

***Electromagnet supraconductor dipolar pentru
generarea de câmp magnetic intens și uniform - EMSD***

Finanțare: - bugetul de stat + cofinanțarea partenerului P3.

Valoare contract: 1.437.500 lei
Valoare Buget: 1.250.000 lei
Valoare alte surse: 187 500 lei

Contract: 55/2014

Cod proiect: PN-II-PT-PCCA-2013-4-0866

Rezumat

Echipele de cercetare

Rezultate preconizate

Rapoarte de activitate - stadiul și rezultatele obținute

Etapa I-2014

Etapa II - 2015

Etapa III - 2016

Rezumat

Progresele înregistrate în cunoașterea aprofundată a structurii materiei la nivelul particulelor subatomice și subnuclear, de exemplu punerea în evidență a unor particule prezise teoretic precum „bozonul Higgs”, nu se poate realiza decât cu ajutorul acceleratoarelor de particule care pot asigura energii ridicate particulelor accelerate. Pe de altă parte, obținerea de energii de accelerare din ce în ce mai mari pentru particulele încărcate electric în acceleratoarele moderne nu este posibilă fără utilizarea câmpurilor magnetice foarte intense. Acestea se pot obține doar prin utilizarea tehnologiei supraconductoare în realizarea electromagneților care intra în componența acceleratoarelor, iar utilizarea supraconductoarelor reclamează utilizarea asociată a tehnologiei temperaturilor joase, în speță a criogeniei.

Proiectul propune realizarea unui model experimental de electromagnet supraconductor dipolar care generează un câmp magnetic intens ($\sim 3\text{T}$) și extrem de uniform (10-3 abatere) într-o zonă extinsă și bine definită, așa numitul „canal cald” al electromagnetului, pe toată lungimea acestuia. Prin acest canal cald trece fluxul de particule încărcate electric și accelerate la energii mari ($\sim \text{GeV}$), pentru a fi deviat de la direcția inițială și menținut pe o traiectorie curbilinie. Aceasta deviere se realizează prin trecerea particulelor încărcate electric prin zone de câmp magnetic intens și uniform. Electromagneții dipolari sunt generatori de câmp magnetic uniform (câmp magnetic B staționar), și reprezintă ca tip de magnet, categoria cea mai importantă în cadrul unui accelerator de particule.

Câmpurile magnetice pot fi produse și de electromagneți clasici bobinați cu cupru și cu jug de fier însă aceștia sunt limitați la obținerea de valori de cel mult 2T datorită pe de o parte saturației jugului de fier la această valoare și pe de altă parte datorită pierderilor Joule mari care apar în înfășurările din cupru. Aceste pierderi Joule fac ca exploatarea pe termen lung a acestui tip de electromagnet să devină prohibitivă din punct de vedere al costurilor. Utilizarea supraconductibilității la realizarea electromagneților are mai multe avantaje: 1.

Eliminarea necesității utilizării fierului ca miez, care se saturează magnetic; 2. Obținerea de câmpuri magnetice intense ($>2T$); 3. Exploatare mult mai economică pe termen lung, prin eliminarea pierderilor Joule.

Acest tip de electromagnet supraconductor este destinat utilizării în acceleratoarele de particule moderne, de mare energie, fără de care nu poate fi conceput progresul fizicii actuale sau pentru diverse alte aplicații industriale. În cadrul temei, pentru dimensionarea electromagnetului, se vor utiliza ultimele realizări în domeniul software-ului destinat modelării numerice 3D (Comsol Multiphysics) a câmpului magnetic și a simulării funcționării electromagnetului. De asemenea se va utiliza ultima generație a tehnologiei pentru obținerea temperaturilor joase (Criorăcitoare) care elimină utilizarea agenților criogenici și se va folosi ultimul tip de materiale supraconductoare așa numiți supraconductori HTS (High Temperature Superconductors). Atingerea obiectivelor și a parametrilor propuși în cadrul proiectului prin finalizarea lui, va permite pe lângă atingerea de performanțe superioare, racordarea viitoare la proiectele internaționale de realizare de acceleratoare moderne, performante, de ultima generație precum cele în curs de realizare: FAIR de la Darmstadt – Germania, Nica – Rusia sau cel din cadrul proiectului internațional ELI (Extreme Light Infrastructure) de la București- Măgurele, România.

Coordonatorul din cadrul prezentului proiect este Institutul National de Cercetare – Dezvoltare pentru Inginerie Electrică ICPE-CA.

Partenerul P1 : Institutul National de Fizică și Inginerie Nucleară “Horia Hulubei”

Partenerul P2 este centrul ECCE al Universității Politehnica din București (UPB)

Partenerul P3, este SC Nuclear Inginy SRL, societate cu capital privat, cofinanțatorul proiectului.

Echipele de cercetare

CO – INC DIE ICPE-CA, București:

1. Dobrin Ion – Director proiect
2. Popovici Iuliu Romeo – cercetător senior
3. Lipcinski Daniel – cercetător
4. Stoica Victor - doctorand
5. Nedelcu Adrian – doctorand
6. Dan Daniel - doctorand
7. Zamfir Ștefania - subinginer
8. Miu Marius - tehnician
9. Militaru Adrian - tehnician
10. Velea Constantin – tehnician
11. Voicu Costel - tehnician

P1 – IFIN-HH, București - Măgurele:

1. Dan Gabriel Ghiță – responsabil partener
2. Gheorghe Căta-Danil - Cercetător senior
3. Nicolae Marius Mărginean - Cercetător senior
4. Tiberiu Bogdan Sava - Cercetător senior
5. Constantin Mihai - Cercetător senior

6. Nicoleta Mihaela Florea - Cercetător postdoctoral
7. Daniela Deleanu - Cercetător postdoctoral
8. Lucian Stroe - Cercetător postdoctoral
9. Sorin Pascu - Cercetător postdoctoral
10. Daniel Vasile Moșu - Cercetător postdoctoral
11. Corina Anca Simion - Cercetător postdoctoral
12. Iani Mitu - Cercetător doctorand
13. Oana Gâza - Cercetător doctorand
14. Sebastian Toma - Masterand
15. Gheorghe Naghel - Tehnician
16. Cristian Păun - Tehnician
17. Constantin Vladimir Crăciun - Tehnician
18. Ion Gheorghe - Tehnician

P2 - UPB, București:

1. Prof. dr. ing. Mihaela Morega - responsabil partener
2. Prof.Dr.Ing. Ileana Maria Baran - cercetător senior
3. S.l. dr. ing. Alina Machedon - cercetător
4. S.l. dr. ing. Ion Daniel Ilina - cercetător postdoctoral (Dr. din anul 2010)
5. S.l. dr. ing. Cristina Mihaela Gheorghe - cercetător postdoc (Dr. din anul 2012)
6. ing. Jean Bogdan Dumitru - asistent de cercetare, student doctorand
7. ing. Nicolae Tanase - asistent de cercetare, student doctorand
8. tehn. Ion Raducanu - tehnician
9. ing. Elena Florica - asistent cercetător
10. Stana Ioniță - muncitor
11. ec. Natalia Pavel - administrator financiar

P3 - Nuclear Inginery SRL

1. Ing. Cicerone Aprodu- Responsabil Partener
2. Leordeanu Adrian - fizician
3. Stan Nicolae - tehnician
4. Simion Niculina- tehnician
5. Baruta Ion - tehnician

Rezultate preconizate:

Obiectivul principal al proiectului consta in realizarea unui model experimental de magnet supraconductor dipolar pentru acceleratoare de particule de energie ridicata. Acesta va produce un câmp magnetic intens si uniform, in zona activa a magnetului in interiorul canalului cald (cu acces din exterior). Caracteristicile principale urmărite:

- > Realizarea bobinajelor din supraconductori HTS de tip YBCO, BSCCOsau MgB_2
- > Obținerea unui câmp magnetic intens (3T) si uniform (10^{-3} - 10^{-4}) ;
- > Răcire cu criorăcitor de tip Gifford-McMahon în două trepte (50K si 4,2K)
- > Temperatura de operare a magnetului: 20-30 K.
- > Acces in zona de câmp la temperatura de 300K

Obiectivele derivate ale proiectului:

- > stimularea activităților de cercetare;
- > dezvoltarea de produse originale, competitive; cu impact socio-economic major;
- > stimularea creșterii cheltuielilor sectorului privat în cercetare - dezvoltare, în vederea realizării unui nou produs inovativ transferabil către piață (se asigură de către **P3** o cofinanțare de 15 %);
- > dezvoltarea competențelor resursei umane (atât a celor din instituttele de cercetare cât și a celor de la agentul economic);
- > creșterea competitivității-vizibilității cercetării românești.

Rapoarte de activitate - stadiul și rezultatele obținute

Etapa I - 2014

Etapa II - 2015

Etapa III - 2016

ETAPA 1

RAPORTUL STIINTIFIC SI TEHNIC

DENUMIRE CONTRACT: Electromagnet supraconductor dipolar pentru generarea de câmp magnetic intens si uniform

ACRONIM: EMSD

FAZA DE EXECUTIE NR. 1/2014

CU TITLUL: Elaborare model conceptual de EMSD. Modelari numerice

☐ RST – raport stiintific si tehnic in extenso

CUPRINS

	pag.
A. OBIECTIVELE GENERALE ALE PROIECTULUI.....	3
B. OBIECTIVELE ETAPEI DE EXECUȚIE	3
C. REZUMATUL ETAPEI DE EXECUȚIE	3
D. DESCRIEREA ȘTIINȚIFICĂ ȘI TEHNICĂ.....	5
 CAPITOLUL 1 Introducere	 5
 CAPITOLUL 2. Elaborarea modelului conceptual de electromagnet supraconductor dipolar	5
2.1. Tema de proiectare.....	5
2.2. Modelul conceptual de electromagnet supraconductor dipolar	5
 CAPITOLUL 3. Modelare numerica	 7
3.1. Distribuția câmpului magnetic la electromagneți de tip dipol $\cos\theta$	7
3.2. Electromagneți dipolari fara jug de fier	9
3.3. Electromagnet dipolar cu bobine plane paralele	10
3.4. Electromagnet dipolar cu bobine plane normale.....	13
3.5. Concluzii la capitolul 3	16
 CAPITOLUL 4. Elaborare model conceptual de sistem de masura si mapare a campului magnetic	 16
 CAPITOLUL 5. Conceptia dispozitivului pentru realizarea bobinelor supraconductoare in constructie planara	 17
 CAPITOLUL 6. Concluzii generale	 18
 BIBLIOGRAFIA	 19

A. OBIECTIVELE GENERALE ALE PROIECTULUI

În cadrul proiectului se urmărește realizarea unui electromagnet supraconductor dipolar pentru generarea de câmp magnetic intens și uniform pentru acceleratoare de particule. Proiectul are drept obiective generale:

- realizarea și testarea unui electromagnet supraconductor cu bobinaj HTS, pentru generarea de câmp magnetic dipolar cu acces direct la zona de câmp magnetic, din exterior.
- Realizarea și testarea unui sistem de măsură a câmpului magnetic produs de electromagnet.
- Realizarea și testarea unui sistem de măsură a tensiunilor mecanice din bobinajul supraconductor
- Realizarea unui sistem de execuție a bobinelor supraconductoare HTS pentru electromagnetul supraconductor.

B.OBIECTIVELE ETAPEI DE EXECUTIE

Conform cu planul de realizare a proiectului, în prezenta etapă s-a realizat:

„Elaborare model conceptual de EMSD. Modelări numerice”.

Obiectivele principale ale etapei de execuție cu numărul 1/2014, sunt:

- 1. Elaborare model conceptual de EMSD. Modelări numerice. Stabilire parametri de lucru.**
- 2. Elaborare model conceptual de sistem de măsură și mapare 3D a câmpului magnetic.**
- 3. Modelare numerică a distribuției câmpului magnetic, a câmpului termic și a tensiunilor mecanice din bobinajul supraconductor prin COMSOL MULTIPHYSICS.**
- 4. Concepția și proiectarea sistemului de realizare a bobinelor supraconductoare dipolare planare.**

C. REZUMATUL ETAPEI DE EXECUTIE

În cadrul etapei au fost realizate:

- Elaborare model conceptual de EMSD. Realizare modelări numerice și optimizare model.
 - A fost elaborată tema tehnică în vederea elaborării modelului conceptual de EMSD. Principalele cerințe ale temei tehnice sunt:
 - magnetul supraconductor, trebuie să producă un câmp magnetic intens (2-3T) în centrul său, cu o uniformitate de $\sim 10^{-3}$;
 - un canal „cald” de acces pentru particulele accelerate;
 - diametrul canal interior acces: 20 mm;
 - dimensiuni zona utilă de câmp: cca cca 15 cm³;
 - racire fără agenți criogenici (utilizare criocooler) prin conducție termică.
 - utilizare materiale supraconductoare HTS;
 - A fost elaborat modelul conceptual de EMSD cu următoarea structură:
 - Electromagnetul propriu-zis. Acesta este alcătuit din suportul bobinelor supraconductoare, bobinele supraconductoare HTS, și jugul de fier. Bobinele supraconductoare se vor realiza din material HTS de tip YBCO, sub formă de bandă cu următoarele caracteristici: lățimea benzii: 6 mm; grosimea benzii: 0.11 mm, curent critic: 130A @77K.
 - Sistemul criogenic de racire al electromagnetului. Acesta este de tip „crioracitor” cu două trepte de racire. Caracteristicile tehnice importante sunt puterea termică și valoarea temperaturii celor două capete de racire, respectiv: 35W@50K și

1,5W@4,2K.

- Criostatul electromagnetului supraconductor. Este o carcasa din otel austenitic cu rol de izolare termica a bobinelor supraconductoare si a crioracitorului. Criostatul se va afla la un nivel de 10^{-5} torr.
- Conductorii de alimentare electrica a magnetului. Acestia sunt conductori mixti (cupru si conductori HTS), pentru alimentarea electrica a bobinajelor supraconductoare de la sursa de cc externa. Conductorii de cupru si cei HTS se vor dimensiona corespunzator pentru a conduce cca 300A.
- S-au realizat modelari numerice a campului magnetic si a fortelor Lorentz in bobinajul Supraconductor. Au fost analizate in principal trei modele fizice diferite pentru generarea de camp magnetic dipolar: distributie de tip $\cos\theta$ in jurul canalului central cu bobine sub forma de sectoare de cerc, bobine plane fara jug de fier, cu inclinare la unghiuri predefinite (30° si 45°), si varianta bobine plane de tip „stadion” asezate paralel una fata de cealalta. Analiza numerica a revelat faptul ca distributia $\cos\theta$ permite obtinerea unui camp intens de 2,5 - 3T cu cea mai buna uniformitate $\sim 10^{-3}$.
- Elaborare model conceptual de sistem de masura si mapare 3D a campului magnetic generat de EMSD.
A fost elaborat un model conceptual de masurare si mapare a campului magnetic generat de electromagnetul supraconductor. Acesta consta in:
 - sonda Hall de masurare a campului magnetic
 - teslametru pentru conversia semnalului sondei Hall in unitati de inductie camp magnetic (T);
 - sistem mecanic de translatie 3D, pentru pozitionarea sondei Hall in punctele predeterminate pentru masurarea valorilor inductiei campului magnetic.
 - Soft specializat pentru construirea unei „harti 3D a valorilor inductiei campului masurate in zona de camp bun.
- Realizare evaluari numerice 3D a campului magnetic si a distributiei de temperatura din EMSD, precum si a tensiunilor mecanice din bobinajul supraconductor prin utilizarea programului COMSOL MULTIPHYSICS.
 - Au fost realizate modelari numerice, cu programul COMSOL MULTIPHYSICS, de simulare a campului magnetic generat de o distributie $\cos\theta$ a bobinajului supraconductor realizat cu bobine plane fara inclinare la unghiuri predefinite. Rezultatul obtinut:
 - camp central 2,303T
 - numar de spire: 250
 - densitate de curent utilizat $3 \cdot 10^8$ A/m²
 - Au fost realizate - *Modelarea numerica* a fortelor Lorentz – Laplace din bobinajul supraconductor, obtinand o distributie 3D a acestora in bobinajul supraconductot, indicand localizarea cu precadere inspre interiorul bobinajului, la suprafata spatiului util de camp.
 - *Modelare numerica 3D* a campului termic din interiorul sistemului criostat-crioracitor-bobinaj supraconductor. Evaluarea numerica a pus in evidenta o sarcina termice de 22.7W (15,76W la treapta1 de racire – 50K, si de 6,94W la treapta2 de racire – 4,2W).
- Realizare conceptie si proiectare unui sistem de realizare a bobinelor supraconductoare HTS, planare.
 - A fost conceput si proiectat un sistem mecanic de realizare a bobinajelor supraconductoare HTS in forma plana, pornind de la rezultatele obtinute in cadrul etapei de modelare numerica. Acesta consta in urmatoarele parti componente:
 - Sistemul de rotire pentru realizarea bobinajului propriu-zis
 - Sistemul de sustinere a mosorului cu conductor supraconductor
 - Sistemul de intindere a firului/benzii supraconductoare.

D. DESCRIERE STIINTIFICA SI TEHNICA

CAPITOLUL 1. INTRODUCERE

Proiectul propune realizarea unui prototip de electromagnet supraconductor dipolar care genereaza un camp magnetic intens ($\sim 3\text{T}$) si uniform intr-o zona extinsa si bine definita, asa numitul „canal cald” al electromagnetului, pe toata lungimea acestuia. Prin acest canal cald trece fluxul de particule incarcate electric si accelerate la energii mari ($\sim \text{GeV-TeV}$), pentru a fi deviat de la directia initiala si mentinut pe o traiectorie curbilinie. Aceasta deviere se realizeaza prin trecerea particulelor incarcate electric prin zone de camp magnetic intens si uniform.

Acest tip de electromagnet supraconductor este destinat utilizarii in acceleratoarele de particule moderne, de mare energie, fara de care nu poate fi conceput progresul fizicii actuale sau pentru diverse alte aplicatii industriale. In cadrul temei, pentru dimensionarea electromagnetului, se vor utiliza ultimele realizari in domeniul software-ului destinat modelarii numerice 3D (Comsol Multiphysics) a campului magnetic si a simularii functionarii electromagnetului. De asemenea se va utiliza ultima generatie a tehnologiei pentru obtinerea temperaturilor joase (Crioracitoare) care elimina utilizarea agentilor criogenici si se va folosi ultimul tip de materiale supraconductoare asa numiti supraconductori HTS (High Temperature Superconductors).

CAPITOLUL 2. ELABORAREA MODELULUI CONCEPTUAL DE ELECTROMAGNET SUPRACONDUCTOR DIPOLAR

2.1. Tema tehnica

Pentru realizarea conditiilor necesare exercitarii functiei de magnet deflector pentru particule incarcate electric si accelerate, electromagnetul va indeplini cerintele exprimate mai jos.

- magnetul supraconductor, trebuie sa produca un camp magnetic intens ($2\text{-}3\text{T}$) in centrul sau, cu o uniformitate de $\sim 10^{-3}$, cu urmatoarele caracteristici:
- un canal „cald” de acces pentru partuculele accelerate
- diametrul canal interior acces: 20 mm
- dimensiuni zona utila de camp: cca cca 15 cm^3
- racire fara agenti criogenici (utilizare criocooler) prin conductie termica.
- utilizare materiale supraconductoare HTS;
- inchiderea sistemului intr-un criostat din otel inox austenitic
- vidarea incintei criogenice la un nivel de $10^{-3}\text{-}10^{-5}\text{ torr}$.

2.2. Modelul conceptual de electromagnet supraconductor dipolar

Tinandu-se seama de constrangerile si cerintele impuse prin tema de proiectare, s-a elaborat modelul conceptual de electromagnet supraconductor dipolar. Acesta este reprezentat schematic in fig.2.1

Modelul conceptual al magnetului dipolar are o structura complexa, fiind alcatuit in principal din urmatoarele subansamble:

- a. Electromagnetul propriu-zis.
- b. Sistemul criogenic de racire al electromagnetului
- c. Criostatul electromagnetului supraconductor
- d. Conductorii de alimentare electrica a magnetului

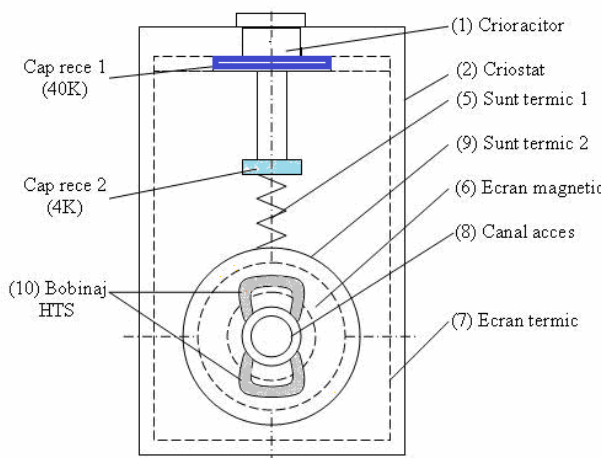
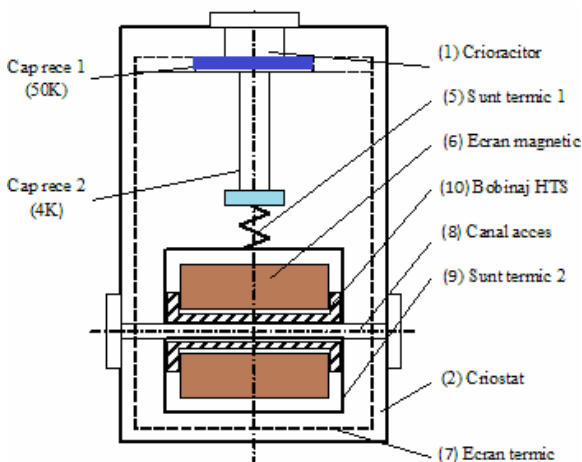


Fig. 2.1.a. Sectiune transversal-longitudinala Fig. 2.1.b. Sectiune taransversal- axiala

Figura 2.1. Schema modelului conceptual de electromagnet HTS dipolar

Aceasta structura a rezultat ca urmare a necesitatii realizarii conditiilor de functionare a electromagnetului supraconductor: obtinerea si mentinerea unor temperaturii joase (min 77K) la nivelul bobinelor supraconductoare, deci utilizarea criogeniei si a unui cryostat care sa izoleze termic bobinele de mediul inconjurator.

a. Electromagnetul dipolar propriu-zis

Electromagnetul dipolar este un electromagnet care utilizeaza bobinaje supraconductoare HTS in locul bobinajului clasic de cupru, intr-o configuratie adecvata pentru a realiza un camp magnetic dipolar in interiorul canalului central de trecere.

Scopul propus este obtinerea unui camp magnetic de 2-3T si a unor neuniformitati de camp de $\sim 10^{-3}$ in spatiul central cu o raza de 15 mm, prin care va trece fascicolul de particule incarcate electric, al acceleratorului.

b. Sistemul criogenic de racire al electromagnetului

Utilizarea materialului supraconductor de tip HTS, permite operarea electromagnetului prin utilizarea racirii sub temperatura azotului lichid (77K) cu crioracitor Gifford-McMahon, ceea ce simplifica criogenia aferenta. Caracteristicile principale ale acestuia sunt: treapta1 de racire 35W@50K si treapta2 de racire 1,5W@4,2K. Racirea bobinajului supraconductor HTS se va face prin conductie termica.

c. Criostatul electromagnetului supraconductor.

Aceasta este o incinta din otel inoxidabil (austenitic) care permite o izolare a bobinei supraconductoare atat termica cat si o vidare eficienta, la un nivel de 10^{-5} torr a interiorului sau. Totodata, criostatul bobinei, are rolul de support mecanic pentru bobina supraconductoare cat si pentru criocooler, care are o greutate considerabila (~ 10 Kg).

Criostatul, este prevazut cu un canal central de 20 mm, care este aflat la temperatura camerei si permite accesul la campul de 3T.

d. Conductorii de alimentare electrica a electromagnetului.

Acestia sint conductori mixti (cupru + conductori HTS), pentru alimentarea electrica a bobinajelor supraconductoare de la sursa de cc externa. Conductorii de cupru si cei HTS se vor dimensiona corespunzator pentru a conduce cca 300A. Conductorii de cupru fac legatura intre sursa de cc si criostatul electromagnetului dipolar, iar conductorii HTS vor face legatura intre conductorii de cupru si terminalele bobinelor supraconductoare. Conductivitatea termica redusa a materialului

HTS, îl face ideal ca și conductor de curent care jonctionează o zonă la temperatura de 100K de o zonă aflată la o temperatură de 4,2K (bobinajul supraconductor).

CAPITOLUL 3. MODELARE NUMERICA

3.1. Distribuția câmpului magnetic la electromagneții de tip dipol $\cos\theta$

Pornind de la legea Biot –Savart [1] pentru calculul inducției magnetice față de o linie de curent s-au dedus următoarele ecuații pentru armonicile câmpului magnetic generat de N conductoare plasate în patru cadrane:

$$\begin{aligned} B_1 &= -2 \frac{\mu_0 j}{\pi} w \sin(\theta_1), \quad n=1 \\ B_3 &= 2 \frac{\mu_0 j R^2}{3\pi} \left(\frac{1}{r+w} - \frac{1}{r} \right) \sin(3\theta_1), \quad n=3 \\ B_5 &= 2 \frac{\mu_0 j R^4}{15\pi} \left(\frac{1}{(r+w)^3} - \frac{1}{r^3} \right) \sin(5\theta_1), \quad n=5 \end{aligned} \quad (1)$$

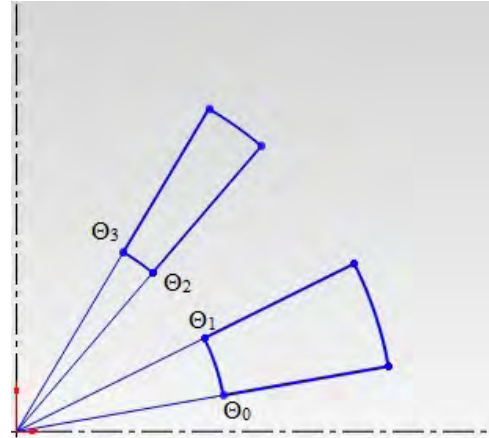


Figura 3.1. Bobina dipol formată din două sectoare.

