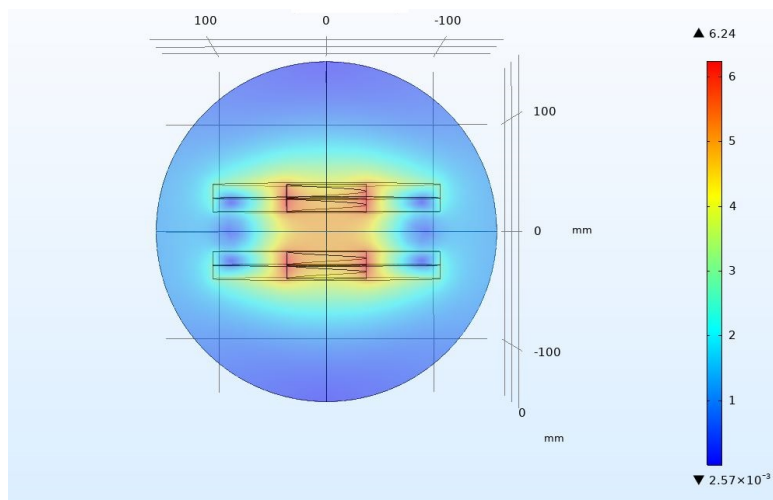


Fig. 17 – Spectrul inducției câmpului magnetic pentru ansamblul Helmholtz în configurație galet dublu, având  $h=59\text{mm}$

## 5. CONCLUZII

În cadrul acestei lucrări au fost analizate elementele importante care trebuie luate în considerație la proiectarea unui electromagnet supraconductor HTS. A fost ales ca model un sistem de bobine de tip Helmholtz, aceste bobine urmând a fi realizate din bandă supraconductoare HTS de tip YBCO, sub formă de galeți dubli. În algoritmul de proiectare s-a ținut seama de parametrii critici ai materialului HTS ales, și anume:  $I_c=600$  A;  $T_c=20$  K;  $B_c=8$  T; precum și de curbele de variație a lui  $I_c = f(T)$  și  $I_c = f(B_{\text{extern}})$ .

A fost calculată valoarea câmpului magnetic pentru diferite distanțe dintre bobinele ansamblului Helmholtz, în vederea identificării poziției optime, fiind evaluată și neuniformitatea câmpului generat de acesta. Astfel, pentru acest ansamblu de bobine, pentru o distanță  $h=35$  mm, a fost obținut în centrul ansamblului, un câmp magnetic cu inductia  $B = 4,978$  T pentru curentul de alimentare  $I = 242$  A.

Pentru intervalul  $z=\pm 10$  mm față de centrul sistemului cu distanța dintre bobine  $h=59$  mm, valoarea câmpului magnetic generat este de neuniformitatea este de 0,217%.

Au fost realizate modele numerice pentru ansamblul de bobine ales. Valorile obținute în modelele numerice fiind similare cu rezultatele analitice, eroarea relativă obținută între calculul analitic și modelarea numerică pentru acest ansamblu de bobine fiind  $< 1\%$ .

## CONFIRMĂRI

Autorii doresc să menționeze că rezultatele prezentate în această lucrare, au fost realizate în cadrul proiectelor PN 19310303 / 2019 și PF25/2021 finanțate de către Ministerul Cercetării, Inovării și Digitizării din România.

Lucrarea a fost prezentată la Simpozionul de Mașini Electrice SME'18, ediția 2022.

## BIBLIOGRAFIE

1. \*\*\*Theva, [https://www.theva.de/wp-content/uploads/2021/05/210412\\_Flyer\\_Supraleiter\\_A5\\_THEVA\\_small.pdf](https://www.theva.de/wp-content/uploads/2021/05/210412_Flyer_Supraleiter_A5_THEVA_small.pdf).
2. \*\*\*Amsc <https://www.amsc.com/gridtec/amporium-hts-wire/>.
3. \*\*\*Superpower Inc.,: <https://www.superpower-inc.com/specification.aspx>.
4. A.W. Zimmermann, 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, 2020.
5. Y. Iwasa, *Case studies in superconducting magnets: design and operational issues*, Springer Science + Business Media, LLC 2009.
6. D. C. V. F. *Design and construction of a 3D Helmholtz coil system for the ALBA magnetic measurements laboratory*, Barcelona, 2019.
7. \*\*\*<https://www.comsol.com/>.