Observăm din ec. (1) că pentru a anula B_3 , va trebui să alegem $\theta_1 = 60^\circ$. Pentru a anula B_5 , se alege $\theta_1 = 36^\circ$ sau $\theta_1 = 72^\circ$. Din moment ce unghiurile nu coincid, nu putem anula B_3 și B_5 cu numai un sector. Vom considera cazul cu două sectoare, definite de trei unghiuri $\theta_0, \theta_1, \theta_2, \theta_3$ conform Fig. 3.1.

Considerând geometria din Figura 3.1, un set de valori optime pentru unghiurile θ va fi:

$$(\Theta_3, \Theta_2, \Theta_1, \Theta_0) = (59.4^\circ, 49.6^\circ, 26.6^\circ, 10^\circ)$$

Modelarea numerică a câmpului magnetic pentru un dipol

În procesul de optimizare a dipolului magnetic $\cos\theta$ s-a ținut cont de:

- Valoarea câmpului magnetic în apertură pentru care se dorește o valoare de aproximativ 2.5T
- Inducția magnetică în jugul de fier care trebuie să aibă o valoare sub cea de saturație (2T)
- Reducerea cantității de fier folosită pentru fabricarea jugului magnetic
- Valoarea maximă a curentului $I=300A$
- Uniformitatea câmpului magnetic din apertură

Modelul fizic

Se realizează o modelare 2D a unui dipol $\cos\theta$ caracterizat de parametrii geometrici din Tabelul 3.1.

Tabel 3.1. Parametrii geometrici ai dipolului

Parametru	Valoare
Raza apertură	15 mm
Intrefier	5 mm
Grosime jug de fier	30 mm
Diametru fir	0.2 mm
Numar total de spire	265

Curent	290 A
Densitate de curent	7.25e09 A/m ²
$\theta_0, \theta_1, \theta_2, \theta_3$	59.4°, 49.6°, 26.6°, 10°

Modelul matematic

Ecuatiile regimului magnetic stationar sunt:

1. Teorema lui Ampere:

$$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (2)$$

2. Teorema fluxului magnetic:

$$\text{div } \mathbf{B} = 0 \quad (3)$$

3. Relatia $\mathbf{B}(\mathbf{H})$, exprimată prin potențialul magnetic:

$$-\text{div} [\nu \text{grad } A] = J, \quad (4)$$

unde

$\nu = 1/\mu$, reprezentand reluctivitatea magnetica.

Pe frontiera domeniului de aer este satisfacuta conditia Dirichlet $A = 0$.

Modelul numeric

Modelul matematic prezentat anterior a fost analizat in mediul de calcul COMSOL Multiphysics 3.5a. Acesta utilizeaza pentru rezolvare metoda elementelor finite [2], [3].

Rezultate obtinute

Scopul principal al modelarii a constat in determinarea distribuției câmpului magnetic la electromagnetii de tip dipol pentru identificarea parametrilor de intrare ai sistemului de caracterizat.

Neomogenitatea f_{om} a campului magnetic din apertura exprimata in procente se determina

utilizand formula:

$$\frac{B_{\max} - B_{\min}}{B_{\max}} \cdot 100 = f_{om} \% \quad (5)$$

Pentru cazul modelat, considerand doua treimi din apertura, neomogenitatea campului magnetic

este: $f_{om} = 0,96\%$

Numarul total de spire in modelul optimizat este $N=265$, impartite pe sectoare conform Figurii 10.

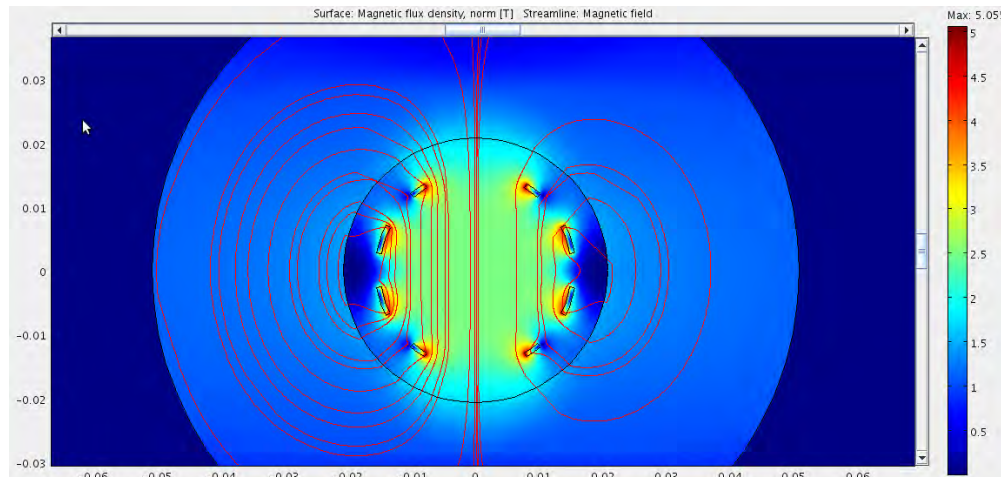


Figura 3.2. Distributia campului magnetic și liniile de camp

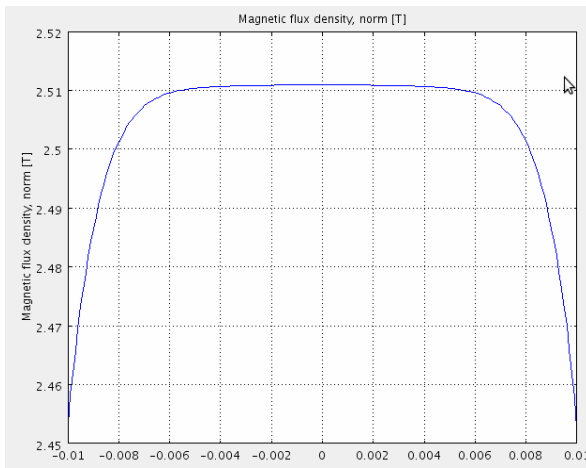


Figura 3.3. Variația inducției magnetice B [T] în funcție de coordonata x [m] pe 2/3 din apertura

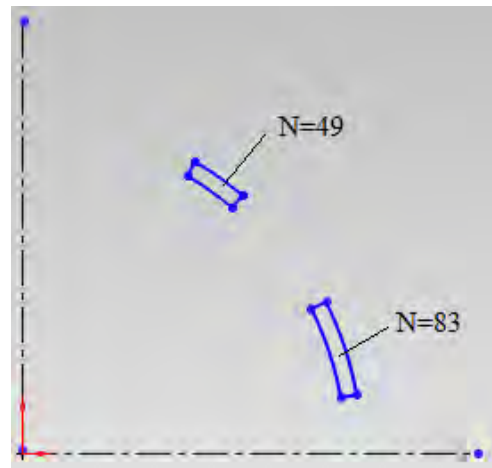


Figura 3.4. Numarul de spire repartizat pe sectoare

3.2. Electromagneți dipolari fara jug de fier și bobine înclinate.

Modelul fizic

Această variantă e realizată pentru un diametru de 30 mm și un câmp magnetic în centru de 3 T, curent $I = 300$ A. Conductorul YBCO utilizat are lățimea de 6 mm. S-a considerat că bobinele sunt realizate prin înclinarea bandei la 45° față de direcția de înfășurare. Tabelul 3.2 conține datele utilizate pentru construcția modelului.

Tabel 3.2. Date bobine

Bobina	Ungchi [$^\circ$]	Spire	Dimensiune [mm]
1	-66.815	50	8.5
2	-37.7	101	17.17
3	-17.84	121	20.57
4	0	128	21.76
5	0	128	21.76
6	17.84	121	20.57
7	37.79	101	17.17
8	66.815	50	8.5

Rezultate obtinute

Rezultatele se pot observa în Fig. 3.5, care conține liniile de câmp și harta pseudocolorată a modului inducției magnetice, și în Fig. 3.6, în care este dată variația $|\vec{B}|$ în zona centrală, marcată cu o linie roșie în Fig. 3.5.

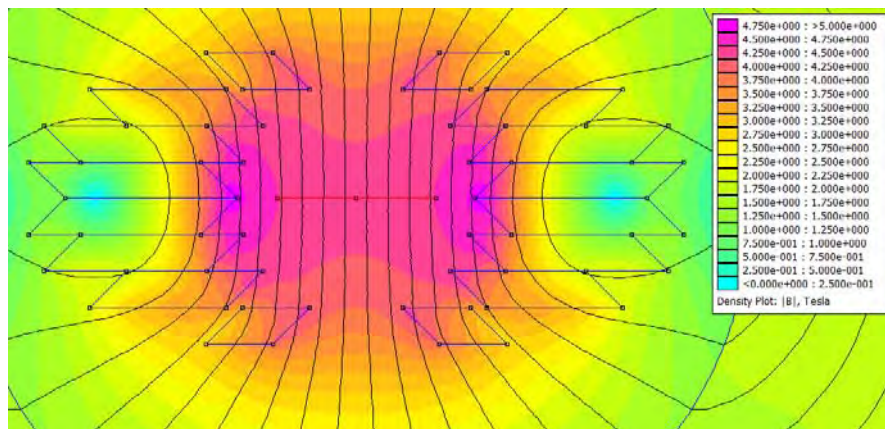


Figura 3.5. Distribuția câmpului magnetic și liniile de câmp

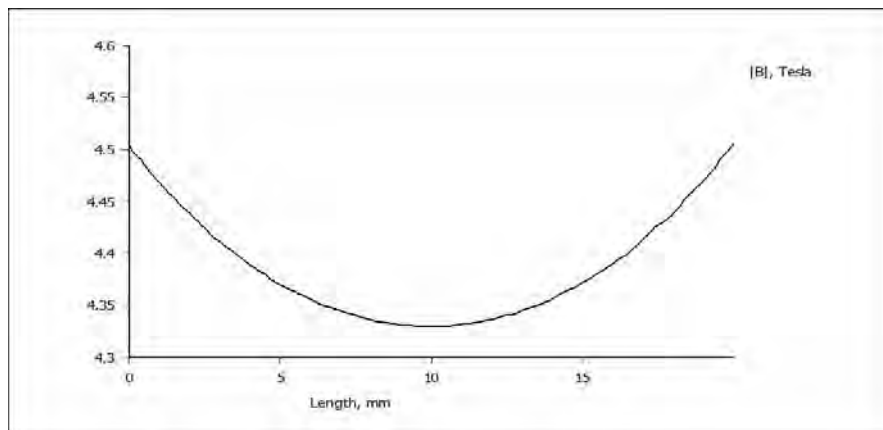


Figura 3.6. Curba $|B| = f(x)_{y=0}, x \in [-10, 10]$

Pentru cazul modelat, considerand doua treimi din apertura, neomogenitatea campului magnetic este: $f_{om} = 11,74\%$, pentru un $B_0 = 4,33$ T

3.3. Electromagnet dipolar cu bobine plane paralele

S-a studiat un model fizic alcatuit dintr-un ansamblu de doua bobine, dublu galet, situate in plane paralele una fata de cealalta, la o distanta de 30 de mm. Fiecare bobina are o raza de curbura de 15 mm. Bobinajul este alcatuit din banda supraconductoare de tip HTS cu o latime de 12 mm si o grosime de 0,22 mm. Pentru modelarea ansamblului s-a folosit Comsol Multiphysics 3.5a.

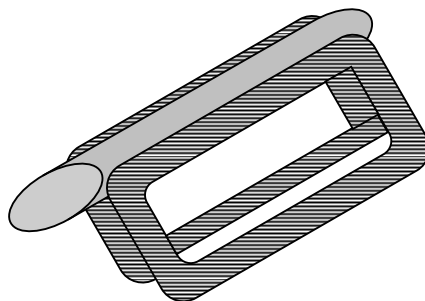


Fig. 3.7. Modelul fizic de configuratie dipolara.

Modelare

Pentru modelare s-a utilizat modululul AC/DC 2D, mediul de modelare “Perpendicular Induction Currents, Vector Potential”. Proprietatile mediului de modelare:

- analiza este de tip static;
- tipul de elemente este Lagrange – Quadratic, adica convergenta va fi de tip patrat;

Rezultate obținute

Pentru realizarea graficului din figura 25 s-a mentinut constant distanta dintre bobine si numarul de spire. S-a variat intensitatea curentului electric prin bobine din 10[A] in 10[A] cu valori intre 135÷185 [A]. Din grafic ne rezulat o dependenta liniara a valorii fluxului magnetic de intensitatea curentului electric, si anume valoarea fluxului magnetic creste odata cu cresterea valorii intensitatii curentului electric.

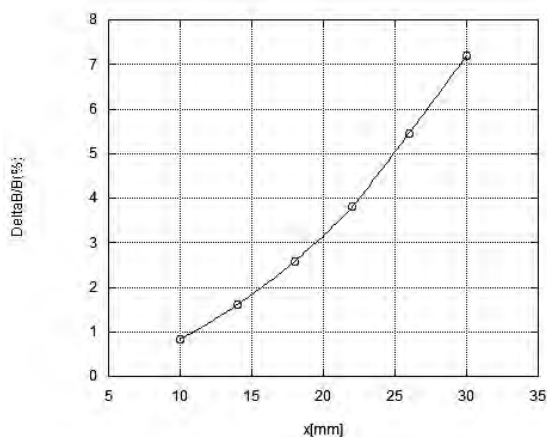


Figura 3.8. Variatia uniformitatii campului magnetic cu distanta dintre bobine

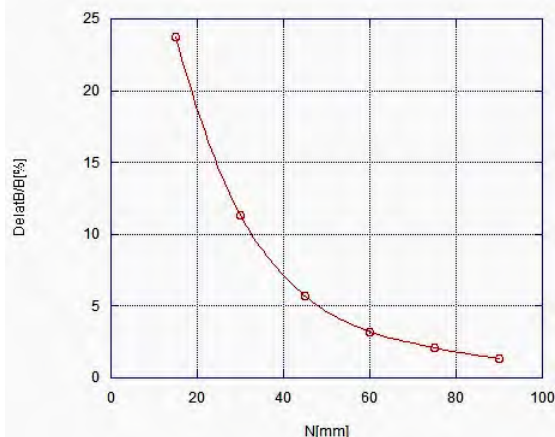


Figura 3.9. Dependenta uniformitatii campului magnetic de grosimea bobinajului



Figura 3.10. Dependenta uniformitatii campului magnetic de raza interioara de curbura a bobinelor

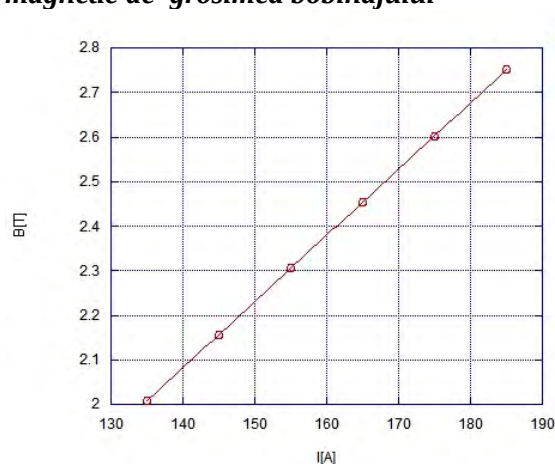


Figura 3.11. Graficul dependentei densitatii de flux magnetic de intensitate curentului electric

Graficele din Fig. 3.8...3.11 au fost realizate prin simulări consecutive la care s-a variat parametrul specificat pe abscisă, menținându-se constanți ceilalți parametri analizați.

Studiu de caz

S-a considerat situația particulară cu următoarele specificații:

- distanța între bobine de 30 [mm];
- raza interioară de curbura a bobinelor de 15 [mm];
- intensitatea curentului electric de 170 [A];
- grosimea bobinajului de 60 [mm].

Din graficul din Figura 3.13 se poate calcula uniformitatea câmpului magnetic. În acest caz este de 3,3 %.

În fier, fluxul magnetic nu trebuie să depășească valoarea de 1,9 T. Se observă că fluxul magnetic are o valoare maximă de 2,59 T între bobine

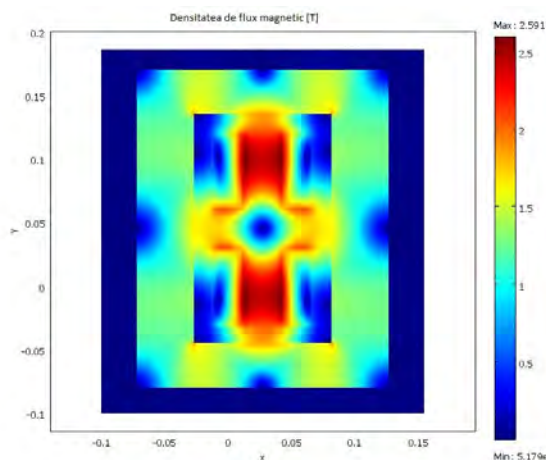


Figura 3.12. Distribuția densității de flux magnetic în ansamblul considerat

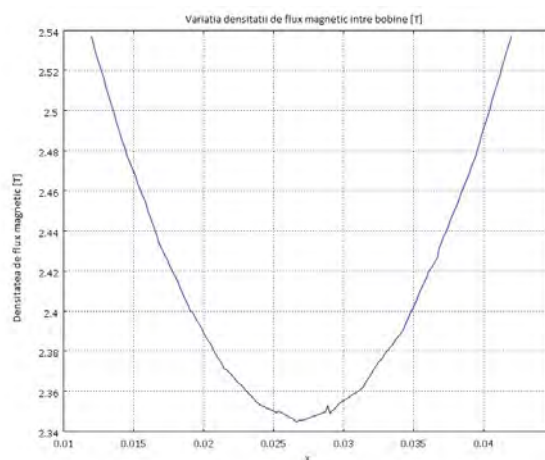


Figura 3.13. Variația densității câmpului magnetic între bobine

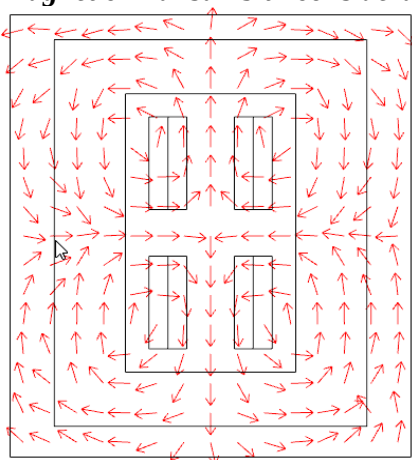


Figura 3.14. Direcția câmpului magnetic

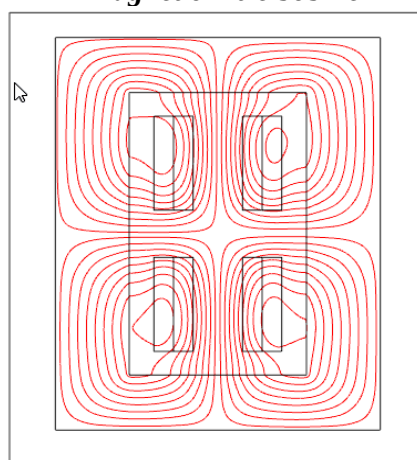


Figura 3.15. Direcția liniilor de câmp magnetic

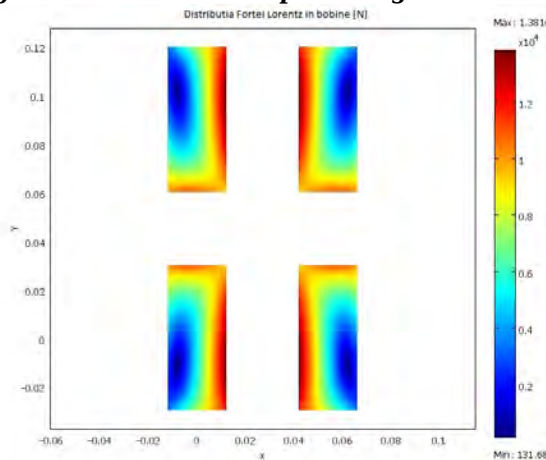


Figura 3.16. Distribuția forțelor Lorentz în bobinele HTS

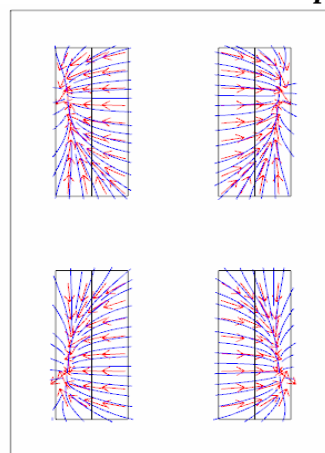


Figura 3.17. Sensul și direcția forțelor Lorentz din bobinele HTS.

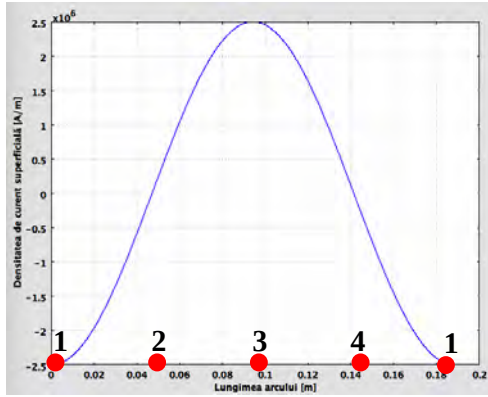
În Figura 3.16 se observă că forțele Lorentz sunt mai mari în partea exterioară a bobinelor, unde ating un maxim de 1.38×10^4 N.

Din Figura 3.17 se poate concluziona că forțele Lorentz sunt forțe de respingere și că atare ele trebuie compensate mecanic pentru stabilizarea sistemului.

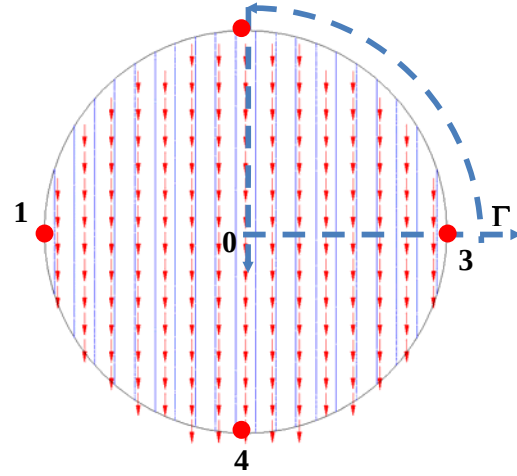
3.4. Electromagnet dipolar cu bobine plane normale.

Model 2D simplificat – solenația este reprezentată printr-o pânză de curent

Pentru o primă evaluare, solenația de excitație este distribuită ca o pânză de curent echivalentă, $J_s = J_0 \cos \alpha$, unde α este unghiul intern (la centru).



a. Solenația distribuită ca pânză de curent.



b. Inducția magnetică, $B_y = 3.142$ T.

Fig. 3.18 — Modelul CAD pentru TPS cu raport de transformare 1:2.

Fig. 3.18 prezintă prin linii de câmp și săgeți inducția magnetică în spațiul de lucru; se remarcă orientarea după direcția verticală (y) din plan (respectiv direcția z din Fig. 3.18). Pentru $J_0 = 2.5 \cdot 10^6$ A/m se obține un câmp $B_y = 3.124$ T. Problema este rezolvată numeric, utilizând metoda elementului finit, FEM [3].

Model 2D al distribuției neuniforme a solenației

În a doua etapă se determină distribuția solenației ținând seamă că înfășurarea este realizată cu conductor HTS bandă, de dimensiuni $6 \text{ mm} \times 0.24 \text{ mm}$. În acest studiu nu sunt considerate capetele înfășurărilor și efectele de câmp asociate prezenței lor.

Aplicarea legii circuitului magnetic pe conturul Γ (Fig. 2,b), închis la mare distanță de cilindru, $\text{Arc}(P_3P_2) \rightarrow \infty$, conduce la

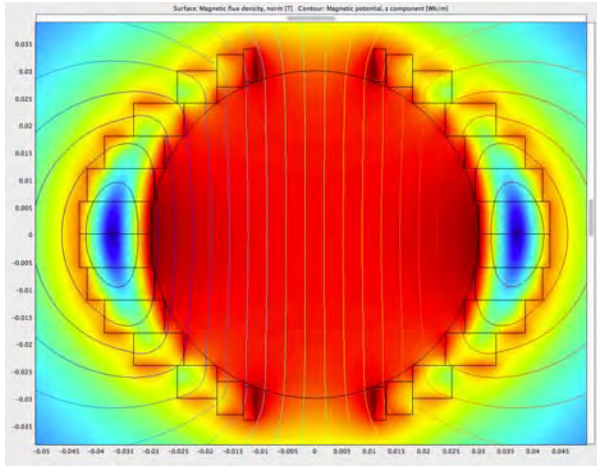
$$n \cdot i = \oint_{\Gamma} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{r} = \int_{P_2}^{P_3} H dz = Hr = \int_0^{\pi/2} J A_{amp} \cos \theta r d\theta = Jr A_{amp}, \quad (6)$$

unde n este numărul de spire, i [A] este intensitatea curentului electric printr-o spirală, H [A/m] este intensitatea câmpului magnetic (componenta verticală), J [A/m²] este densitatea de curent electric de conducție, iar A_{amp} [m] este “amplitudinea” grosimii înfășurării (măsurată în direcție radială, la $\alpha = 0$).

Pe de altă parte, $J = i/a$, unde a [m²] este aria secțiunii transversale a benzii HTS (pentru banda de $6 \text{ mm} \times 0.24 \text{ mm}$, $a = 1.44 \text{ mm}^2$). Pentru $i = 300$ A, rezultă $J = 2.08 \cdot 10^8$ A/m².

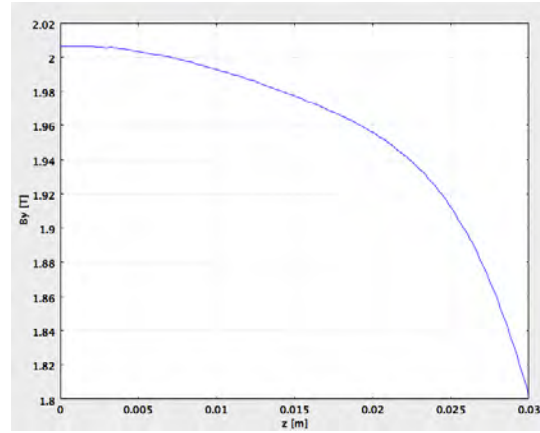
Ținând seama că $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$, pentru $B = 3$ T, $r = 30$ mm și $J = 10^7$ A/m² rezultă $A_{amp} \sim 12$ mm, și $n \sim 250$ spire.

Distribuția celor n spire pe suprafața spațiului de lucru este prezentată în Fig. 3, prin codul MATHEMATICA utilizat în acest scop.



Inducția magnetică – detaliu.

Fig. 3.19 — Câmpul magnetic în solenoidul HTS cu înfășurare cosinusoidală.



Variația lui B_z (componenta verticală).

Acțiuni pondero-motoare asupra înfășurării de excitație în câmp magnetic

Bobina de excitație, parcursă de curent electric este situată în câmpul magnetic propriu. Prin urmare, asupra sa acționează forțe electrodinamice Laplace, calculate prin [5]

$$\mathbf{f} = \mathbf{J} \times \mathbf{B}. \quad (7)$$

unde $\mathbf{f}$ [N/m³] este densitatea de forță. Utilizând soluția numerică a problemei de câmp magnetic staționar, rezultă distribuția lui $\mathbf{f}$ din Fig. 8.

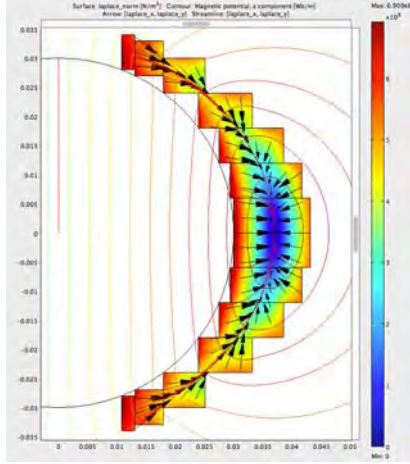


Fig. 3.20 — Linii de câmp $\mathbf{B}$ vizualizate prin contururi de $A_z = \text{ct}$. Distribuția densității forței electrodinamice, $\mathbf{f}$ (4), este redată prin hartă de culoare, linii de câmp și săgeți.

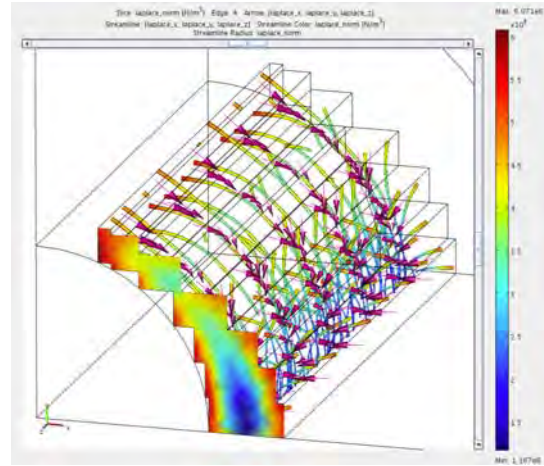


Fig. 3.21 — Forța electrodinamică ce acționează asupra bobinelor HTS.

Aparent, solicitările maxime sunt înregistrate la periferia pachetului de spire – la suprafața spațiului util

Analiza problemei de transfer de căldură în sistemul criostat al bobinei HTS

Problema staționară de transfer de căldură prin conducție în magnetul HTS este descrisă de ecuația conservării energiei

$$\frac{k}{\rho c_p} \nabla^2 T = 0, \quad (8)$$

unde ρ [kg/m³] este densitatea de masă, c_p [J/(kg·K)] este căldura specifică la presiune constantă, k [W/(m·K)] este conductivitatea termică, și T [K] este temperatura. În acest studiu, proprietățile termice sunt presupuse constante, evaluate la temperatura de lucru.

Condițiile la limită care completează problema de transfer de căldură sunt [6-8]:

Carcasa

$$T = T_{amb}, \quad (9)$$

Suprafețele izolate (adiabatice)

$$-\mathbf{n} \cdot (-k \nabla T) = 0, \quad (10)$$

Suprafețele radiante (radiație suprafață la suprafață)

$$(1 - \varepsilon)G = J_0 - \varepsilon \sigma T^4. \quad (11)$$

Aici ε este emisivitatea (Tab. 1) $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}$ W/(m²T⁴) este constanta Stefan-Boltzmann, $T_{amb} = 293.15$ K este temperatura mediul ambiant, G [W/m²] este fluxul de căldură prin radiație, incident (iradianța), și J_0 [W/m²] este radiozitatea suprafeței.

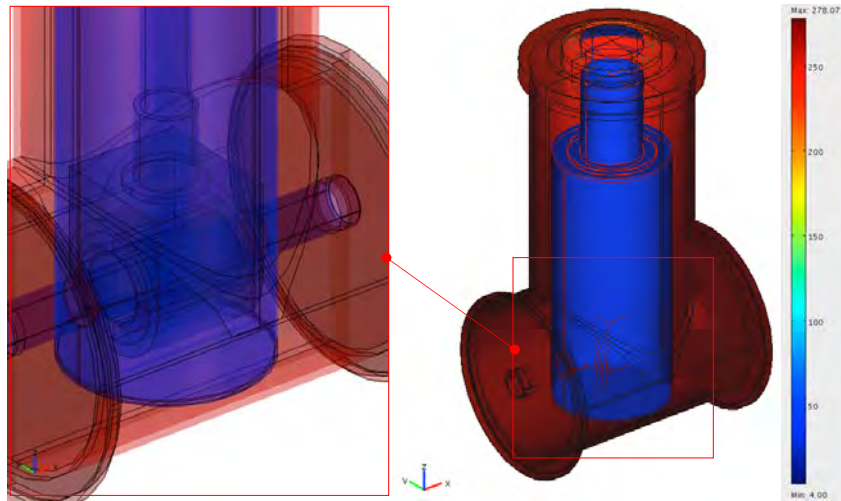


Fig. 3.22 — Distribuția temperaturii în sistemul criostat și magnetul HTS.

Fig. 3.22 arată câmpul de temperatură (slice-uri, culoarea este proporțională cu temperatura locală) pentru $h = 2$ W/m²K. În acest model, capătul cald (la 50 K) comunică direct cu capacul criostatului. Cavitățile vidate sunt suprimate (eliminate din domeniul de calcul), astfel încât se pot observa carcasa și sistemul de ecranare termică.

Se pot distinge trei regiuni: carcasa din inox (temperatură ridicată, 293.15 K), sistemele de ecranare (temperatură joasă, sub 50 K), și canalul cald, extern, care traversează întreaga structură. O a treia incintă (ecranată), interioară celei de a doua, va fi prevăzută pentru a reduce influxul de căldură de la canal la magnetul HTS.

Tabelul 3.3. — Sarcini termice estimate prin simulare numerică.

Unitatea	Heat (in)flux [W]
A doua cameră rece (prin capul rece 2), 50 K	15.76
Prima cameră rece (prin capul rece 1), 4 K	6.94
Căldură primită din exterior, $T_{mediu} = 293.15$ K (Sarcina termică totală)	22.70

Tabelul 3.3 redă sintetic sarcinile termice la nivelurile celor două trepte ale Cryocooler-ului, estimate prin simulare numerică.

3.5. Concluzii la Capitolul 3

Analiza comparativa a calitatii campului magnetic in cele trei situatii analizate in cadrul acestui capitol, sunt sintetizate in tabelul 4.1.

Tabelul 4.1

Nr.crt.	Tip magnet	$B_{\max}(T)$	Neuniformitate Camp (%)	Nr. de spire	Curent (A)	Raza apertura (mm)
1	Cos θ	2,51	0,96	265	290	15
2	Bobine plane si jug de fier	2,44	3,30	273	170	15
3	Bobine inclinate	4,3	11,79	800	300A	15

Rezultatele obtinute pentru aceeasi apertura (diametrul de 30mm), arata ca desi o distributie de tip $\cos \theta$ realizeaza cea mai buna uniformitate de camp (0,96%) si necesita un numar minim de spire (265), totusi are doua inconveniente principale: necesita un curent destul de ridicat (290A) si dificultati tehnice de realizare a bobinajului propriu-zis si necesita un sistem mecanic adecvat de sustiner, date fiind forte Lorentz considerabile.

Varianta 3 (bobine inclinate), desi realizeaza o valoare ridicata a campului (4,3T) la un curent maxim de 300A, obtine o neuniformitate ridicata (aproape 12%!) ceea ce nu este acceptabil, in conditiile in care sunt necesare un numar maim de spire (800). Deci singurul avantaj pe care-l aduce, este practic anulat de calitatea proasta a campului si de cantitatea mare de material supraconductor necesar, ceea ce ridica foarte mult costul realizarii bobinajului. Varianta 2 (bobine plane cu jug de fier), intruneste cele mai multe caracteristici avantajoase: curent redus (170A), numar acceptabil de spire (273), O VALOARE ACCEPTABILA A CAMPULUI (2,44T). Dezavantajul principal il constituie o neuniformitate de camp de 3,3%, care insa mai poate fi redusa prin optimizarea corespunzatoare a jugului de fier si reglarea distantei dintre bobinaje. Varianta 2, mai prezinta insa un avantaj important (in special la acceleratoarele de particule), faptul ca are practic un spatiu dublu pentru zona de camp dipolar (cele doua portiuni drepte de bobinaj).

In final, putem concluziona ca atat varianta 1 cat si varianta 2 raman in atentia noastra, ca posibile variante de lucru.

CAPITOLUL 4. Elaborarea modelului conceptual de măsura și mapare a câmpului magnetic generat de EMSD

Câmpul magnetic intens si uniform pentru care a fost elaborat modelul conceptual de măsura si mapare este distribuit intr-un volum cilindric. Modelul conceptual prezentat, implementează maparea si măsurarea câmpului magnetic generat de EMSD prin intermediul baleiajului unei sonde in volumul de analizat.

Modelul propus, va masura valorile campului magnetic din interiorul zonei cilindrice cu zona de camp bun (cca 100mm lungime si 20mm diametru) cu ajutorul unei sonde Hall care va putea fi plasata in punctele preconizate, cu ajutorul unui sistem de translatie 3D controlat de un computer. Semnalul sondei Hall va fi convertit in valori de camp cu ajutorul unui teslametru digital de precizie. Valorile masurate in punctele prestabilite vor fi reprezentate 3D printr-un program Soft adecvat, pentru maparea valorilor campului magnetic din zona de interes

Structura sistem

Sonda Hall va fi conectata la teslametrul digital printr-un cablu ecranat pus la masa si un circuit de calibrare. Domeniul de măsurare al sondelor prin efectul Hall, acoperă gama [0 - 3] T.

Suportul sondei va fi realizat dintr-un material rigid care sa permită un baleiaj precis fara a fi influențat de câmpul magnetic (e.g. textolit, plexiglass) înconjurător.

Teslametrul digital va avea un domeniu de măsura a densităților de flux magnetic cuprins între 0 și 3T, cu o precizie de 1 parte la 60000 (0,01% + 0,006% Cap Scala) și indicarea polarității. Sonda va fi calibrată pentru variațiile de temperatură (10ppm/C) și câmp magnetic printr-un circuit dedicat. *Structura mecanică* în care va fi inclus sistemul de mapare va conține un banc de testare dotat cu sisteme de aliniere optice sau de tip laser și sistemele de mișcare de tip motoare pas cu pas. Pentru o poziționare precisă, este posibilă includerea în procesul de monitorizare și control a unor semnale de tip feedback, furnizate de motor. Acestea vor confirma deplasarea mecanică a motorului pe poziția comandată de aplicația software

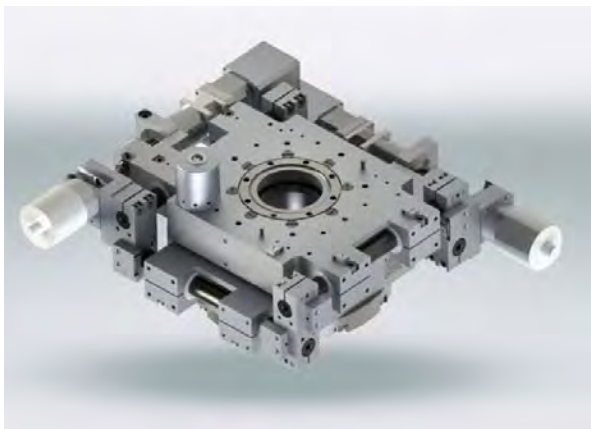


Fig. 4.1. Sistemul de deplasare în coordonate XY

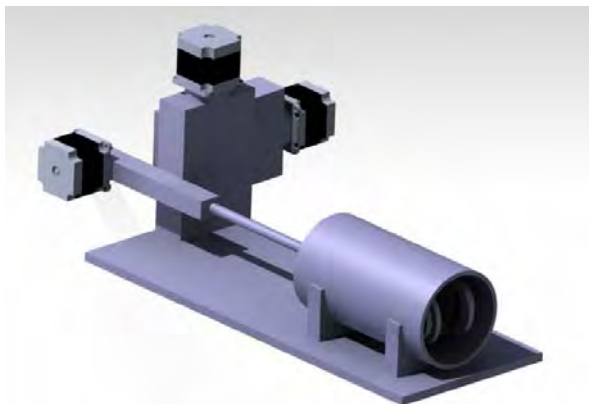


Figura 4.2. Model conceptual al sistemului de masura 3D a câmpului magnetic

Computerul va interoga teslametrul pentru maparea câmpului magnetic în volumul analizat.

Procesul de interogare se va desfășura după poziționarea sondei pe poziția dorită.

Aplicația de monitorizare, control și achiziție de date va fi scrisă în LabVIEW. Aceasta va realiza și procesările de date necesare pentru reprezentarea datelor achiziționate în format grafic (*.tif) sub forma de hărți ale volumului sau secțiuni transversale

CAPITOLUL 5. Concepția dispozitivului pentru realizarea bobinelor supraconductoare în construcție planară

Conceptual, un astfel de dispozitiv trebuie să fie alcătuit din următoarele sisteme mecanice:

- sistem de susținere și reglare pe verticală a motorului de sarmă supraconductoare, care are și rol de frânare împotriva rotației – 1 buc.
- sistem de reglare a tensiunii firului de sarmă supraconductoare, cu posibilitatea și a reglării ghidării acesteia în plan vertical
- sistem rotativ pentru realizarea propriu-zisă a înfășurării bobinei (dipolară, cuatropolară, sextupolară sau octopolară). Acesta trebuie să aibă în ansamblul sau următoarele componente mecanice :
 - a. o placă de susținere a dispozitivului propriu-zis, care are și rol de a asigura înfășurarea uniformă a spirelor bobinei
 - b. o placă de bază, care are rolul de a susține sabloanele de realizare a bobinelor
 - c. o placă sablon
 - d. o altă placă (sablon) ajutătoare, pentru vizualizarea modului de înfășurare a spirelor bobinei
 - e. prezoane de ghidare și strângere a plăcilor (sablon) pe placa de bază a dispozitivului
 - f. un sistem de lagăruire (cu rulmenți) a plăcii de susținere care asigură rotirea ușoară a întregului ansamblu de dispozitiv
 - g. două, patru, șase sau opt suporturi, funcție de tipul bobinei care trebuie realizată.

O forma schematica a unui astfel de dispozitiv este prezentata in Fig 5.1. in care pozitia 1 reprezinta sistemul rotativ, pozitia 2 reprezinta sistemul de reglare a tensiunii firului de sarma iar pozitia 3 reprezinta sistemul de sustinere si reglare verticala a mosorului de sarma.

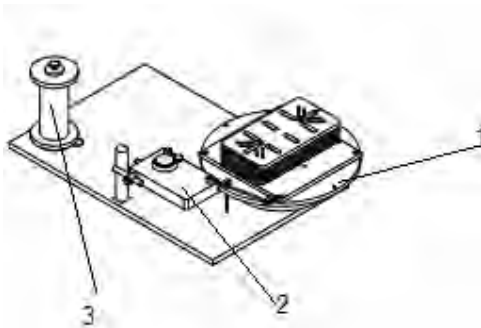


Fig. 5.1. Schema de principiu a dispozitivului de realizare bobine supraconductoare

CAPITOLUL 6. CONCLUZII GENERALE

In cadrul etapei prezente a lucrarilor, au fost realizate urmatoarele:

1. Coordonatorul lucrarilor, a realizat urmatoarele obiective:

- A fost elaborat modelul conceptual de electromagnet supraconductor HTS (EMSD), cu urmatoarea structura:

- a. Electromagnetul propriu-zis.
- b. Sistemul criogenic de racire al electromagnetului
- c. Criostatul electromagnetului supraconductor
- d. Conductorii de alimentare electrica a magnetului

Caracteristicile principale ale acestuia sunt:

- Camp magnetic generat: 2-3T
- Neuniformitatea campului: 10^{-3}
- Volumul zonei de camp bun: 15cm^3 .
- Canal central de acces: diametrul 20mm
- S-au realizat modelari numerice ale campului magnetic generat de modelele de bobinaj analizate (bobinaj $\cos\theta$, bobinaj cu spire inclinate si bobinaj planar). Cea mai avantajoasa varianta a fost gasita pentru o configuratie de tip $\cos\theta$:
 - camp magnetic obtinut: 2,51T
 - neuniformitate: 0,96%
 - numar de spire: 265
 - curent utilizat: 290A

2. Partenerul1, a realizat:

- Elaborare model conceptual de sistem de masura si mapare 3D a campului magnetic.

Acest model propus, va masura valorile campului magnetic din interiorul zonei cilindrice cu zona de camp bun (cca 100mm lungime si 20mm diametru) cu ajutorul unei sonde Hall care va putea fi plasata in punctele preconizate, cu ajutorul unui sistem de translatie 3D controlat de un computer. Semnalul sondei Hall va fi convertit in valori de camp cu ajutorul unui teslametru digital de precizie. Valorile masurate in punctele prestabilite vor fi reprezentate 3D printr-un program Soft adecvat, pentru maparea valorilor campului magnetic din zona de interes.

3. Partenerul P2 a realizat:

- Modelarea numerica a distributiei campului magnetic, a campului termic si a tensiunilor mecanice din bobinajul supraconductor prin COMSOL MULTIPHYSICS.

Pe baza modelului conceptual elaborat de Coordonator, a fost realizata evaluarea campului magnetic a unei distributii de tip $\cos\theta$, diferita prin pozitionarea „normala” a conductorilor tip banda in bobinajul supraconductor HTS. Rezultatele numerice obtinute:

- camp central 2,303T
- numar de spire: 250
- densitate de curent $3 \cdot 10^8$ A/m²
- *Modelarea numerica* a fortelor Lorentz – Laplace din bobinajul supraconductor, obtinand o distributie 3D a acestora in bobinajul supraconductot, indicand localizarea cu precadere inspre interiorul bobinajului, la suprafata spatiului util de camp.
- *Modelare numerica 3D* a campului termic din interiorul sistemului criostat-crioracitor-bobinaj supraconductor. Evaluarea numerica a pus in evidenta o sarcina termice de 22.7W (15,76W la treapta1 de racire – 50K, si de 6,94W la treapta2 de racire – 4,2W).

4. Partenerul3 a realizat:

- Conceptia si proiectarea sistemului de realizare a bobinelor supraconductoare dipolare planare.

Pentru executia bobinelor supraconductoare este necesara conceptia si realizarea unui dispozitiv adecvat pentru executia acestor bobinaje. In cadrul etapei a fost conceput si realizat proiectul de excutie al componentelor mecanice ale acestuia.

Bibliografie

- [1] S. Russenschuck, „Field Computation for Accelerator Magnets, Wiley-VCH, 2010.
- [2] I. Munteanu, G. Ciuprina, and F. Tomescu, „Modelarea numerica a campului electromagnetic prin programe scilab, Printech, 2000.
- [3] “COMSOL Multiphysics” <http://www.comsol.com/>
- [4] Keita Takahashi, Naoyuki Amemiya, Taketsune Nakamura, Yoshiharu Mori, Toru Ogitsu, Masahiro Yoshimoto, Ikuo Watanabe, and Takeshi Yoshiyuki – Magnetic Field Design of Coil-Dominated Magnets Wound With Coated Conductors, IEEE Transactions on applied superconductivity, vol. 22, nr. 3, iunie 2012C.I. Mocanu, Teoria câmpului electromagnetic, EDP, București, 1982.
- [5] MATHEMATICA, Wolfram Res., v. 9.0.
- [6] I. Dobrin, A.M. Morega, A. Nedelcu, M. Morega, D. Daniel, “Thermal and magnetic design of a HTS high magnetic field generator using superconducting Helmholtz coils”, The 18th ICIT Conference with international participation Progress in Cryogenics and Isotopes Separation, Călimănești-Căciulata, October 2012.
- [7] A.M. Morega, I. Dobrin, A. Nedelcu, M. Morega, “A quadrupolar superferric magnet”, OPTIM 2012, 13th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, 24-26 May 2012, Brasov, Romania, paper RD-006777, IEEE-eXplore, (ISI).
- [8] A. Bejan, Heat Transfer, J. Wiley, New York, 1989.

SECTIUNEA 1

RAPORTUL STIINTIFIC SI TEHNIC

DENUMIRE CONTRACT: Electromagnet supraconductor dipolar pentru generarea de camp magnetic intens si uniform

ACRONIM: EMSD

FAZA DE EXECUTIE NR. 2/2015

CU TITLUL: Proiectare electromagnet supraconductor dipolar – model experimental si realizare parti componente.

€ RST – raport stiintific si tehnic in extenso

Electromagnet supraconductor dipolar pentru generarea de camp magnetic intens si uniform

Etapa 2 / 2015

“Proiectare electromagnet supraconductor dipolar – model experimental si realizare parti componente”

Cuprins

pag.

A.OBIECTIVE GENERALE

4

B.OBIECTIVELE ETAPEI DE EXECUȚIE

4

C. REZUMATUL ETAPEI DE EXECUȚIE

4

D. DESCRIEREA ȘTIINȚIFICĂ ȘI TEHNICĂ

Capitolul 1. Proiectarea modelului experimental de magnet supraconductor HTS si a componentelor conexe.

Realizare generala model experimental de EMSD: criostat pentru electromagnet (CO – Activitatile 2.1 si 2.5.)

5

1.1. Proiectare generala model experimental de EMSD

5

1.1.1. Descriere model experimental de EMSD

5

1.1.2. Calcule de dimensionare

6

1.1.2.1. Bobinele supraconductoare

6

1.1.2.2 Sistemul criogenic de racire

7

1.1.2.3. Calculul sarcinilor termice ale crioracitorului

7

1.1.2.4. Conductorii de curent HTS

8

1.2. Desene de executie

8

1.2.1. Ansamblul general al EMSD – 00.00

9

1.2.2. Ansamblu Criostat EMSD- 07.00

9

1.2.3. Conductorii HTS EMSD- 13.00

10

1.3. Executie criostat

10

1.4. Concluzii la Capitolul 1

10

Bibliografie la Capitolul 1

10

Capitolul 2. Proiectarea sistemului de masura a campului magnetic generat de magnetul supraconductor HTS.

(P1 - Activitate 2.2)

11

2.1. Prezentarea sistemului de masura

11

2.1.1. Teslametrul digital

12

2.1.2. Sistemul de miscare in trei axe

12

2.1.3. Aplicatia software

13

2.2. Concluzii la capitolul 2

14

Bibliografie la Capitolul 2

14

Capitolul 3.

(P2 - Proiectare sistem de masura a tensiunilor mecanice din bobinajul supraconductor al EMSD

14

3.1. Aspecte generale

14

3.2. Sistemul hardware de masura si achizitie

15

3.3. Aplicatia software dedicata masurarii si achizitiei de date

16

3.4. Concluzii la capitolul 3

16

Bibliografie la Capitolul 3

17

Capitolul 4.

(P3: Activitatile 2.4.si 2.6.)

Proiectare jug de fier si sistem mecanic de fixare a bobinajului supraconductor .

Proiectare dispozitiv de executie cilindrica a bobinajelor supraconductoare HTS.

Realizare dispozitiv de executie bobinaj supraconductor

17

4.1. Proiectare jug de fier si sistem mecanic de fixare a bobinajului supraconductor

17

4.2. Proiectare dispozitiv de executie cilindrica a bobinajelor supraconductoare HTS

18

4.3. Realizare dispozitiv de executie bobinaj supraconductor	18
4.4. Concluzii la Capitolul 4	19
CAPITOLUL 5. CONCLUZII GENERALE	19

A. OBIECTIVELE GENERALE ALE PROIECTULUI

În cadrul proiectului se urmărește realizarea unui electromagnet supraconductor dipolar pentru generarea de câmp magnetic intens și uniform pentru acceleratoare de particule.

Proiectul are drept obiective generale:

- realizarea și testarea unui electromagnet supraconductor cu bobinaj HTS, pentru generarea de câmp magnetic dipolar cu acces direct la zona de câmp magnetic, din exterior.
- Realizarea și testarea unui sistem de măsură a câmpului magnetic produs de electromagnet.
- Realizarea și testarea unui sistem de măsură a tensiunilor mecanice din bobinajul supraconductor
- Realizarea unui sistem de execuție a bobinelor supraconductoare HTS pentru electromagnetul supraconductor.

B.OBIECTIVELE ETAPEI DE EXECUTIE

Conform cu planul de realizare a proiectului, în prezenta etapă s-a realizat:

„Proiectare electromagnet supraconductor dipolar – model experimental și realizare parti componente”.

Obiectivele principale ale etapei de execuție cu numărul 2/2015, sunt:

1. Proiectare generală model experimental de EMSD și a sistemelor conexe (criostat, bobine supraconductoare, sistem criogenic).
2. Proiectarea sistemului de măsură și mapare 3D a câmpului magnetic – model experimental
3. Proiectare sistem de măsură a tensiunilor mecanice din bobinajul supraconductor al EMSD
4. Proiectare jug de fier și sistem mecanic de fixare a bobinajului supraconductor . Proiectare dispozitiv de execuție cilindrică a bobinajelor supraconductoare HTS.
5. Realizare generală model experimental de EMSD : criostat pentru electromagnet.
6. Realizare dispozitiv de execuție bobinaj supraconductor

C. REZUMATUL ETAPEI DE EXECUTIE

În cadrul etapei au fost realizate:

I. Coordonatorul proiectului:

- Proiectarea modelului experimental de EMSD și a sistemelor conexe acestuia:
 - criostatul electromagnetului
 - bobinele supraconductoare
 - sistemul criogenic de răcire
 - conductorii HTS de alimentare a bobinelor supraconductoare
- Realizarea generală a modelului experimental de EMSD: criostatul pentru electromagnetul supraconductor

II. Partenerul P1

- Proiectarea sistemului de măsură și mapare 3D a câmpului magnetic – model experimental

III. Partenerul P2.

- Proiectare sistem de măsură a tensiunilor mecanice din bobinajul supraconductor al EMSD

IV. Partenerul P3.

- Proiectare jug de fier și sistem mecanic de fixare a bobinajului supraconductor . Proiectare dispozitiv de execuție cilindrică a bobinajelor supraconductoare HTS.
- Realizare dispozitiv de execuție bobinaj supraconductor

D. DESCRIERE STIINTIFICA SI TEHNICA

CAPITOLUL 1.

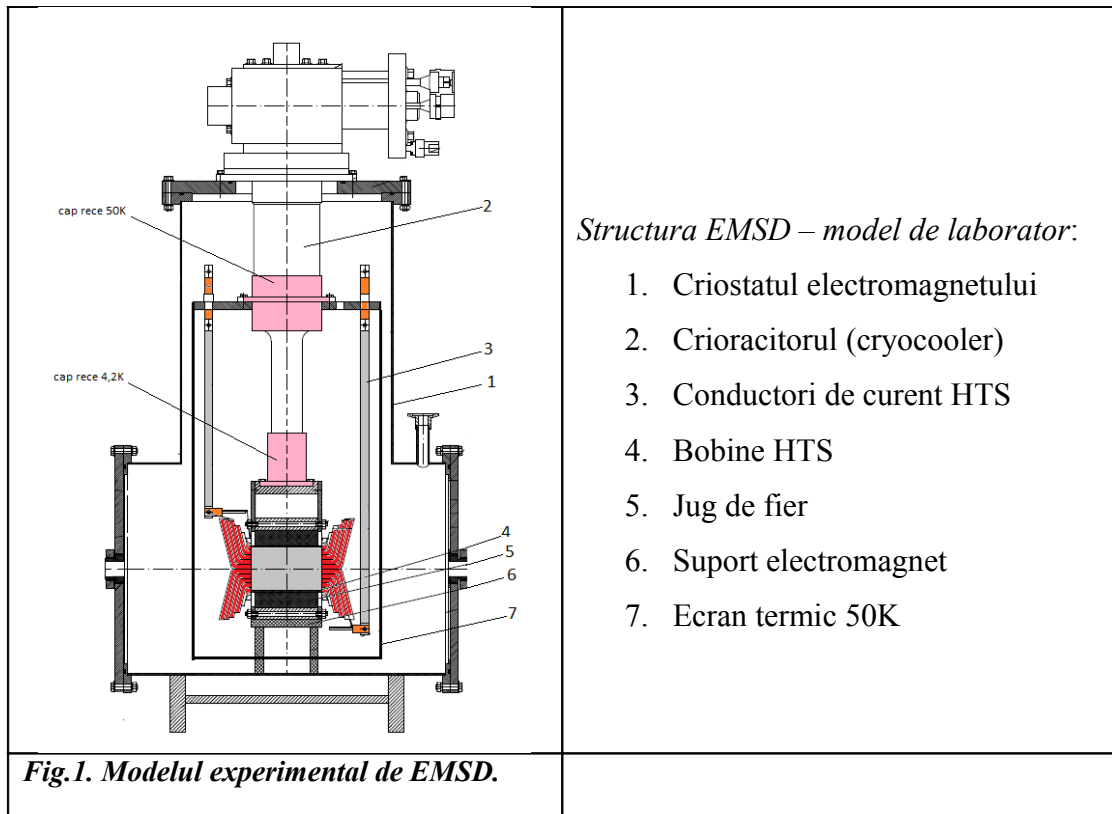
(Coordonator- Co)

- Proiectare generala model experimental de EMSD si a sistemelor conexe (criostat, bobine supraconductoare, sistem criogenic).
- Realizare generala model experimental de EMSD : criostat pentru electromagnet.

1.1. Proiectare generala model experimental de EMSD

1.1. 1. Descriere model experimental de EMSD

Modelul experimental de electromagnet supraconductor generator de camp magnetic intens si uniform (fig.1.) are urmatoarea componenta:



Criostatul electromagnetului, are rolul de a izola termic ansamblul electromagnet – crioracitor si conductori de alimentare HTS de mediul ambiant aflat la temperatura camerei (300K). Ansamblul de bobine HTS trebuie racite la o temperatura de 10-20K. Totodata intregul ansamblu trebuie sustinut mecanic (crioracitor, ansamblul de bobine supracondutoare, etc.). Din aceste motive, criostatul este realizat din otel inoxidabil austenitic.

Crioracitorul are rolul de a raci ansamblul de bobine supraconductoare la un nivel de 10-20K. Acesta este de tip Gifford-McMahon, cu ciclu inchis si doua trepte de racire: treapta I la 50K si treapta a II-a, la 4,2K. La treapta II de racire este cuplat ansamblul de bobine HTS impreuna cu Jugul de fier exterior bobinelor. La treapta I de racire, este cuplat ecranul termic (7).

Conductorii de curent HTS au rolul de a permite alimentarea electrica a bobinelor HTS, dar cu conductie termica minima catre ansamblul de bobine pentru a nu contribui la ridicarea temperaturii acestora. Sunt realizati din banda supraconductoare HTS si plasati intr-o carcasa izolatoare cilindrica.

Bobinele HTS vor fi realizate in conformitate cu modelarea numerica obtinuta in etapa 1/2014. De forma „stadion” si cu capetele „indoite”, astfel incat planul capetelor bobinelor sa realizeze o inclinare de min 15 gr. Fata de axul planului de realizare al bobinei. Realizate din banda HTS de tip YBCO, de 6mm latime si 0.11 mm grosime.

Jugul de fier, are rolul de a ecrana magnetic ansamblul de bobine supraconductoare. Va fi realizat din tole cu grosime de 0,50 mm, pentru a se evita existenta unui camp magnetic “parazit” in afara electromagnetului.

Suportul electromagnetului, are rolul de a fixa „in pozitie” bobinele supraconductoare. Datorita fortelor electromagnetice de interactie, acestea trebuiesc rigidizate pentru a nu se produce deplasari accidentale alae acestora. Materialul de relizare este izolator electric, rigid mecanic (de tip sticlotextolit) asa numitul material G10 pentru utilizare la temperaturi joase.

Ecranul termic are rolul de a ecrana bobinajul supraconductor de radiatia termica a criostatului (300K). Radiatia termica catre bobinele supraconductoare este redusa substantial prin aplicarea acestui ecran termic intre carcasa criostatului si bobinele supraconductoare, cuplat la temperatura de 50K a crioracitorului. El va fi realizat din cupru lustruit.

1.1.2. Calcule de dimensionare

1.1.2.1. Bobinele supraconductoare

In conformitate cu modelarea numerica realizata in cadrul etapei 1/2014, bobinajul supraconductor al electromagnetului va fi alcatuit din 7 +7 bobine dispuse intr-o configuratie de tip cos – teta, care permite obtinerea unui camp magnetic dipolar de maxima uniformitate in zona centrala (fig.2).

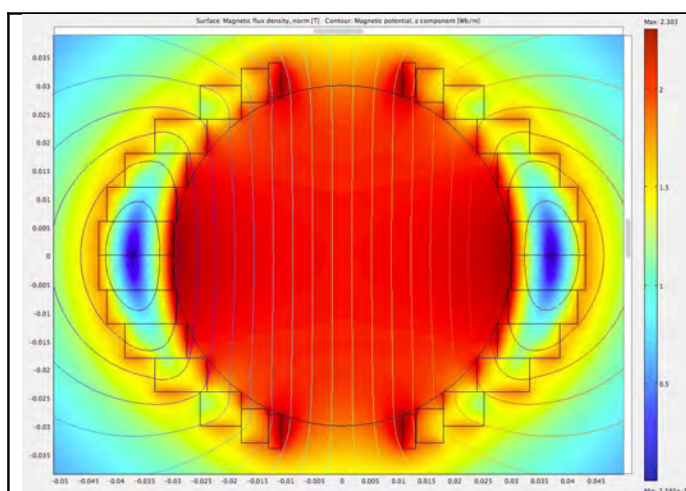


Fig.2. Modelarea numerica a campului magnetic generat de electromagnet.

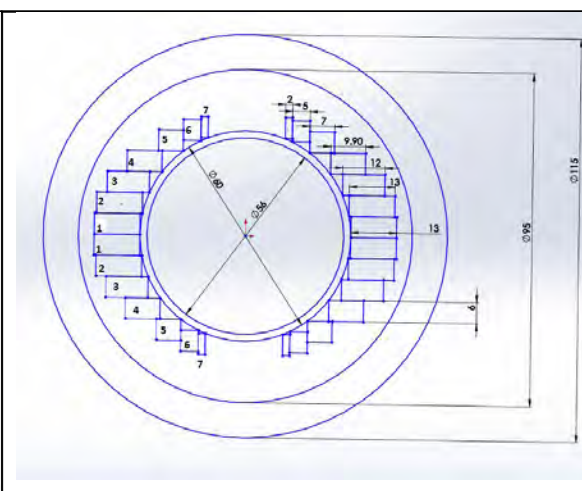


Fig.3. Schema de distribuire a bobinelor HTS (7 +7)

Tabel 1. Caracteristicile bobinelor HTS

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

Tabel 2. Materialul HTS (banda supraconductoare) – caracteristici

Tip banda	Curent critic@77K (A)	Latime banda (mm)	Grosime banda (mm)	Diametru minim indoire (mm)
SCS 6050	150	6	0,10	11

Caracteristicile benzii HTS in camp magnetic extern:

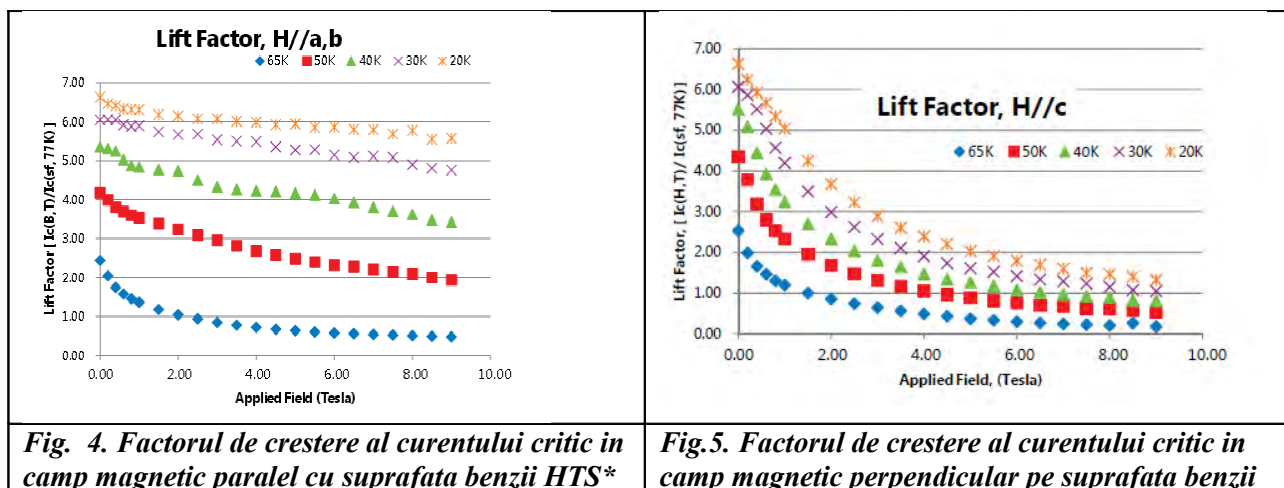


Fig. 4. Factorul de crestere al curentului critic in camp magnetic paralel cu suprafata benzii HTS*

Fig.5. Factorul de crestere al curentului critic in camp magnetic perpendicular pe suprafata benzii

SuperPower*[1]

Banda supraconductoare HTS produsa de compania SuperPower Inc. Din SUA, prezinta cele mai ridicate performante de ale curentului critic in camp magnetic extern. Din fig. 4 si 5, se poate observa cresterea curentului critic cu scaderea temperaturii de lucru a materialului. Astfel, pentru camp magnetic aplicat perpendicular pe suprafata benzii HTS (fig.5), se constata o valoare a curentului critic de cca. 3x mai mare decat $I_c @ 77K$., pentru un camp extern de 3T si temperatura a bobinajului supraconductor de 20K. Din tabelul 2 constatam ca la 77K, I_c este de 150A. Astfel, la 20K si 3T camp extern, I_c creste la cca. 450A!. Dar curentul de operare al unui supraconductor, de obicei se situeaza in zona de 0,6 – 0,7 I_c , ceea ce conduce la un curent maxim de operare de cca. 270A.

1.1.2.2. Sistemul criogenic de racire

Sistemul criogenic de racire al bobinelor supraconductoare este alcatuit din principal din crioracitorul utilizat in locul agentilor criogenici. Acesta este un criocooler cu ciclu inchis si doua trepte de racire (50K si 4,2 K), de tip Gifford- McMahon. Se va utiliza un crioracitor de la firma Sumitomo [2], de tip RDK 415D.

1.1.2.3. Calculul sarcinilor termice ale crioracitorului

Pentru calculul sarcinilor termice ale celor doua trepte de racire ale crioracitorului, au fost luate in calcul cele doua mecanisme dominante de conductie a caldurii din exteriorul criostatului catre sistemul de bobine HTS si crioracitor: conductia termica prin solide si conductia termica radiativa, date de binecunoscutele legi ale lui Fourier (1) si respectiv Stefan-Boltzmann (2)

Fluxuri termice conductive

Pentru calculul fluxului de caldura prin conductie s-a folosit urmatoarea formula:

$$\dot{q}_{cond} = \frac{A}{L} * \int_{T_1}^{T_2} \lambda(T) dT = \frac{A}{L} * \left\{ \int_{4K}^{T_2} \lambda(T) dT - \int_{4K}^{T_1} \lambda(T) dT \right\} \quad (1)$$

unde,

$\dot{q}_{cond}$ – fluxul de caldura conductiv

A – aria sectiunii transversal

L – lungimea

$\lambda(T)$ – conductivitatea termica dependenta de temperatura

Fluxuri termice radiative

Pentru calculul fluxului de caldura prin radiatie s-a folosit urmatoarea formula:

$$q_r = \varepsilon_r * \sigma * (T_{wm}^4 - T_{cl}^4) \quad (2)$$

unde,

q_r – fluxul de caldura radiativ

ε_r – emisivitatea totala la temperature T

σ – constanta Stefan-Boltzmann

Luarea in calcul a tuturor contributiilor termice corespunzatoare celor doua trepte de racire, a condus la urmatoarele rezultate:

- Treapta I de racire (50K): 15,76 W (fara contributia conductorilor de cupru)
- Contributia conductorilor de cupru: 24,00 W
- Total treapta I de racire: 39,76 W**
- Total treapta a II-a de racire (4,2K): 6,94 W**

Scopul acestor calcule termice il constituie necesitatea stabilirii conditiilor de functionare ai crioracitorului. In tabelul 3 sunt redate caracteristicile principale ale acestuia, iar in figura 6, curbele de sarcina ale acestuia. Mentionam ca acest crioracitor, este produs de firma Sumitomo Cryogenics Inc., si este de tip Gifford-Mc Mahon, cod: RDK 415D.[2]

Tabel 3. Performantele crioracitorului RDK 415D

Frecventa sursei de alimentare(Hz)	50
Putere de racire la 4.2K (W)	1,5
Puterea de racire la 50K (W)	35

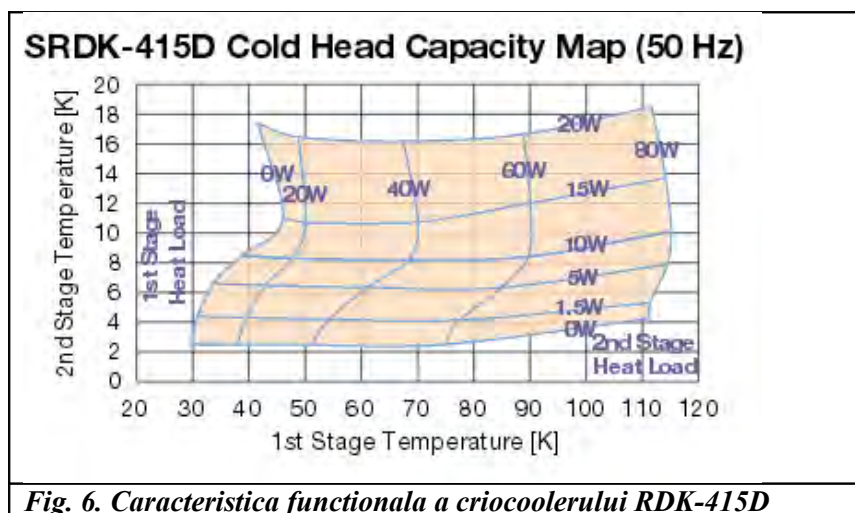


Fig. 6. Caracteristica functionala a crioracitorului RDK-415D

Din analiza datelor obtinute, va rezulta o temperatura maximala de lucru pentru cele doua trepte de racire, dupa cum urmeaza: Treapta I, va avea o temperatura de cca 60K iar treapta a II-a, o temperatura de circa 7K, ceea ce asigura o functionare a sistemului intr-un regim termic *adecvat* mentinerii unor parametri functionali *maximali* pentru bobinele supraconductoare HTS.

1.1.2.4. Conductorii de curent HTS

Proiectarea conductorilor de curent HTS incepe de la parametrii functionali care trebuie realizati:

- curentul maxim de transport catre bobinele HTS
- Fluxul termic minim transmis catre bobinele HTS.

Conductorii de curent HTS vor fi realizate din banda HTS de 12 mm latime (banda YBCO), produsa de firma SuperOx [3] . Pentru a acoperi in siguranta curentul de 300 A, vor fi montate doua bucati de banda in paralel. Benzile HTS vor fi protejate de o izolatie tubulara G10, ca in Fig. 7.



Fig. 7. Forma si dimensiunile conductorului de curent HTS

Fluxul termic transportat de conductorul de curent asamblat este mai mic de 0,10 W pentru temperaturile de operare de la capete de 50 K si respectiv 4,2 K.

Dimensiunile acestora sunt:

- lungime: 200-300 mm
- diametrul exterior cacasa: 16 mm
- banda HTS de 12mm latime

1.2. Desene de executie.

Conform etapei 2/2015 la prezenta tema de cercetare, s-au realizat si desenele de executie ale electromagnetului supraconductor (EMSD). Astfel au fost realizate desene de executie pentru partile componente ale electromagnetului supraconductor si ale subansamblelor acestora.

1.2.1. Ansamblul general al EMSD – 00.00 (fig. 8)

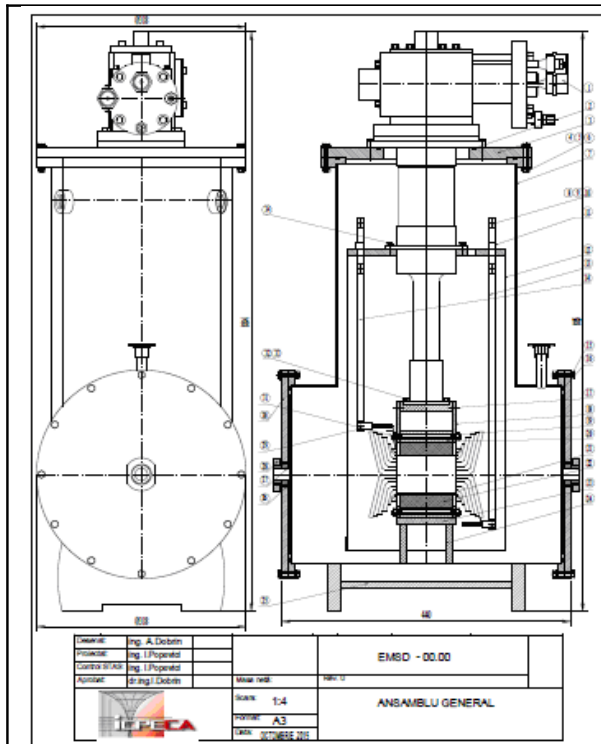


Fig.8. Ansamblul general electromagnet supraconductor dipolar.

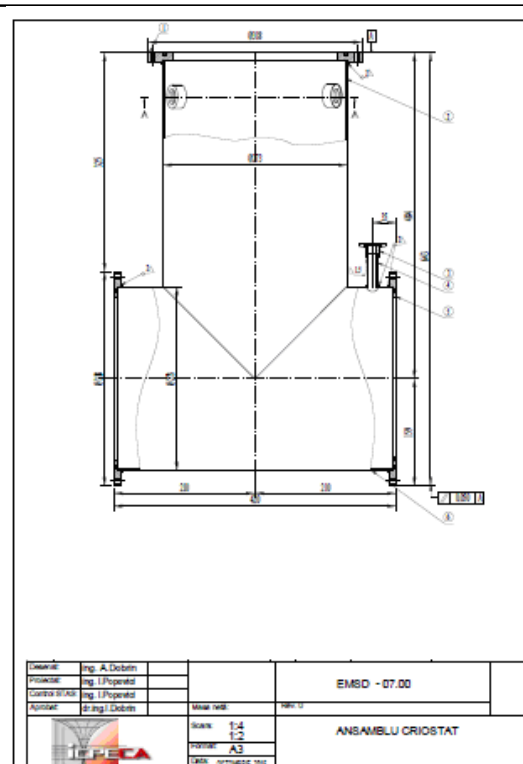


Fig.9. Ansamblul criostat

1.2.2. Ansamblu Criostat EMSD- 07.00 (figura 9).

1.2.3. subansamblul conductori HTS EMSD- 13.00 (figura 10)

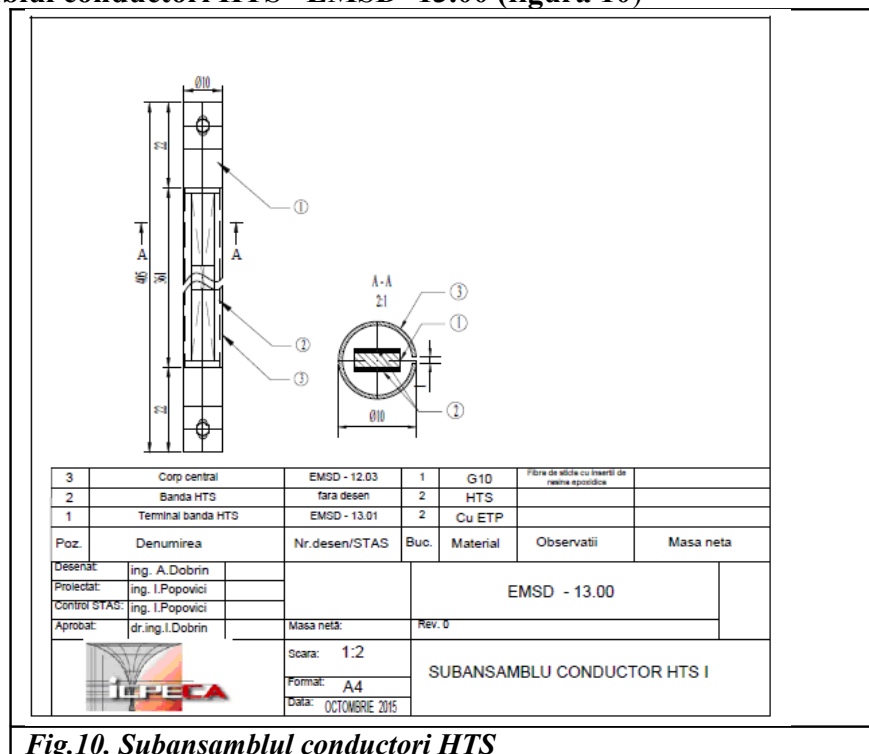
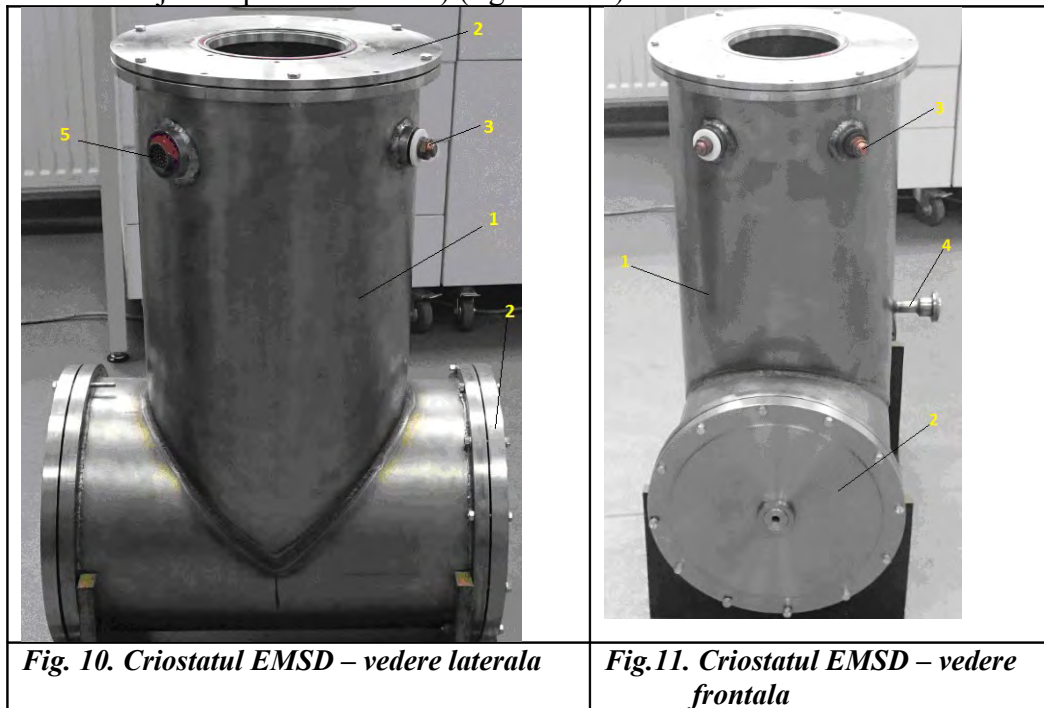


Fig.10. Subansamblul conductori HTS

1.3. Executie criostat

In cadrul etapei actuale, a fost executat criostatul electromagnetului supraconductor – model experimental. Acesta este compus din corp criostat si flanse de inchidere la capete. Totodata este dotat cu doua „stuturi” pentru trecerile de curent si un stut pentru cuplarea acestuia la un agregat de vid in scopul vidarii. De asemeni este prevazut si cu un orificiu pentru fixarea unei mufe pentru conductorii de semnal proveniti de la electromagnet (senzori de temperatura si senzori pentru tensiunile mecanice din bobinajule supraconductoare) (fig.10 si 11).



1- Corp criostat, 2- Flanse capete, 3- Trecere de curent, 4- Stut de vidare, 5- Mufa conductori senzori.

1.4. Concluzii la Capitolul 1

In cadrul etapei 2/2015, au fost realizate de catre Coordonator, urmatoarele:

1. Proiectare generala model experimental de EMSD

- Calcule de dimensionare elemente constructive:

- bobine supraconductoare,

- sistemul criogenic de racire (sarcinile termice rezultate din dimensiunile constructive si conductorii HTS de alimentare ai bobinelor supraconductoare)

- conductorii de alimentare electrica HTS

2. Desenele de executie:

- ale ansamblului magnet supraconductor dipolar (EMSD)- model experimental cod EMSD- 00.00)

- ansamblu criostat pentru EMSD cod EMSD- 07.00

- Subansamblul conductori HTS, cod EMSD – 13.00

Toate reperele conexe implicate de ansamblurile generale mentionate.

3. Realizare generala model experimental de EMSD: criostatul pentru electromagnetul supraconductor dipolar.

In concluzie, toate obiectivele care revin Coordonatorului in cadrul prezentei etape, au fost realizate.

Bibliografie la Capitolul 1

1. SuperPower Inc., <http://www.superpower-inc.com/>
2. Sumitomo cryogenics, <http://www.shicryogenics.com/>
3. SuperOx, <http://www.superox.ru/en/>

CAPITOLUL 2.

(Partener P1)

Proiectarea sistemului de masura si mapare 3D a campului magnetic – model experimental

2.1. Prezentarea sistemului de masura

Modelul conceptual care a fost dezvoltat impreuna cu coordonatorul din cadrul acestui proiect si care a stat la baza proiectarii este prezentat in figura 1:

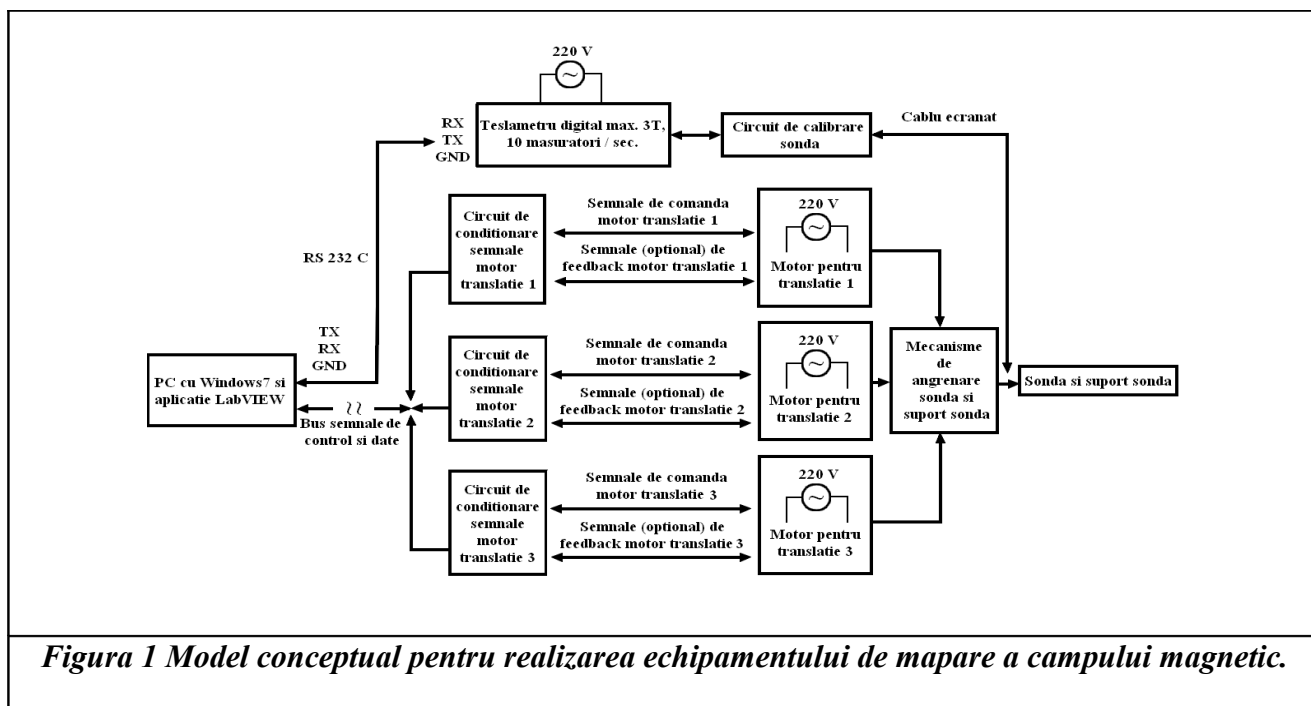


Figura 1 Model conceptual pentru realizarea echipamentului de mapare a campului magnetic.

Acest model este compus din urmatoarele echipamente/subsisteme:

- 1) un teslametru care inregistreaza variatia campului magnetic cu o microsonda Hall;
- 2) sisteme de miscare pentru cele 3 axe spatiale care asigura miscarea de translatie a sondei in campul magnetic al magnetilor investigati.
- 3) aplicatie Software

Prezentam in continuare principalele caracteristici ale componentelor identificate anterior si modul in care sunt incluse in proiectul de realizare a maparii distributiei spatiale a campului magnetic:

2.1.1. Teslametrul digital

Teslametrul digital cu microsonda Hall este de tip “Group 3” [1]. Schimbarea tipului de teslametru este posibila, sistemul proiectat fiind scalabil. De asemenea, se pot adauga mai multe microsonde pentru o citire mai rapida a distributiei spatiale a campului magnetic.

Performantele care au stat la baza alegerii acestui tip de teslametru, prevazute de modelul conceptual sunt:

- un domeniu de masura a densitatilor de flux magnetic cuprins intre 0 si 3T, cu o precizie de 1 parte la 60000 (0,01% + 0,006% Cap Scala) si indicarea polaritatii.
- sonda va fi calibrata pentru variatiile de temperatura (10ppm/C) si câmp magnetic printr-un circuit electronic specializat.
- modul de masura de tip AC al teslametrului poate prezenta câmpurile magnetice variabile in timp, având o frecventa cuprinsa intre 8 Hz si 3000 Hz.
- filtrarea de tip digital a teslametrului va putea suprima fluctuatiile nedorite.
- rata maxima de masurare a câmpului magnetic va fi de 10 masuratori pe secunda
- comunicarea cu PC-ul se va face prin linie seriala tip RS 232C.
- sonda va fi conectata la teslametrul digital printr-un cablu ecranat pus la masa si un circuit de

calibrare.

- exista doua tipuri de sonde (figura 2) care sunt diferențiate prin aria activa si vor permite maparea câmpului magnetic la diferite rezoluții in intervale de timp de baleiaj diferite.
- suportul sondei va fi realizat dintr-un material rigid care sa permită un baleiaj precis fara a fi influențat de câmpul magnetic (e.g. textolit, plexiglass) înconjurător.

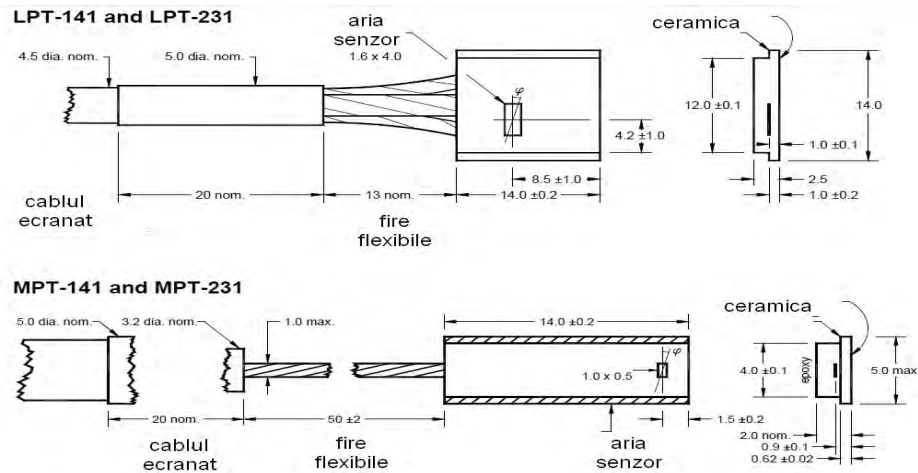


Figura 2 Desene de executie pentru microsonde Hall.

2.1.2. Sistemul de miscare in trei axe

Sistemul de miscare [2] este bazat pe sine de translatie care asigura deplasarea pe cele trei axe spatiale (figura 3).

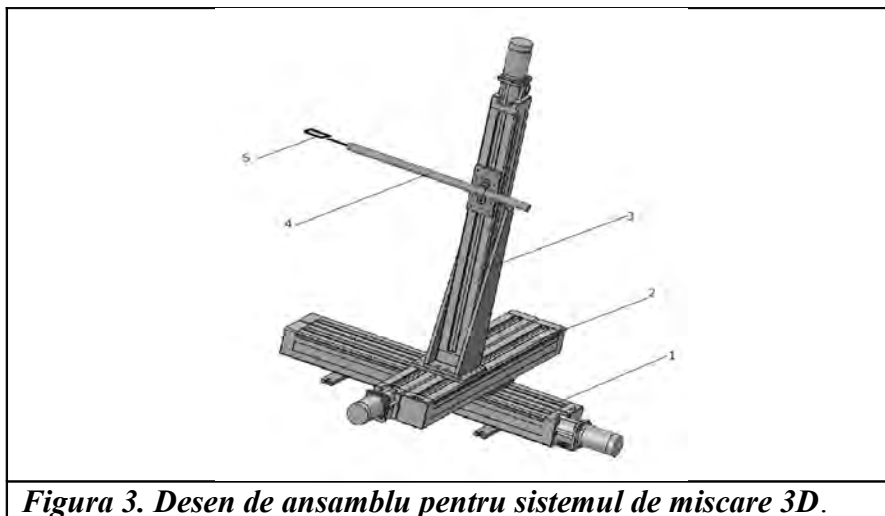


Figura 3. Desen de ansamblu pentru sistemul de miscare 3D.

Componenta:

1. Sistem de translatie Ox
2. Sistem de translatie Oy
3. Sistem translatie Oz
4. Bratul sondei Hall
5. Sonda Hall

Pentru executia sistemului de translatie din figura 3 se vor utiliza doua tipuri de sine, prezentate in figura 4 si figura 5. Principalii parametrii de pozitionare care caracterizeaza translatia mecanica a acestui sistem sunt:

- sarcina mecanica 10Kg pe verticala, 60Kg in plan orizontal
- posibilitate de extindere pana la 3m prin inlocuirea sinei orizontale.
- rezolutia in "full step" a sinei este de ~12,5 microni cu posibilitatea de demultiplicare cu 1/8.

- viteza maxima a miscarii de translatie este de 40mm pe secunda pe orice axa.
- franarea electromagnetica pe axa Z (verticala), astfel incat se mentine pozitia chiar daca se pierde alimentarea electrica de la retea. Se pot realiza profile 1D, 2D sau 3D cu aceasta facilitate.

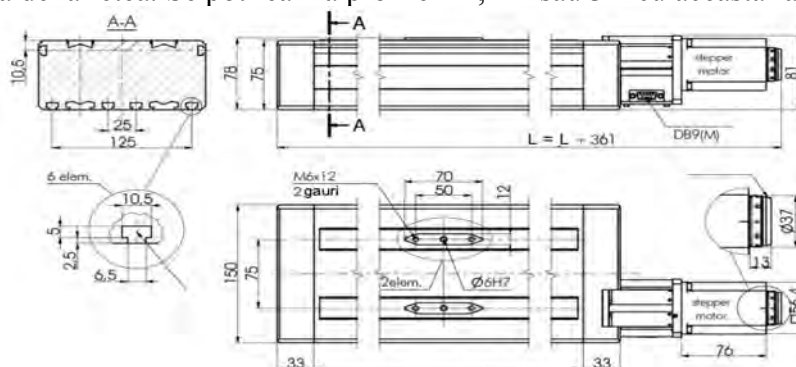


Figura 4. Sina de translatie (au fost folosite doua) care asigura translatia in planul orizontal (x,y).

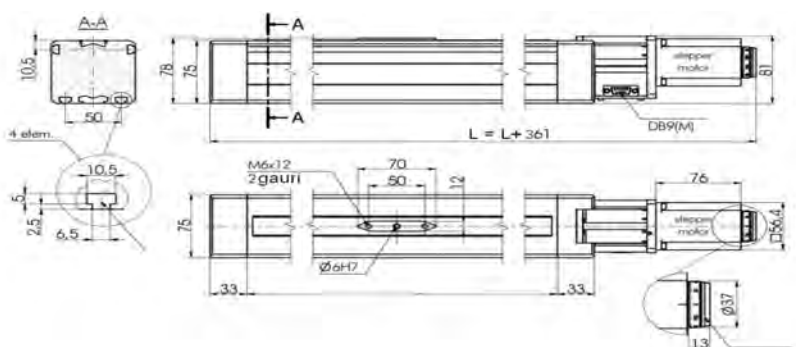


Figura 6. Sina de translatie pentru miscarea pe axa verticala (Z), prevazuta cu franare electromagnetica.

2.1.3. Aplicatia software

Aplicatia software a fost scrisa in LabVIEW (figura 6) si rezolva urmatoarele obiective:

- asigura miscarea coordonata pe cele trei axe
- asigura citirea valorilor campului magnetic
- reprezinta grafic valorile campului magnetic in functie de profilul de mapare ales (1D, 2D, 3D)
- memoreaza pe hard disc valorile campului magnetic si pozitiile spatiale corespunzatoare citirii campului magnetic.
- asigura oprirea de urgenta a procesului de mapare fara pierderea de date sau schimbarea brusca a pozitiilor sistemului de mapare cu sonde Hall.

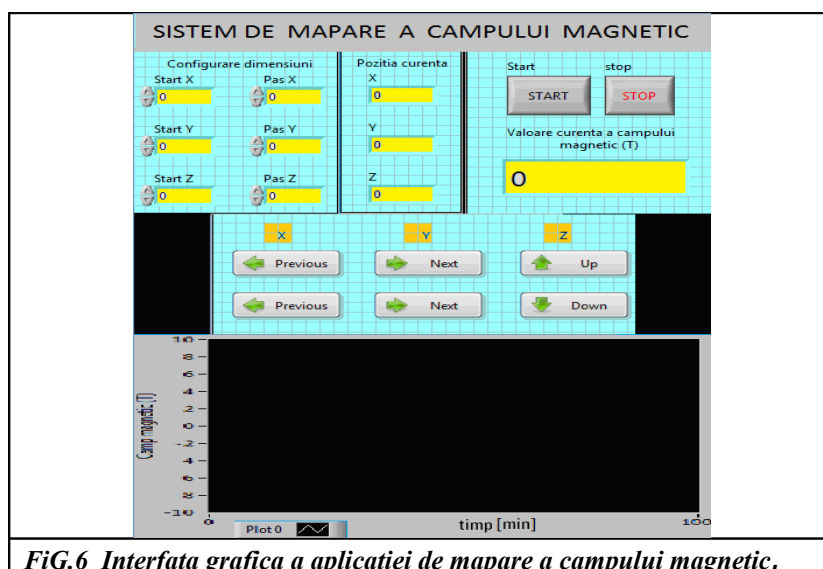


FIG.6 Interfata grafica a aplicatiei de mapare a campului magnetic.

2.2. Concluzii la capitolul 2

În cadrul etapei prezente, a fost proiectat un sistem de masura a campului magnetic generat de magnetul supraconductor, alcatuit din:

- Teslametru digital
- Sonda Hall
- Sistem de translatie mecanica in 3 axe pentru sonda Hall
- Aplicatie software (Labview) pentru actionarea sistemului mecanic de deplasare si inregistrarea valorilor masurate punctual de sistemul de masura.

Parametrii functionali ai sistemului sunt:

- Domeniul de masura a campului magnetic 0 - 3 T
- Precizia de masura slametrului: 0.01 %
- Viteza de masurare: 10 masurari /s
- precizia de masura a sondei Hall: 10^{-3}
- sarcina maxima 3 Kg;
- excursia 30 cm
- precizie pozitionare +/- 10 microni
- repetabilitatea pozitionare +/- 0,5 microni
- viteza maxima 50mm/secunda
- franare electromagnetica

Bibliografie la Capitolul 2

1. Group 3, Magnetometry, <http://www.group3technology.com/>
2. Standa systems, www.standa.lt

CAPITOLUL 3

(Partener P2)

Proiectare sistem de masura a tensiunilor mecanice din bobinajul supraconductor al EMSD

3.1. Aspecte generale

În această etapă de cercetare a fost dezvoltat un sistem de achizitie dedicat măsurării forțelor și temperaturilor folosind ca senzori mărci tensometrice și termocupluri, bazat pe o configurație hardware alcătuită dintr-un multimetru digital conectat la un multiplexor și o aplicație software destinată controlului sistemului hardware și achizitei, procesării și stocării datelor măsurate.

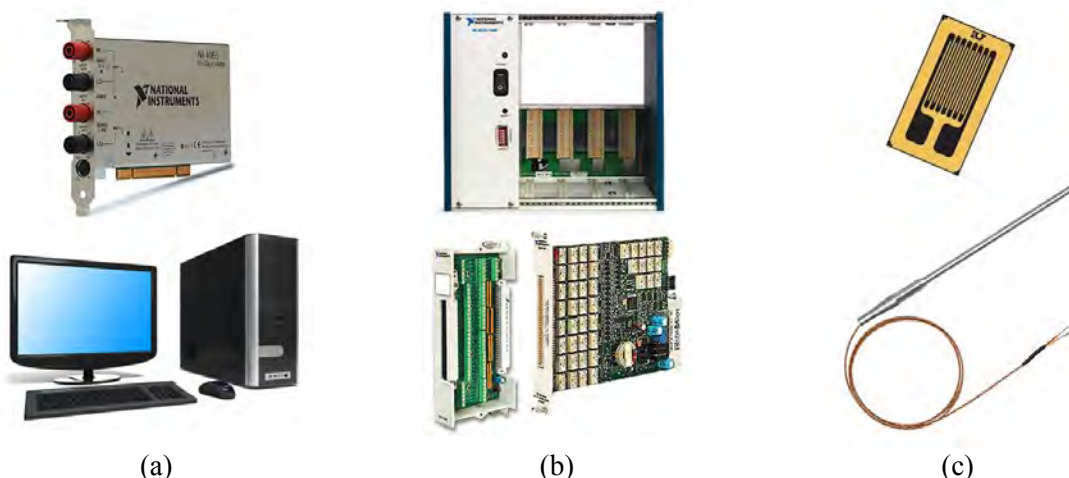


Fig. 1. Elemente componente ale sistemului de măsură și achiziție: multimetrul digital conectat la un port PCI al unui sistem de calcul de tip PC (a), șasiul cu multiplexor și bloc de terminale (b) pentru conectarea senzorilor de forță și temperatură (c).

Sistemul de măsură și achiziție are în componența sa un multimetru digital conectat la un port PCI al unui PC (Fig. 1,a). Multimetrul comunică prin intermediul unui cablu de tip HV8-BAN4 și unul de tip SH9MD-AUX pentru transmiterea semnalelor digitale, precum triggerele TTL, cu un sertar care conține multiplexorul și blocul de terminale (Fig. 1,b). Acestea din urmă permit conectarea unui număr maxim de 64 de senzori pentru măsurători cu un fir, 32 de senzori pentru măsurători cu două fire (cu separare galvanică) și 16 senzori pentru măsurători de mare precizie, cu 4 fire de măsură, utilizând o punte Kelvin. În acest caz se vor folosi senzori de temperatură și forță (termocupluri și mărci tensometrice) destinați aplicațiilor de tip crio care presupun temperaturi de lucru foarte joase (apropiate de 0 K).

3.2. Sistemul hardware de masura si achiziție

Sistemul de măsură și achiziție a datelor propus este dezvoltat utilizând un echipament hardware proiectat și realizat de National Instruments. Măsurarea forțelor și a temperaturilor se referă la măsurarea unor variații de rezistență electrică, pentru senzorii de forță, și a unor variații de tensiuni electrice (termoelectromotoare), pentru senzorii de temperatură. Sub acțiunea unor solicitări mecanice respectiv a unui gradient de temperatură, valoarea nominală a mărimii caracteristice senzorului (rezistență sau tensiune electrică) se modifică, permițând corelarea prin calcul a valorii acesteia cu o anumită valoare de temperatură respectiv forță. Pentru măsurarea variațiilor de rezistență și tensiune este utilizat un multimetru digital NI-4065 [1] conectat la portul PCI al unui calculator (Fig. 1, a). Multimetrul NI-4065 poate fi folosit ca atare, sau poate fi utilizat ca multimetru digital integrat, independent, conectându-l la “obiectul” investigat (Fig. 4, elementul 1). În această situație, ca interfață software se folosește aplicația NI-DMM Soft Front Panel [2] dezvoltată pentru multimetrul NI-4065, cu ajutorul care permite afișarea valorii instantanee, măsurată după selectarea modului de lucru, a scării de măsură și a rezoluției dorite (Fig. 2).

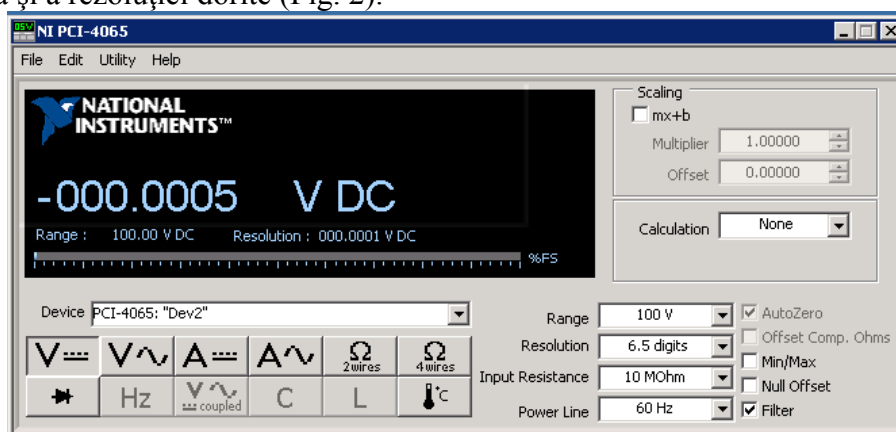


Fig. 2. Aplicația NI-DMM Soft Front Panel 14.0 dezvoltată de National Instruments pentru utilizarea multimetrului NI-4065 ca dispozitiv integrat.

Pentru măsurarea mărimii corespunzătoare unei configurații alcătuită dintr-o matrice de senzori este necesară introducerea unui multiplexor și a unui bloc de terminale. În acest caz s-a optat pentru soluțiile NI SCXI-1331 [3] (bloc de terminale, Fig. 4, elementul 2) și NI SCXI-1127 [4] (multiplexor, switch cu relee pentru un număr maxim de 64 de canale de măsură, Fig. 4, elementul 3) conectat la cel de-al patrulea slot al sertarului NI SCXI-1000 [5] (Fig. 4, elementul 4) destinat gestionării modulelor SCXI.

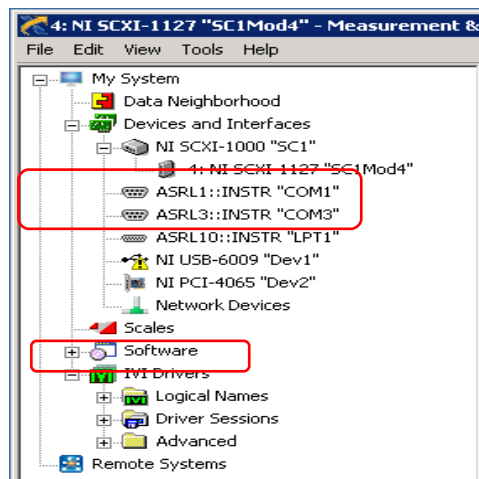


Fig. 3. Verificarea stării componentelor sistemului de măsură și achiziție a datelor.

Instalarea corectă a componentelor sistemului de măsură și achiziție se verifică apelând la aplicația NI-MAX (Measurement and Automation Explorer), pentru consultarea stării device-urilor produse de National Instruments, conectate la PC-ul de lucru. Tot în cadrul acestei aplicații se pot depana eventualele probleme care ar putea apare în sistem și se pot configura diverși parametri ai dispozitivelor instalate.

3.3. Aplicatia software dedicata masurarii si achizitiei de date

Pentru controlul și comanda echipamentelor hardware din componența sistemului de măsură și achiziție a datelor provenite de la tensiunile mecanice din bobinajele supraconductoare. Astfel, s-a dezvoltat în mediul LabVIEW 2011 [6] (versiunea 11.0.1f2, SP1, 32 biți) o aplicație care rulează pe sistemul de calcul la care este conectat hardware-ul de achiziție. Aplicația (Fig. 5, 6) servește la:

- configurarea parametrilor sistemului de măsură,
- măsurarea variațiilor rezistenței sau tensiunii electrice corespunzătoare unei configurații cunoscute de senzori de forță și temperatură,
- conversia mărimii electrice măsurate (rezistență sau tensiune electrică) în mărimea corespunzătoare senzorilor folosiți (temperatură, forță) și afișarea acestuia,
- achiziția datelor și stocarea lor într-un fișier text (format *.txt).

Aplicația a fost dezvoltată folosind bibliotecile NI-DMM [7] și NI-SWITCH [8] ale paletelor de funcții a LabVIEW dedicate configurării și exploatării multimetrului și multiplexorului la care sunt conectați senzorii de forță și temperatură.

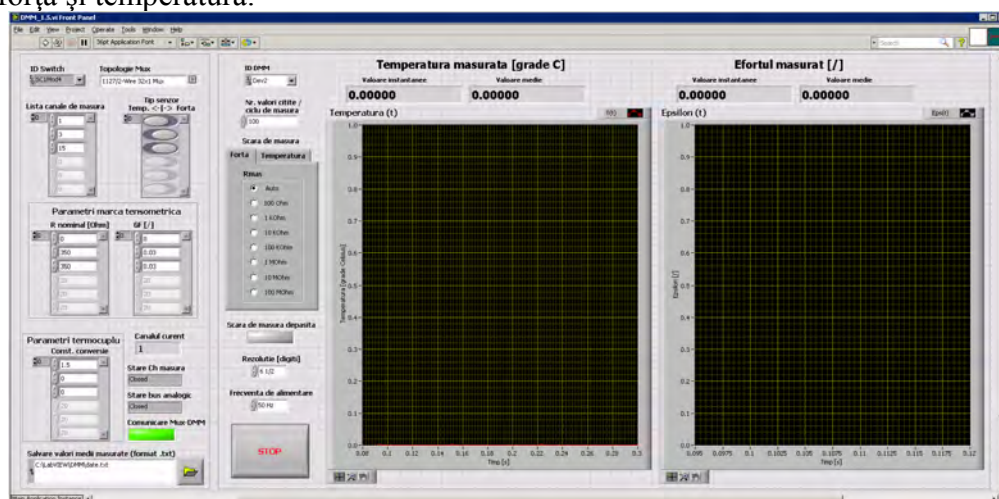


Fig. 5. Aplicația LabVIEW destinată măsurării și achiziției datelor.

3.4. Concluzii la capitolul 3

În această etapă de lucru **a fost realizata:**

- proiectarea unui sistem de măsură și achiziție a datelor corespunzătoare forțelor din bobinajele supraconductoare și a temperaturilor din domeniul criogenic. Performante ale acestui sistem:

- precizie (rezoluție de 6 digiți)
- viteză mare de achiziție a datelor măsurate (10 eşantioane/sec, la rezoluție maximă).

Sistemul este dezvoltat pe baza unui multimetru digital PCI și a unui multiplexor, care permite conectarea și scanarea unui număr maxim de 64 de senzori.

- Comanda și controlul sistemului hardware și pentru achiziția, procesarea și stocarea datelor măsurate a fost dezvoltată o aplicație în mediul de programare LabVIEW.

Sistemul de măsură și achiziție a forțelor și temperaturilor va fi utilizat în corelație cu rezultatele obținute prin modelare matematică și simulare numerică a câmpului electromagnetic și stării de încărcare structurală, care oferă informații despre solicitările mecanice (niveuri și distribuție spațială) generate de forțele electrodinamice care apar în configurația bobinelor supraconductoare.

Bibliografie la Capitolul 3

- [1] NI DMM-4065, National Instruments Corporation, <http://www.ni.com/pdf/manuals/374315g.pdf>
- [2] NI-DMM Soft Front Panel 14.0, National Instruments Corporation, <http://www.ni.com/download/ni-dmm-14.0/4820/en/>
- [3] NI SCXI-1331, National Instruments Corporation, <http://www.ni.com/pdf/manuals/320515f.pdf>
- [4] NI SCXI-1127, National Instruments Corporation, http://www.ni.com/pdf/products/us/4sw486-487_502.pdf
- [5] NI SCXI-1000, National Instruments Corporation, http://www.ni.com/pdf/products/us/4scxisc333_334_335_336.pdf
- [6] LabVIEW 2011 SP1 (32 bit), National Instruments Corporation, <http://www.ni.com/download/labview-development-system-2011-sp1/2871/en/>
- [7] NI-DMM 14.0, National Instruments Corporation, <http://www.ni.com/download/ni-dmm-14.0/4820/en/>
- [8] NI-SWITCH 14.0, National Instruments Corporation, <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/ro/nid/13621>
- [9] Strain Gauge Measurement – A Tutorial, Application Note 078, National Instruments Corporation, 1998.
- [10] <https://en.wikipedia.org/wiki/Thermocouple>
- [11] Cryogenic Temperature Strain Gauge, Tokyo Sokki Kenkyujo Ltd., http://www.tml.jp/e/product/strain_gauge/catalog_pdf/CF_CEFseries.pdf
- [12] General Purpose Strain Gages - Linear Pattern, Vishay Precision Group, USA, <http://www.vishaypg.com/docs/11079/062ap.pdf>
- [13] Type T Thermocouple, Reotemp Instrument Corporation, <http://reotemp.com/thermocoupleinfo/pdf/type-t-thermocouple-reference-table.pdf>

CAPITOLUL 4.

(Partener P3)

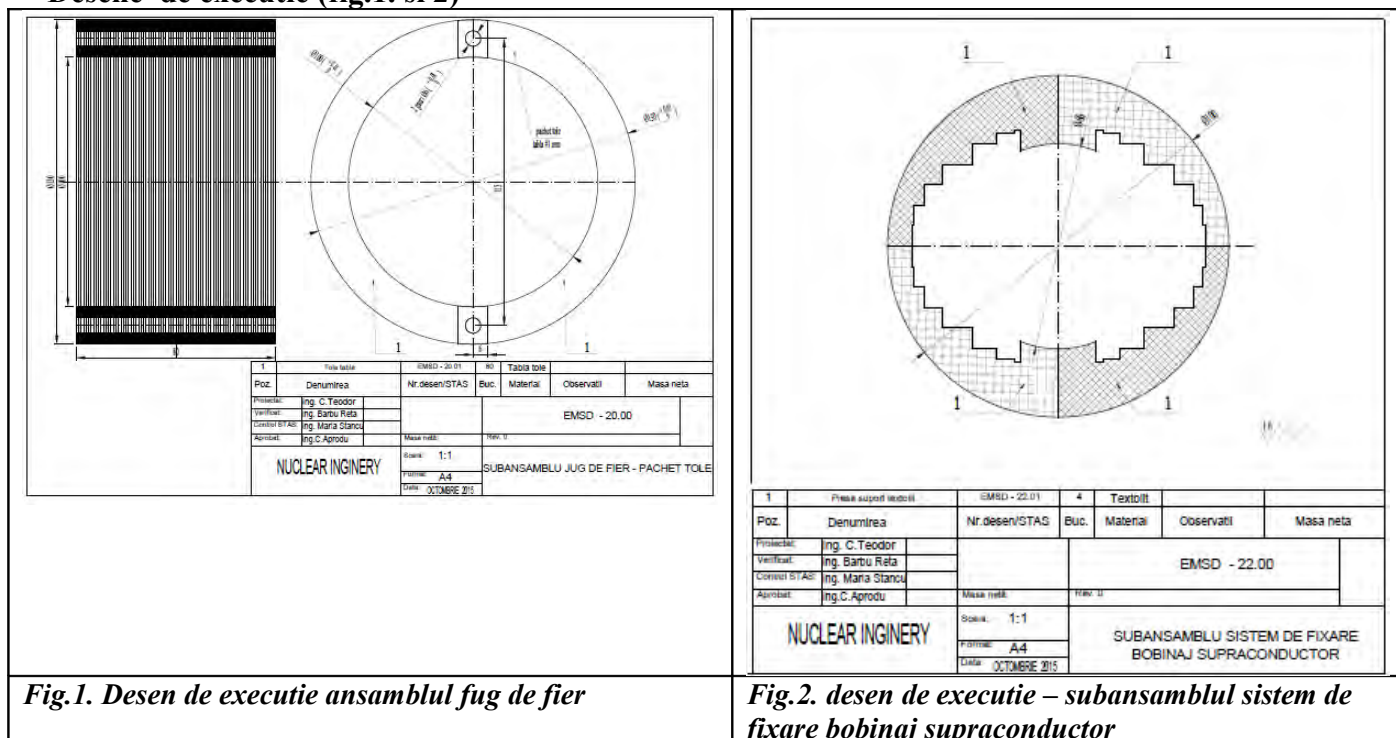
Proiectare jug de fier si sistem mecanic de fixare a bobinajului supraconductor .

Proiectare dispozitiv de executie cilindrica a bobinajelor supraconductoare HTS.

Realizare dispozitiv de executie bobinaj supraconductor

4.1. Proiectare jug de fier si sistem mecanic de fixare a bobinajului supraconductor .

Desene de executie (fig.1. si 2)



4.2. Proiectare dispozitiv de executie cilindrica a bobinajelor supraconductoare HTS.

Desene de executie

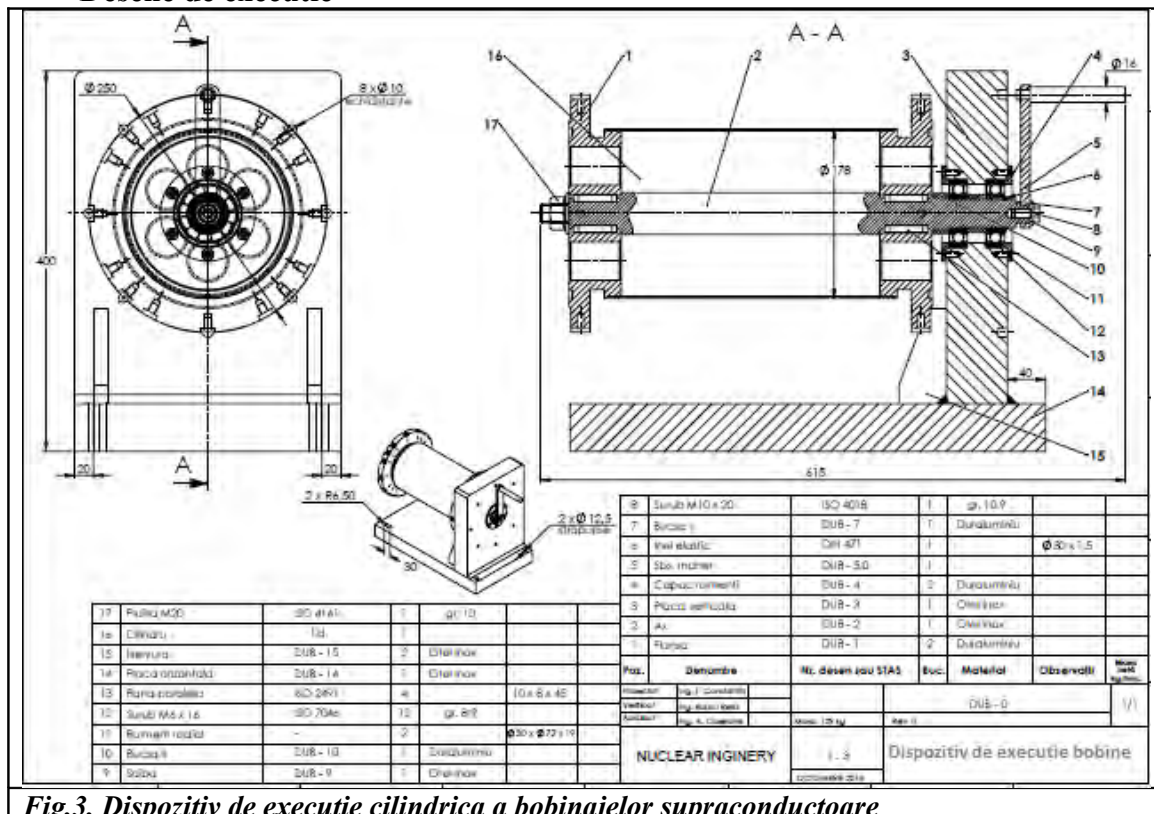


Fig.3. Dispozitiv de executie cilindrica a bobinajelor supraconductoare

4.3. Realizare dispozitiv de executie bobinaj supraconductor (fig. 4-7)

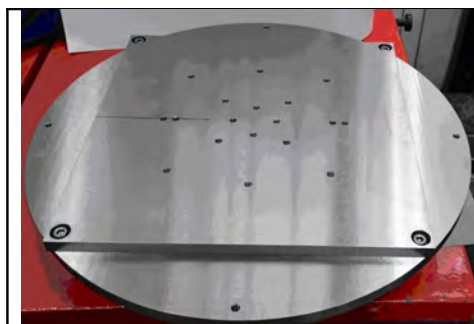


Fig. 4. Vedere de sus a dispozitivului rotitor pentru realizare bobinaje supraconductoare planare

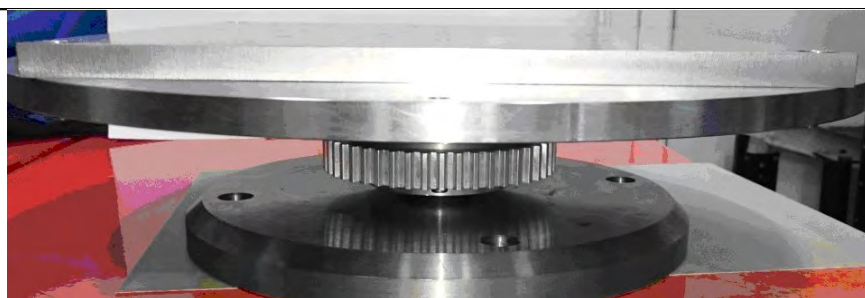


Fig. 5. Vedere laterala a dispozitivului rotitor pentru realizare bobinaje supraconductoare planare



Fig. 6 Vedere laterala a dispozitivului de derulare si tensionare a firului supraconductor (pentru bobinaje planare)

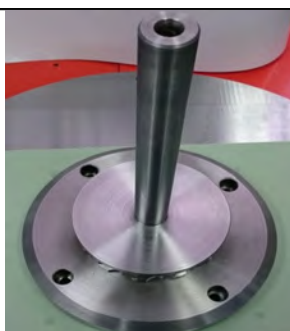


Fig. 7 Vedere de sus a dispozitivului de derulare si tensionare a firului supraconductor (pentru bobinaje planare)

4.4. Concluzii la Capitolul 4

Partenerul P3, a realizat in cadrul etapei 2/2015 urmatoarele obiective:

- Proiectarea jugului de fier si a sistemului mecanic de fixare a bobinajului supraconductor .

Jugul de fier a fost conceput intr-o forma care sa permita asamblarea peste bobinajele supraconductoare, fiind realizat din tole din tabla silicioasa cu grosimea de 0,5mm, pentru evitarea pierderilor prin curenti turbionari. Dimensiunile lui sunt: 100mm lungime si diametrul exterior de 130mm, iar cel interior de 100 mm.

- Proiectare dispozitiv de executie cilindrica a bobinajelor supraconductoare HTS.

Au fost realizate desenele de executie ale dispozitivului de executie a bobinajelor in forma cilindrica (pentru asamblare finala a bobinajelor).. Bobinele supraconductoare, dupa executie in forma planara, trebuiesc asamblate pe cindrul interior al electromagnetului. Acest dispozitiv realizeaza formatarea finala a bobinajului supraconductor.

- A fost executat dispozitivul de realizare bobinaje supraconductoare in forma planara. Acesta este alcatuit in principal dintr-un dispozitiv plan, rotitor, pe care sunt asezate formele pentru bobinaje in forma planara si un dispozitiv de derulare a benzii supraconductoare si de tensionare controlata a acestuia.

CAPITOLUL 5. CONCLUZII GENERALE

In cadrul etapei prezente a lucrarilor, au fost realizate urmatoarele:

1. Coordonatorul lucrarilor, a realizat urmatoarele obiective:

Proiectarea generala a modelului experimental de EMSD

- *Calcule de dimensionare* elemente constructive:

- bobine supraconductoare,

- sistemul criogenic de racire (sarcinile termice rezultate din dimensiunile constructive si conductorii HTS de alimentare ai bobinelor supraconductoare)

- conductorii de alimentare electrica HTS

- *Desenele de executie:*

- ale ansamblului magnet supraconductor dipolar (EMSD)- model experimental cod EMSD- 00.00)

- ansamblu criostat pentru EMSD cod EMSD- 07.00

- Subansamblul conductori HTS, cod EMSD – 13.00

Toate reperele conexe implicate de ansamblurile generale mentionate.

- *Realizare generala model experimental* de EMSD: **criostatul** pentru electromagnetul supraconductor dipolar.

2. Partenerul P1, a realizat:

- a proiectat un sistem de masura a campului magnetic generat de magnetul supraconductor, alcatuit din:

- Teslametru digital

- Sonda Hall

- Sistem de translatie mecanica in 3 axe pentru sonda Hall

- Aplicatie software (Labview) pentru actionarea sistemului mecanic de deplasare si inregistrarea valorilor masurate punctual de sistemul de masura.

Parametrii functionali ai sistemului sunt:

- Domeniul de masura a campului magnetic 0 - 3 T

- Precizia de masura slametrului: 0.01 %

- Viteza de masurare: 10 masurari /s

- precizia de masura a sondei Hall: 10^{-3}

SECTIUNEA 1

RAPORTUL STIINTIFIC SI TEHNIC

DENUMIRE CONTRACT: Electromagnet supraconductor dipolar pentru generarea de camp magnetic intens si uniform

ACRONIM: EMSD

FAZA DE EXECUTIE NR. 3/2016

CU TITLUL: Realizare EMSD - model experimental.

€ **RST – raport stiintific si tehnic in extenso**

Electromagnet supraconductor dipolar pentru generarea de camp magnetic intens si uniform

Etapa 3 / 2016:

“Realizare EMSD - model experimental”

	pag.
<i>Cuprins</i>	
A.OBIECTIVE GENERALE	1
B.OBIECTIVELE ETAPEI DE EXECUȚIE	1
C. REZUMATUL ETAPEI DE EXECUȚIE	1
D. DESCRIEREA ȘTIINȚIFICĂ ȘI TEHNICĂ	2
Capitolul 1. Introducere	3
Capitolul 2. Executie parti componente ale EMSD- model experimental si a asamblarii acestora: executie bobinaj supraconductor si parti conexe. (CO – Activitate 3.1)	4
2.1. Parametrii de proiectare ai modelului experimental	4
2.2. Realizarea modelului experimental de bobine supraconductoare.	4
A. Bobinele supraconductoare	4
B. Suportul bobinelor	5
C. Suntul termic	6
D. Ecranul magnetic (jug de fier)	6
E. Ecranul termic	7
F. Criostatul	7
G. Crioracitorul	8
H. Conductorii de curent	8
2.3. Asamblarea partilor componente	9
2.4. Concluzii la Capitolul 2	10
Capitolul 3. Realizarea sistemului de mapare a campului magnetic pentru modelul experimental de EMSD (P1- Activitate 3.2.)	11
3.1. Sistemului mecanic de mișcare, construit pentru poziționarea 3D a sondei in câmpul magnetic	11
3.2. Aplicația software pentru sistemul de mapare a câmpului magnetic	12
3.3. Sistemul de masura a câmpului magnetic	13
3.3. Teste preliminare ale sistemului de măsură a câmpului magnetic	15
3.4. Concluzii la capitolul 3	16
Capitolul 4. Realizare sistem de masura a tensiunilor mecanice din bobinajul supraconductor al EMSD – model experimental (P2 – Activitate 3.3.)	17
4.1. Descrierea sistemului de măsură și achiziție a datelor	17
4.1.1. Modul de lucru a sistemului de măsură și achiziție a datelor	18
4.2. Realizarea sistemului de măsură și achiziție a datelor	22
4.3. Poziționarea mărcilor tensometrice	23
4.4 Concluzii la capitolul 4.	26
4.5. Bibliografie	27
Capitolul 5. Realizarea jugului de fier, a sistemului de fixare mecanica al acestuia si a bobinelor supraconductoare pentru EMSD - model experimental. (P3- Activitate 3.4.)	28
5.1. Jugul de fier	28

5.2. Sistemul mecanic de fixare	28
5.3. Suportul bobinelor supraconductoare	28
5.4. Dispozitivul de realizare a bobinelor supraconductoare.	28
5.5. Concluzii la capitolul 5	29
Capitolul 6. Diseminare rezultate (CO, P1, P2 - Activitate 3.6.)	30
Capitolul 7. Protejarea drepturilor de proprietate industrială (CO,P1,P2,P3 - Activitate 3.5.)	30
Capitolul 8. Concluzii generale.	31
Anexă 1. — Mărci tensometrice alese pentru configurația experimentală	33
Anexa 2. - Cerer brevet OSIM	34

A. OBIECTIVELE GENERALE ALE PROIECTULUI

În cadrul proiectului se urmărește realizarea unui electromagnet supraconductor dipolar

pentru generarea de câmp magnetic intens și uniform pentru acceleratoare de particule.

Proiectul are drept obiective generale:

- realizarea și testarea unui electromagnet supraconductor cu bobinaj HTS, pentru generarea de câmp magnetic dipolar cu acces direct la zona de câmp magnetic, din exterior.
- Realizarea și testarea unui sistem de măsură a câmpului magnetic produs de electromagnet.
- Realizarea și testarea unui sistem de măsură a tensiunilor mecanice din bobinajul supraconductor
- Realizarea unui sistem de execuție a bobinelor supraconductoare HTS pentru electromagnetul supraconductor.

B.OBIECTIVELE ETAPEI DE EXECUTIE

Conform cu planul de realizare a proiectului, în prezenta etapă s-a realizat:

„Realizare EMSD - model experimental”.

Obiectivele principale ale etapei de execuție cu numărul 3/2016, sunt:

1. Execuție parti componente ale EMSD- model experimental și a asamblării acestora: execuție bobinaj supraconductor și parti conexe.
2. Realizarea sistemului de mapare a câmpului magnetic pentru modelul experimental de EMSD.
3. Realizare sistem de măsură a tensiunilor mecanice din bobinajul supraconductor al EMSD – model experimental.
4. Realizarea jugului de fier, a sistemului de fixare mecanică al acestuia și a bobinelor supraconductoare pentru EMSD - model experimental.
5. Protejarea drepturilor de proprietate industrială.
6. Diseminare rezultate.

C. REZUMATUL ETAPEI DE EXECUTIE

În cadrul etapei au fost realizate:

Coordinator CO:

- Modelul experimental de EMSD.

Principalele caracteristici tehnice ale acestuia sunt:

- magnetul supraconductor HTS va genera un câmp magnetic intens (2-3T) în centrul sau, cu o uniformitate de $\sim 10^{-3}$ în zona centrală.

- un canal „cald” de acces pentru particulele accelerate;

- diametrul canal interior acces: 40 mm;

- dimensiuni zona utilă de câmp: cca 80 cm³;

- racire fără agenți criogenici (utilizare criocooler) prin conducție termică.

- utilizare materiale supraconductoare HTS de tip YBCO;

În conformitate cu modelul conceptual al EMSD și cu desenele de execuție ale modelului experimental, au fost realizate următoarele:

- Electromagnetul supraconductor. Acesta este alcătuit din suportul bobinelor supraconductoare, bobinele supraconductoare HTS, și jugul de fier.

- Bobinele supraconductoare s-au realizat din material HTS de tip YBCO, sub formă de bandă cu următoarele caracteristici: lățimea benzii: 6 mm; grosimea benzii: 0.11 mm, curent critic: 130A @77K. Forma bobinelor HTS este de tip „sa”.

- Suportul bobinelor este realizat din oțel inox austenitic, iar jugul de fier este realizat din tole de tablă silicioasă cu grosime de 0,2mm.

- Jugul de fier, este realizat din tole de tabla silicioasa si asambleate impreuna pentru a realiza un cilindru (ecran magnetic) in jurul sistemului de bobine.
- Suportul ansamblului electromagnet HTS, realizat din sticlătextolit.
- Conductorii HTS pentru alimentarea electromagnetului. Acestia au fost realizati din material YBCO tip banda, cu latimea de 12mm, pentru a putea transporta curenti de maxim 300A.
- Conductorii de cupru, care fac legatura intre bornele externe de alimentare cu curent de la sursa si conductorii HTS, dimensionati pentru a conduce 300A.
- Asamblarea electromagnetului cu criostatul si sistemul criogenic de racire.
 - Sistemul criogenic de racire al electromagnetului este de tip „crioracitor” cu doua trepte de racire. Caracteristicile tehnice importante sunt puterea termica si valoarea temperaturii celor doua capete de racire, respectiv: 35W@50K si 1,5W@4,2K.
 - Criostatul electromagnetului supraconductor. Este o carcasa din otel austenitic cu rol de izolare termica a bobinelor supraconductoare si a crioracitorului. Criostatul se videaza la un nivel de 10^{-5} torr.

Partener P1:

- Realizare sistem de masura si mapare 3D a campului magnetic generat de EMSD. A fost realizat un sistem de masurare si mapare a campului magnetic generat de electromagnetul supraconductor. Acesta consta in:
 - sonda Hall de masurare a campului magnetic
 - teslametru pentru conversia semnalului sondei Hall in unitati de inductie camp magnetic (T);
 - sistem mecanic de translatie 3D, pentru pozitionarea sondei Hall in punctele predeterminate pentru masurarea valorilor inductiei campului magnetic.
 - Soft specializat pentru construirea unei „harti 3D a valorilor inductiei campului masurate in zona de camp bun.

Partener P2:

- Realizare sistem de masura a tensiunilor mecanice din bobinajul supraconductor. A fost realizat un sistem de masurare a tensiunilor mecanice care vor apare cu precadere in capetele de bobinelor datorita interactiei electromagnetice (forte lorentz), intre elementele de bobinaj. Acesta este alcatuit din urmatoarele : senzori tensometrici amplasati pe zonele de interes ale bobinajului, sistemul de achizitie a datelor de la senzori si software-ul (interfata de lucru) pentru vizualizarea indicatiilor senzorilor.

Partener P3:

- Executia jugului de fier pentru EMSD, si a sistemului mecanic de fixare a bobinelor HTS.
 - A fost executat sistemul mecanic de fixare a bobinajelor supraconductoare HTS in aranjamentul proiectat, a jugului de fier (realizat din tole de tabla silicioasa) si a sistemului mecanic de sustinere a electromagnetului HTS.
- Protejarea drepturilor de autor, prin elaborarea unei propuneri de brevet de inventie inregistrata la OSIM cu nr. A/00885/22.11.2016
- Lucrari stiintifice sustinute la Conferinte Internationale/ publicate (3).

D. DESCRIERE STIINTIFICA SI TEHNICA

CAPITOLUL 1. INTRODUCERE

Proiectul propune realizarea unui prototip de electromagnet supraconductor dipolar care genereaza un camp magnetic intens ($\sim 3\text{T}$) si uniform intr-o zona extinsa si bine definita, asa numitul „canal cald” al electromagnetului, pe toata lungimea acestuia. Prin acest canal cald trece fluxul de particule incarcate electric si accelerate la energii mari ($\sim \text{GeV-TeV}$), pentru a fi deviat de la directia initiala si mentinut pe o traiectorie curbilinie. Aceasta deviere se realizeaza prin trecerea particulelor incarcate electric prin zone de camp magnetic intens si uniform.

Acest tip de electromagnet supraconductor este destinat utilizarii in acceleratoarele de particule moderne, de mare energie, fara de care nu poate fi conceput progresul fizicii actuale sau pentru diverse alte aplicatii industriale. In cadrul temei, pentru dimensionarea electromagnetului, se vor utiliza ultimele realizari in domeniul software-ului destinat modelarii numerice 3D (Comsol Multiphysics) a campului magnetic si a simularii functionarii electromagnetului. De asemeni se va utiliza ultima generatie a tehnologiei pentru obtinerea temperaturilor joase (Crioracitoare) care elimina utilizarea agentilor criogenici si se va folosi ultimul tip de materiale supraconductoare asa numiti supraconductori HTS (High Temperature Superconductors).

In cadrul lucrarilor se vor realiza un sistem de masurare a tensiunilor mecanice care apar in bobinajele supraconductoare de catre partenerul2 – Universitatea Politehnica Bucuresti, care va pune in evidenta zonele cele mai solicitate de catre fortele electromagnetice Laplace in vederea asigurarii acelor zone impotriva deformarii bobinajului.

In acelasi timp, partenerul1- IFIN-HH, va realiza un model experimental de masurare si „mapare” a campului magnetic generat de catre electromagnetul supraconductor (EMSD) in zona centrala a acestuia. Astfel, campul magnetic generat va putea fi si evaluat din punct de vedere a calitatii campului (valoare si uniformitate).

In cadrul etapei actuale (3/2016), obiectivul principal este executia modelelor experimentale: EMSD si asamblarea lui, a sistemului de masura si mapare a campului magnetic si a sistemului de masura atensiunilor mecanice din bobinajele supraconductoare.

Totodata sunt puse in evidenta elementele de noutate printr-o propunere de brevet de inventie la OSIM. Diseminarea s-a realizat prin sustinerea de lucrari la Conferinte Internationale in anul 2016.

CAPITOLUL 2. Realizarea modelului experimental

Executie parti componente ale EMSD- model experimental si a asamblarii acestora: executie bobinaj supraconductor si parti conexe.

2.1. Parametrii de proiectare ai modelului experimental

Bobinele Supraconductoare

- camp magnetic: max 3T
- neuniformitatea campului: 10^{-3}
- volum accesibil camp: 80 cm^3

2.2. Realizarea modelului experimental de bobine supraconductoare.

Modelul experimental de generator supraconductor de camp magnetic intens si unifor, este alcatuit din urmatoarele parti componente (fig. 2.1):

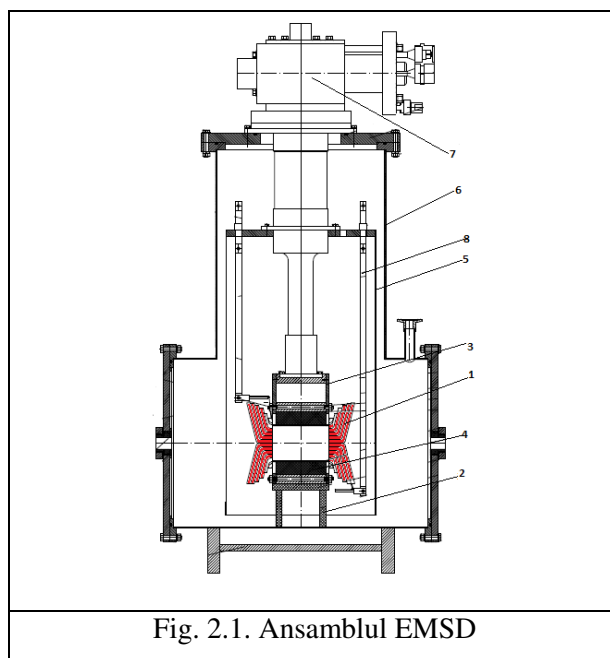


Fig. 2.1. Ansamblul EMSD

- A. Bobinele supraconductoare (1)
- B. Suportul bobinelor supraconductoare (2)
- C. Sunt termic (3)
- D. Jugul de fier (4)
- E. Ecran termic (5)
- F. Criostat (6)
- G. Crioracitor (7)
- H. Conductor HTS de curent (8)

Executia elementelor componente

A. Bobinele supraconductoare

Au fost realizate din banda supraconductoare HTS cu urmatoarele caracteristici:

- latime 6 mm
- grosime 0.1 mm
- izolatie kapton # 0.05 mm

Bobinele sunt realizate sub forma de galeti simpli din banda supraconductoare de tip YBCO (Superpower) si impregnata cu rasina epoxidica de temperaturi joase, intarita la temperatura camerei. Rasina este de de vascozitate mica, pentru temperaturi joase (4,2K), produsa de firma Epoxy Technology EPO – TEK 301.

Caracteristicile principale ale bobinelor sunt redade in tabelul 2.1:

Tabel 2.1.

Nr.crt.	Tip bobina/nr.	R(m Ω)	L(μ H)	Nr. spire	Dimensiuni(mm) D _i x L
1	Stadion/1	610	101	14	22 x 100
2	Stadion/2	614	105	14	22 x 100
3	Sa/3	3870	1750	53	60 x 100
4	Sa/4	4200	2270	53	60 x100
5	Sa/5	3060	1140	75	43 x100
6	Sa/6	2890	1090	75	43 x100

Ansamblul de bobine supraconductoare sunt montate pe un suport conductiv de otel inox, in bun contact termic pentru racirea conductiva la temperaturi criogenice.



Fig. 2.2. Bobinele supraconductoare HTS tip stadion.



Fig. 2.3. Bobinele supraconductoare HTS sub forma de „sa”.

B. Suportul bobinelor

Suport 1.

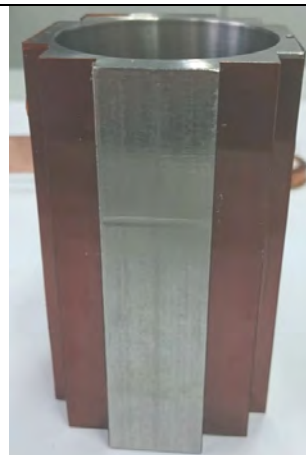


Fig. 2.4. Vedere laterala a suportului bobinelor HTS.

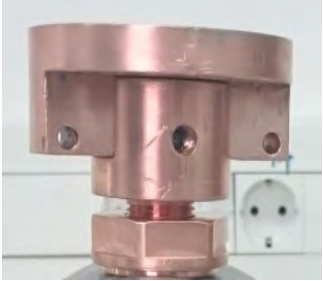
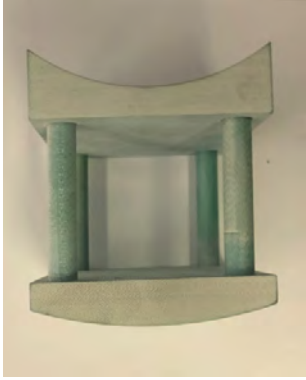


Fig. 2.5. Vedere axiala asupra suportului bobinelor.



Fig. 2.6. Vedere laterala a suportului cu bobinele montate.

Suportul bobinelor are rolul de a sustine geometria sistemului de bobine si deci de a mentine pozitia fixa a acestora, in locatiile corespunzatoare acestora, pentru a se asigura generarea campului magnetic dipolar uniform. In acelasi timp, acesta are rolul de a asigura racirea la temperaturi criogenice a bobinelor, pentru tranzitionarea acaestora in stare supraconductoare. Acest lucru se realizeaza prin cuplarea suportului la capul rece (4.2 K) al criocoolerului prin intermediul unui sunt termic (Fig. 7) realizat de asemeni din cupru pentru asigurarea unei bune conductii termice. Suportul bobinelor este asamblat (Fig. 8) impreuna cu suntul termic prin intermediul unei piese de legatura, cu rol de a raci ansamblul bobine supraconductoare.

		
Fig. 2.7. Suntul termic	Fig. 2.8. Sunt termic asamblat pe crioracitor	Fig. 2.9 Suportul bobinelor 2

Suport 2

Este realizat din material izolator, sticlotextolit si sustine mecanic sistemul de bobine (jugul de fier) - fig. 2.9.

C. Suntul termic

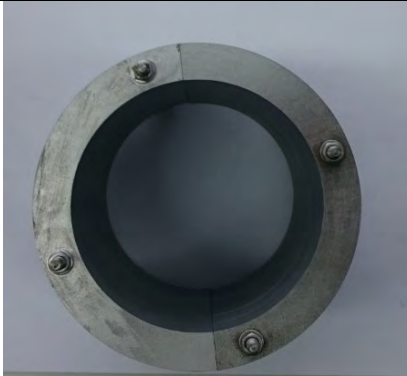
Este elementul de legatura intre crioracitor (treapta 2 de racire- 4,2K) si ansamblul bobinelor supraconductoare HTS. Acesta are dublu rol: sustinerea mecanica a ansamblului, si racirea prin conductie a sistemului bobine HTS- suport bobine- jug de fier. Este realizat din cupru masiv, pentru o conductie termica maxima. (Fig. 2.7 si Fig.2. 8).

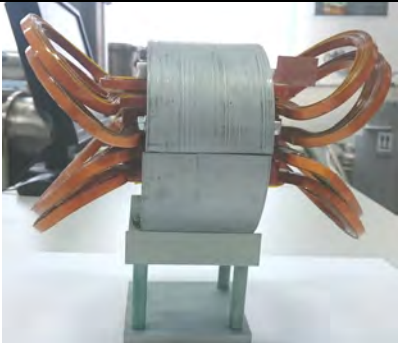
D. Ecranul magnetic (jug de fier)

Acesta are rolul de a inchide liniile de camp magnetic si de a contribui la uniformizarea campului magnetic

Este realizat din fier (otel carbon OL), cu urmatoarele dimensiuni:

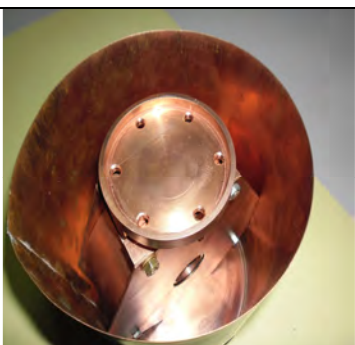
Diametrul exterior $D_{ext}= 130mm$, lungime $L=100mm$ (vezi fig. 2.10 – 2.12)

		
Fig. 2.10. Vedere de sus a jugului de fier	Fig. 2.11. Vedere laterala jugului de fier	Fig. 2.12. Jugul de fier impreuna cu suportul bobinelor

		
Fig. 2.13. Bobinele HTS împreuna cu jugul de fier (vedere de sus).	Fig. 2.14. Bobinele HTS impreuna cu jugul de fier (vedere axiala)	Fig. 2.15. Bobinele HTS impreuna cu jugul de fier (vedere laterala)

E. Ecranul termic

Acesta are rolul de a proteja bobina supraconductoare si capul rece al criocoolerului de radiatia termica de 300 K, de la carcasa criostatului. In acest scop, ecranul termic (vezi fig. 2.16 si 2.17) se realizeaza din tabla de cupru lustruita si cuplata la capul 1 de racire al criocoolerului, aflat la temperatura de 50 K. Astfel, radiatia termica de 300 K este preluata de ecran iar caldura produsa este evacuata prin conductie termica catre criocooler (treapta 1 de racire).

	
Fig. 16. Vedere laterala a ecranului termic	Fig. 17. Vedere de sus a ecranului termic impreuna cu suntul termic.

F. Criostatul

Criostatul bobinelor supraconductoare HTS asigura urmatoarele conditii impuse prin tema de proiectare:

- asigura conditiile criogenice de functionare pentru bobinele supraconductoare
- asigura accesul axial la zona centrala de camp magnetic
- asigura stabilitatea mecanica a intregului sistem
- asigura conditiile de functionare pentru criocooler

Criostatul este realizat din otel inox nemagnetic (austenitic) intr-o geometrie cu simetrie biaxiala.

Dimensiunile criostatului sunt urmatoarele:

- lungime: 455 mm
- inaltime: 600 mm
- diametrul exterior al partii orizontale: 270 mm
- diametrul exterior al partii verticale: 180 mm

- masa: 10 kg
- diametrul canalului central: 45 mm

Intreaga incinta a criostatului se videaza la un nivel de 10^{-5} torr ceea ce reduce la neglijabil pierderile termice conductive prin gazul rezidual.

G. Crioracitorul

Crioracitorul (Fig. 2.18) este o pompa termica care lucreaza in doua trepte de racire, este de tip RDK – 415D produs de firma SHI – Cryogenics. Cele doua trepte de racire au urmatoarele caracteristici:

- Treapta 1: putere de racire 35 W, temperatura finala 50 K.
- Treapta 2: putere de racire 1.5 W, temperatura finala 4.2 K.



Fig. 2.18. Crioracitor cu doua trepte de racire – SHI Cryogenics.

Treapta 1 de racire este utilizata pentru preluarea fluxului termic radiativ de la ecranul termic (50 K) si pentru racirea conductorilor HTS de curent. Treapta 2 de racire (4.2 K) este utilizata pentru racirea ansamblului suport bobine – bobine supraconductoare.

Alimentarea si functionarea capului de racire (fig. 14) este asigurata de un compresor care lucreaza cu Helium gaz si racit cu apa.

H. Conductorii de curent

Acestia asigura alimentarea bobinelor supraconductoare la curenti relativ mari (~ 200 A). Intrucat fac legatura intre trecerile de curent (intre interiorul si exteriorul criostatului) aflate la temperatura camerei si capetele bobinelor supraconductoare (aflate la temperaturi joase ~ 5 – 20 K) acestea trebuie sa aibe si o conductivitate termica cat mai redusa. Din acest motiv ele nu pot fi din cupru, care are o conductivitate termica ridicata (~400 W/mK) ci sunt realizate tot din material supraconductor HTS care are o conductivitate termica ~ 0,5 W/mK (Fig. 2.19 – 2.20).

Practic, conductorii de curent HTS sunt in contact termic cu ecranul termic de 50K (cu implicata racire la aceeasi temperatura). Legatura intre trecerile de curent aflate la temperatura camerei si conductorii HTS se face prin intermediul conductorilor clasici de cupru, dimensionati corespunzator pentru sustinerea unor curenti de max. 200A.

Conductorii HTS sunt astfel legati la capatul opus direct la bornele bobinelor supraconductoare. Astfel, fluxul termic de la conductorii HTS catre bobinele de cupru este mult diminuat din doua motive: conductivitatea termica redusa a acestora (~0,5W/mK) si diferenta termica redusa (intre 50K si 5-20K).

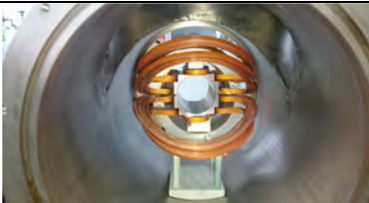
		
Fig. 2.19. Conductorii de curent HTS cu jonctiunile Cu-HTS	Fig. 2.20. Conductorii de curent HTS asamblati	Fig. 2.21. Conductorii de cupru impreuna cu crioracitorul.

Caracteristicile acestora sunt urmatoarele:

- lungime: 200 mm
- diametru exterior: 10 mm
- carcasa exterioara: otel sticlotextolit
- terminale: cupru argintat
- material HTS: YBCO, banda latime 12 mm.
- Curent maxim transmis: 300A

2.3. Asamblarea partilor componente

Toate componentele constitutive ale magnetului supraconductor, au fost asamblate in criostat si cuplate la crioracitor (Fig.2.22 – 2.24).

			
Fig. 2.22. Ansamblul criostat-crioracitor-ansamblu bobine HTS	Fig. 2.23. Ansamblul Criostat-bobine supraconductoare –jug de fier.	Fig. 2.24. Ansamblul criostat – bobine – ecran termic, montate in criostat	Fig.2.25. Electromagnet supraconductor dipolar (EMSD) asamblat

Sistemul astfel asamblat (fig.2.25) va fi testat preliminar pe subansamble (teste de vidare si racire la temperaturi criogenice, verificarea intrarii in supraconductie a bobinajelelor supraconductoare) si apoi supus testelor finale de functionare prin alimentarea de la o sursa de cc, ceea ce face obiectul etapei finale a temei de cercetare.

Testele finale vor permite atat experimentarea sistemului de masura a campului magnetic realizat de partenerul1 IFIN-HH cat si experimentarea sistemului de masura a tensiunilor mecanice realizat de partenerul3, UPB.

2.4. Concluzii la Capitolul 2

În cadrul prezentei etape, Coordonatorul temei de cercetare (ICPE-CA) a realizat următoarele:

- **Executia partilor componente** ale modelului experimental de electromagnet supraconductor dipolar (EMSD): bobinele supraconductoare, conductorii de curent HTS, conductorii de cupru și ecranul termic al sistemului de bobine HTS.
- **Asamblarea modelului experimental** de EMSD alcătuit din: criostat, sistem criogenic de răcire a bobinelor supraconductoare (crioracitor G-M în două trepte de răcire), a bobinelor supraconductoare HTS împreună cu suportul conductiv al acestora, cu jugul de fier și suportii de susținere (1 și 2) ai ansamblului de bobine, conductorii de curent și ecranul termic.

CAPITOLUL 3. Realizarea sistemului de masura si mapare a câmpului magnetic.

Sistemul de măsurare a câmpului magnetic realizat in cadrul IFIN-HH este compus dintr-un sistem de poziționare mecanica 3D a unei sonde pentru masurarea campului magnetic, un sistem de măsurare a câmpului magnetic si o aplicație software care gestionează resursele si salvează datele in diferite formate digitale. Exista câteva diferențe fata de modelul conceptual elaborat in etapa de proiectare. Acestea au fost adăugate pentru mărirea preciziei sistemului mecanic de poziționare si sunt detaliate in paragrafele care urmează.

3.1. Sistemului mecanic de mișcare, construit pentru poziționarea 3D a sondei in câmpul magnetic

Exista doua diferențe față de modelul conceptual inițial, propus si agreat cu partenerii:

- Sinele de translație in plan orizontal au fost înlocuite cu o suprafața de translație pentru imbunatatirea preciziei de poziționare (~ 1 micron).
- au fost folosite motoare electrice prevăzute cu dispozitive tip „encoder” care furnizează semnalele de feedback pentru verificarea deplasării mecanice reale.

Parametrii principali ai sistemului de mișcare obținut si folosit in teste sunt următorii:

- sarcina mecanica maxima este de 2Kg pe verticala si 10Kg in plan orizontal;
 - rezoluția in "full step" a suprafeței de translație este de 1 micron pe orizontala si de 500nm pe verticala.
 - viteza maxima a mișcării mecanice de translație este de 50mm pe secunda pe orice axa;
 - frânarea electromagnetica a fost implementata pe axa Z (verticala), astfel incat se menține poziția verticala pentru perioade nedefinite de timp chiar si in absenta alimentarii electrice.
 - suportul sondei de măsurare este realizat din aluminiu si a fost prevăzut cu o fanta pentru orientarea capsulei ceramice perpendicular pe câmpul magnetic analizat , daca este nevoie .
- Diametrul exterior al suportului este de 12 mm iar diametrul interior este de 9 mm.



Fig.3.1. Sistemul electro-mecanic de deplasare 3D (Imaginea fotografica)

3.2. Aplicația software pentru sistemul de mapare a câmpului magnetic

Aplicația software dezvoltată, gestionează resursele prin intermediul unor protocoale de comunicare. Comunicarea de tip client/server se realizează pe două canale separate, astfel: între PC și un echipament administrat pe o linie de tip serial (RS-232) și între PC și un controller, printr-o rețea de tip TCP/IP. Arhitectura generală a rețelei de comunicare este de tip „HUB with SPOKES”.

Aplicația este compusă din mai multe module care implementează:

- Poziționarea sondei pentru aliniere sau executarea unui profil de baleiaj de tip XYZ;
- Gestionarea resurselor Gaussmetrului (alegerea scalei, investigarea câmpului magnetic pe poziția spațială curentă a sondei, alegerea portului de comunicare, afișarea modului / tipului de măsurare, afișarea temperaturii exterioare);
- Afișarea grafică a profilului de variație a câmpului magnetic;
- Salvarea datelor în format *.txt în fișierul ales de utilizator;
- Poziționarea absolută a sondei (deplasarea sondei față de un reper absolut al instrumentului) sau poziționarea relativă (mișcarea sondei prin deplasarea cu un număr de pași față de poziția curentă);
- Realizarea unui profil de baleiaj de tip 1-D pe oricare axă;
- Oprirea de urgență a baleiajului cu pierderea memorării poziției spațiale curente („kill all”) sau cu memorarea stării curente și continuarea mișcării atunci când utilizatorul decide că acest lucru este posibil;

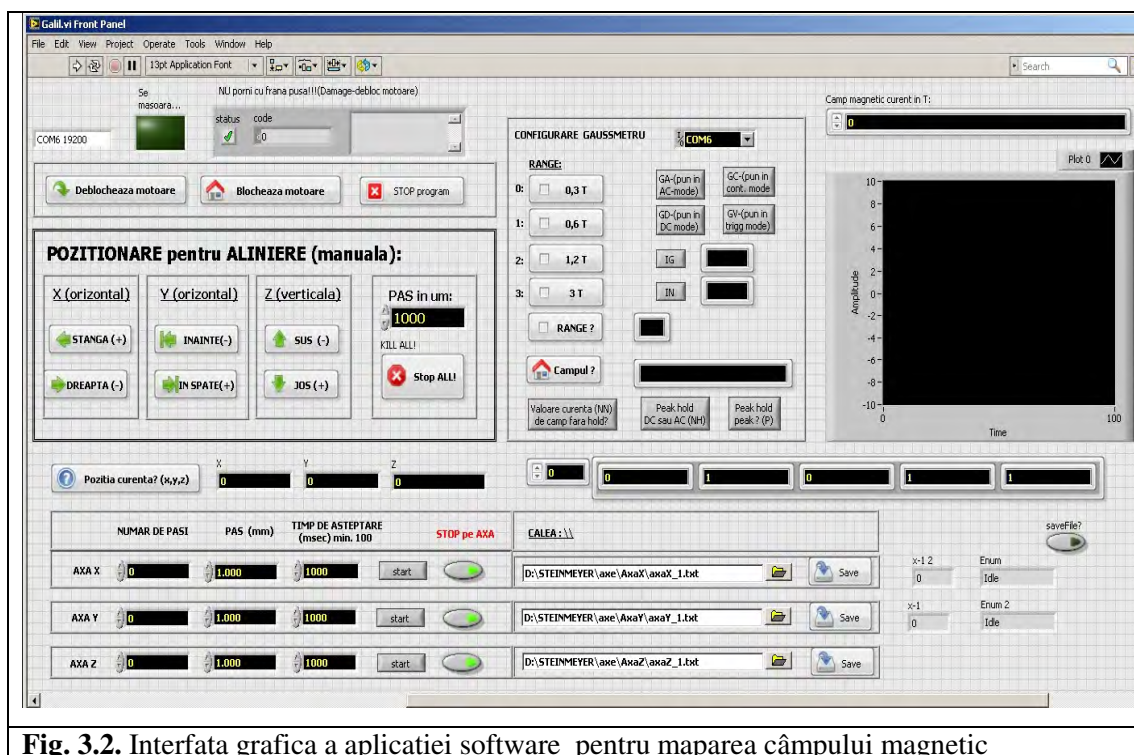


Fig. 3.2. Interfața grafică a aplicației software pentru maparea câmpului magnetic

3.3. Sistemul de masura a câmpului magnetic

a. Gaussmetrul

		
3.3. Gaussmetrul Group 3 si conexiunea RS232 pentru comunicarea cu PC-ul	3.4.Convertorul USB-RS232 folosit pentru comunicarea intre PC si Gaussmetrul Group3	3.5.Sonda Hall miniaturizata si circuitul de calibrare folosite pentru maparea câmpului magnetic

Gaussmetrul utilizat in aplicatie, este de tip DTM 133 Digital Teslameter, produs de compania specializata Group 3 Technology. Parametrii principali ai Gaussmetrului digital sunt:

- un domeniu de măsură a densităților de flux magnetic cuprins între 0 si 3T, cu o precizie de 1 parte la 6000 (0,01% + 0,006% Cap Scala) si indicarea polarității.
- sonda este calibrata pentru variațiile de temperatura (10ppm/C) si de câmp magnetic printr-un circuit electronic specializat.
- modul de măsură de tip AC al Gaussmetrului poate prezenta câmpurile magnetice variabile in timp, având o frecventa cuprinsa între 8 Hz si 3000 Hz.
- filtrarea de tip digital a Gaussmetrului poate suprima fluctuațiile nedorite.
- rata maxima de măsurare a câmpului magnetic poate fi de 10 măsurători pe secunda
- comunicarea cu PC-ul se face prin linie seriala tip RS-232C.

Principalii parametri de lucru ai Gaussmetrului pot fi setați din panoul frontal sau direct din aplicația software. In plus, aplicația oferă posibilitatea de a interoga aparatul pentru investigarea regimului de lucru curent.

b. Sonda Hall

Sonda (sondă miniaturizata cu efect Hall) folosita pentru mapare are următorii parametrii dimensionali (fig. 3.5. si 3.6.)

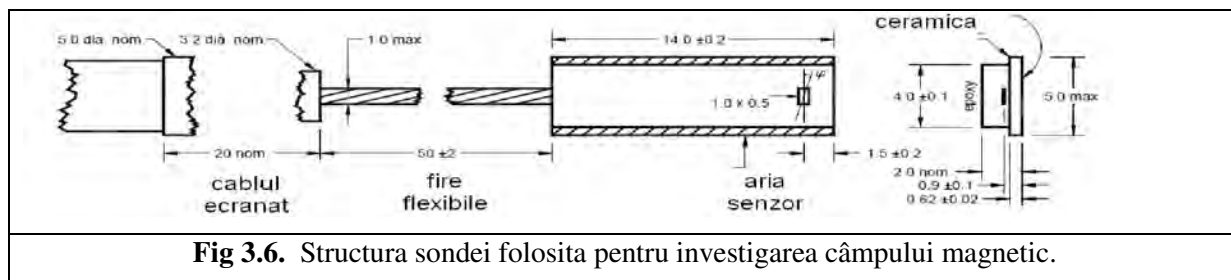
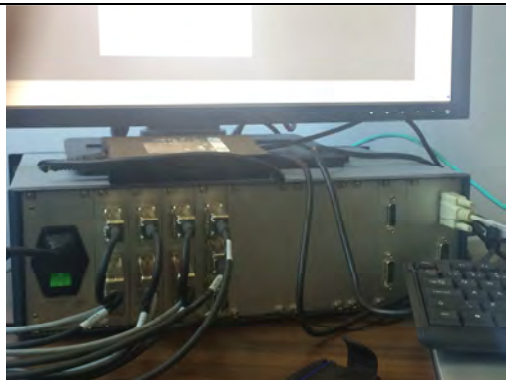
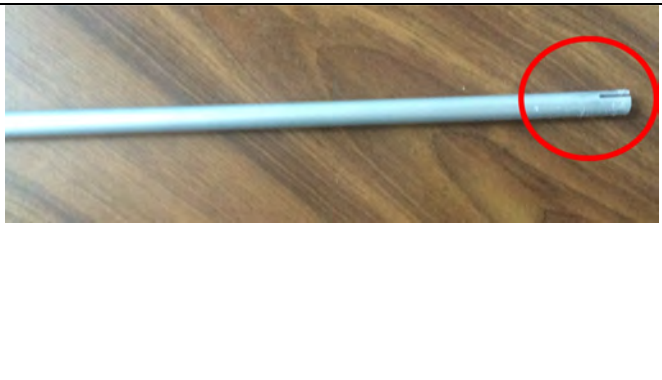


Fig 3.6. Structura sondei folosita pentru investigarea câmpului magnetic.

Sonda de tip Hall este produsa de aceeași firma Group 3 Technology, este de tip MPT 132, cu o precizie de masura de $\pm 0.03\%$. Sonda este compensata pentru variatia temperaturii.

	
3.7. Controllerul principal si sistemul de comunicare cu encodere pe fiecare axa.	3.8. Suportul sondei Hall (bratul de investigare).

Controllerul, prezentat in fig. 3.7., permite comunicarea pe linie seriala la diferite viteze. A fost setata rata de 9600 BAUD pentru integrarea instrumentului de analiza a câmpului magnetic.

Figura 3.8 prezinta suportul sondei Hall care este o țeava din aliaj de Al care nu interacționează cu câmpul magnetic si are diametrul de $\sim 11\text{mm}$ si o lungime de 1m.. Suportul este prevăzut cu o fanta care permite instalarea pastilei sondei fără a distruge conexiunile electronice ale acesteia.

		
Fig. 3.9. Sistemul PC folosit pentru maparea câmpului magnetic si configurarea șinelor de translație.	Fig.3.10. Controller pentru pozitionare manuala/automata sondei in plan orizontal xy	Fig. 3.11. Controller pentru pozitionare manuala/automata sondei in plan vertical z

In Fig. 3.10 este prezentat controller-ul folosit pentru poziționarea manuala sau automata (cu ajutorul computerului-prin conexiune tip USB 3.0) a sondei in plan orizontal (2 axe). Permite extinderea prin USB (2.0) pentru a integra si a 3-a axa cu un controller separat. Se poate obține astfel un sistem XYZ. Deplasarea pe fiecare axa este independenta, fara interpolare.

In Fig. 3.11 este prezentat controller-ul suplimentar folosit pentru poziționarea manuala sau automata (cu ajutorul computerului-prin conexiune USB 2.0) a sondei in plan vertical (1

axa). Controllerul gestionează și frâna electromagnetica. De asemenea, este detectată și semnalată automat oprirea (sau coliziunea) la capetele fiecărei axe.

3.3. Teste preliminare ale sistemului de măsură a câmpului magnetic

Sistemul de mișcare (deplasare) 3D a fost testat cu un micrometru digital și cu un comparator (MAHR) de mare precizie pentru verificarea execuției mișcării pe toate axele. S-a observat și confirmat că sistemul execută o mișcare de 1 micron în plan orizontal pe oricare axă și de 500 nm pe verticală, de fiecare dată când au fost comandate mișcări de acest tip din interfața grafică construită special pentru comanda sistemului mecanic. Pentru verificare au fost date și comenzi de realizare a unui profil de tip 1-D cu un număr limitat de pași în secvență.

- pentru măsurarea câmpului magnetic a fost introdusă o întârziere (valoare de timp care poate fi setată din aplicația de control) între sfârșitul mișcării de translație și măsurarea câmpului de către instrument. Valorile înregistrate pentru variația câmpului magnetic au fost în conformitate cu limitele așteptate și/sau fixate pentru experimentare.

- sistemul de măsurare a fost testat și cu magneți etalonați pentru investigarea câmpurilor magnetice;

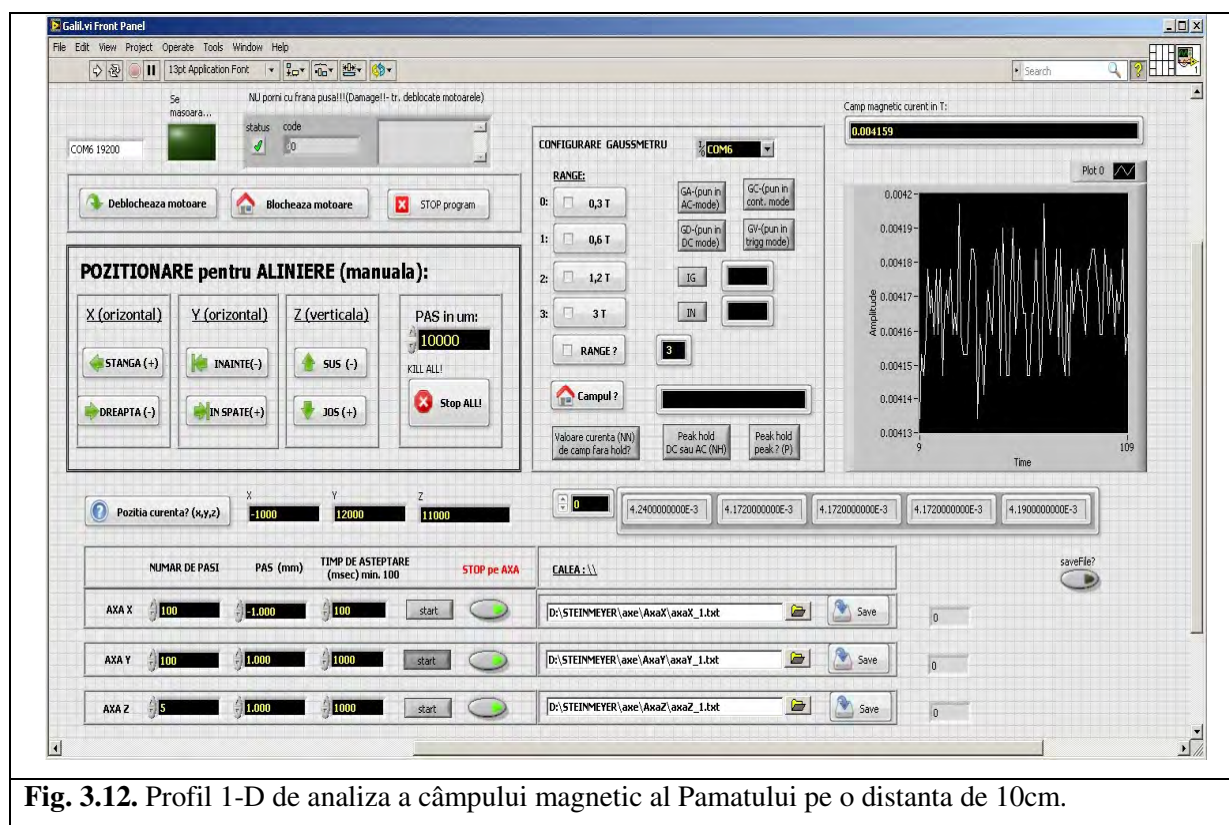


Fig. 3.12. Profil 1-D de analiza a câmpului magnetic al Pamatului pe o distanta de 10cm.

- sonda a fost calibrată cu un circuit electronic dedicat, plasat între aparat și cablul coaxial al sondei.
- Gaussmetrul a fost setat pentru afișarea valorilor în unitatea [SI] - Gauss.
- Sistemul construit este scalabil și poate găzdui mai multe sonde pentru maparea rapidă a câmpului magnetic pe mai multe canale și achiziția simultană a datelor în format digital.
- Pentru siguranța de operare, sistemul are și două comutatoare care pot opri („hardware”)

deplasarea (tip „emergency STOP”) si pot semnaliza optic momentele in care sistemul efectuează baleiajul.

- Cursa maxima in plan orizontal este de 30cm cu o abatere maxima de ~2 microni.
- Cursa maxima pe verticala este de 10cm cu o abatere maxima de ~1micron.

3.4. Concluzii la capitolul 3

In cadrul prezentei etape, partenerul P1 a realizat un model experimental de sistem de masura si mapare a campului magnetic, care are urmatoarea componenta:

- Un sistem electromecanic de deplasare in trei axe (3D) pentru sonda de masura a campului magnetic, cu precizia de deplasare de $\pm 2\mu$ in plan xy si respectiv $\pm 1\mu$ pe directia Oz.
- Un lant de masura a campului magnetic alcatuit din: Gauss-metru digital de tip Group 3, cu domeniul de masura 0-3T si precizie de $\pm 0,016\%$ si o sonda Hall miniatura (Group 3) de tip MPT 132, cu o precizie de masura de $\pm 0.03\%$. Precizia lantului de masura: $\pm 0,033\%$.
- O aplicatie Software in Labview pentru achizitia datelor masurate de lantul de masura si reprezentarea grafica a acestora.
- Au fost efectuate teste preliminare de verificare a functionarii sistemului de masura si mapare a campului magnetic. Au fost puse in evidenta cursele maximale ale sistemului electromecanic de deplasare 3D: 30cm pentru Ox si Oy si 10 cm pentru Oz. Rezolutia de deplasare: 1μ pentru planul xy si $0,5\mu$ pentru Oz.

CAPITOLUL 4. Realizare sistem de masura a tensiunilor mecanice din bobinajul supraconductor al EMSD – model experimental

4.1. Descrierea sistemului de măsură și achiziție a datelor

În această etapă a fost utilizat sistemul de măsură și achiziție a datelor dezvoltat în cadrul etapei anterioare pentru analiza solicitărilor termice și mecanice care apar în timpul funcționării unei bobine HTS. Sistemul, bazat pe o configurație hardware alcătuită dintr-un multimetru digital conectat la un multiplexor și o aplicație software destinată controlului sistemului hardware și achiziției, procesării și stocării datelor măsurate, folosește ca senzori mărci tensometrice pentru determinarea forțelor și termistoare pentru evaluarea temperaturii.

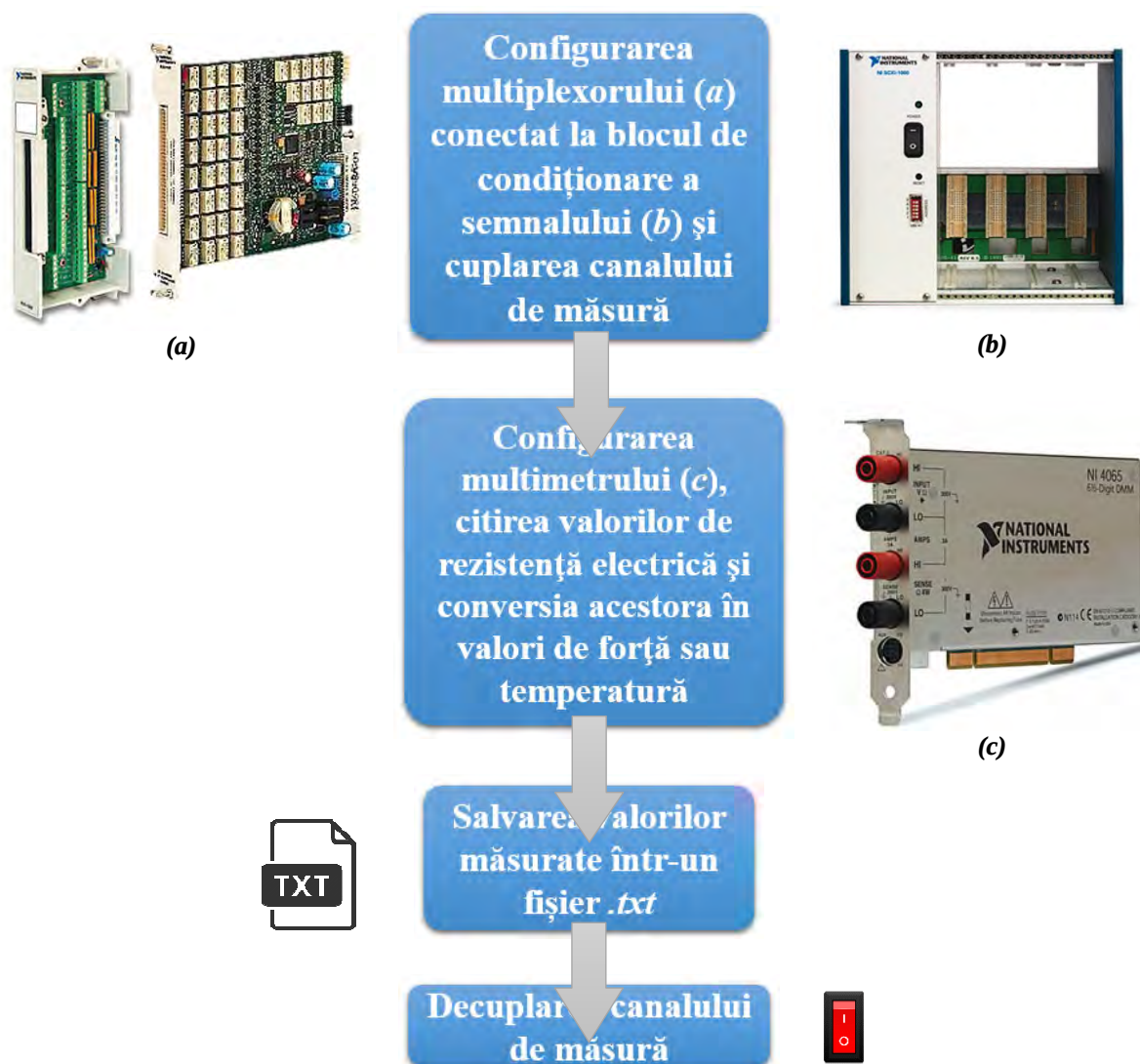


Fig. 4.1. Schema bloc corespunzătoare aplicației LabVIEW destinată controlului și comenzi sistemului hardware și principalele componente ale acestuia.

Partea hardware a sistemului de măsură cuprinde un multimetru (**Fig. 4.1,c**) digital NI-4065 [1] conectat la portul PCI al unui calculator care comunică cu un multiplexor (**Fig. 4.1,a**) NI SCXI-1127 [2] (switch cu relee pentru un număr maxim de 64 de canale de măsură) la care se află conectat un bloc de terminale (**Fig. 4.1,c**) NI SCXI-1331 [3]. Multiplexorul și

blocul de terminale sunt găzduite de un bloc de condiționare a semnalelor (**Fig. 4.1,b**) NI SCXI 1000 [4]. Aplicația software destinată controlului și comenzii echipamentelor hardware a fost dezvoltată în mediul LabVIEW 2011 [5] (versiunea 11.0.1f2, SP1, 32 biți). Aceasta rulează pe sistemul de calcul la care este conectat hardware-ul de achiziție și permite:

- configurarea parametrilor sistemului de măsură,
- măsurarea variațiilor rezistenței electrice corespunzătoare unei configurații cunoscute de senzori de forță (mărci tensometrice) și temperatură (termistoare),
- conversia mărimii electrice măsurate (rezistență sau tensiune electrică) în mărimea corespunzătoare senzorilor folosiți (temperatură, forță) și afișarea acestuia,
- achiziția datelor și stocarea lor într-un fișier text.

Pentru dezvoltarea aplicației s-au folosit bibliotecile (**Fig. 4.3**) NI-DMM [6] și NI-SWITCH [7] ale paletelor de funcții a LabVIEW dedicate configurării și exploatării multimetrului și **multiplexorului la care sunt conectați senzorii de forță și temperatură.**

4.1.1. Modul de lucru a sistemului de măsură și achiziție a datelor

Utilizarea sistemului de măsură și achiziție a datelor presupune parcurgerea următoarelor etape de lucru folosind panoul frontal prezentat în **Fig.4.2**:

1. Setarea ID-urilor corespunzătoare multimetrului (**Fig. 4.1,c**) și multiplexorului (**Fig. 4.1,a**) în câmpurile **ID DMM** și **ID Switch**;
2. Selectarea modului de lucru folosind câmpul **Topologie Mux** (1 fir de măsură – 64 de canale disponibile, 2 fire de măsură – 32 de canale disponibile și 4 fire de măsură – 16 canale disponibile).
3. Configurarea senzorilor utilizați prin introducerea manuală a canalelor active (canalele de măsură din cadrul multiplexorului la care sunt conectați senzorii) folosind tabelul **Lista canalelor de măsură** și specificarea tipului de senzor (de forță sau de temperatură) de pe fiecare canal folosind switch-urile comutate la stânga (pentru termorezistență), sau la dreapta (pentru marcă tensometrică), din tabelul **Tip senzor**.
4. Calibrarea senzorilor utilizați: specificarea valorilor corespunzătoare rezistenței nominale și a factorului de conversie (**gauge factor**) pentru senzorii de forță în câmpul **Parametri marcă tensometrică** și a valorilor constantelor de conversie pentru senzorii de temperatură în câmpul **Parametri termocuplu**.
5. Crearea unui fișier text (**.txt**) și setarea căii de acces a acestuia folosind câmpul **Salvare valorilor medii măsurate**.
6. Setarea nivelului de precizie dorit prin specificarea rezoluției din câmpul **Rezoluție [digiți]** (3 cifre, valoarea minimă, și 6 cifre, valoarea maximă).

În cadrul **primei etape** se inițializează și se configurează multiplexorul NI SCXI-1127 (**Fig. 1,a**) conform setărilor efectuate la pașii 1 și 2 prezentați anterior, se trimite comanda de închidere a releului corespunzător primului canal de măsură definit de către utilizator în listă (pasul 3) și se verifică starea acestui releu înainte de efectuarea măsurătorii (dacă se întâmplă ca releul să nu fie închis, atunci aplicația se oprește).

Cea de-a **doua etapă** presupune parcurgerea secvenței de măsură și conversie a valorii rezistenței în unitățile de măsură corespunzătoare forței sau temperaturii și constă în:

- inițializarea și configurarea multimetrului NI DMM-4065 (**Fig. 4.1,c**),
- citirea unui număr de valori măsurate menționat de utilizator (spre exemplu, 100 de citiri / ciclu de măsură) corespunzătoare rezistenței sau tensiunii senzorului respectiv conectat la canalul de măsură curent,
- verificarea faptului că scara de măsură nu a fost depășită (în cazul în care scara de măsură este depășită, utilizatorul este atenționat prin aprinderea unui led roșu de avertizare pe panoul frontal),
- conversia valorilor instantanee citite (de rezistență sau tensiune electrică) în unități de forță folosind relația de conversie

$$\varepsilon = \frac{\Delta R/R}{GF} = \frac{(R_{mas} - R)/R}{GF} \quad (1)$$

unde R_{mas} [Ω] este rezistența măsurată (rezistența electrică a mărcii tensometrice sub acțiunea forței de măsurat), R [Ω] este rezistența nominală (rezistența mărcii tensometrice în lipsa aplicării unei forțe), iar GF [/] (**gauge factor**) este un parametru specific, menționat de producătorul acesteia, sau temperatură după relația:

$$\Delta R = k \cdot \Delta T \quad [K] \quad (2)$$

unde ΔR [Ω] reprezintă variația liniară, cu un factor k [/], a rezistenței datorată variației de temperatură ΔT [K] și afișarea lor pe un grafic ce prezintă evoluția acestora în timp (**Fig. 4.2**),

- închiderea sesiunii de lucru a multimetrului NI DMM-4065 și calculul valorii medii a forței/temperaturii măsurate,
- salvarea datelor în fișierul text selectat la pasul 5.

A treia etapă constă în transmiterea unei comenzi de deschidere a releului corespunzător primului canal de măsură din lista definită de utilizator (releul închis în prima etapă), închiderea unui nou canal de măsură (următorul canal definit de utilizator în **Lista canalelor de măsură** de la pasul 3) și reluarea celei de-a doua etape. În cazul în care nu mai sunt alte canale de baleiat, se comandă închiderea sesiunii de lucru cu multiplexorul NI SCXI-1127.

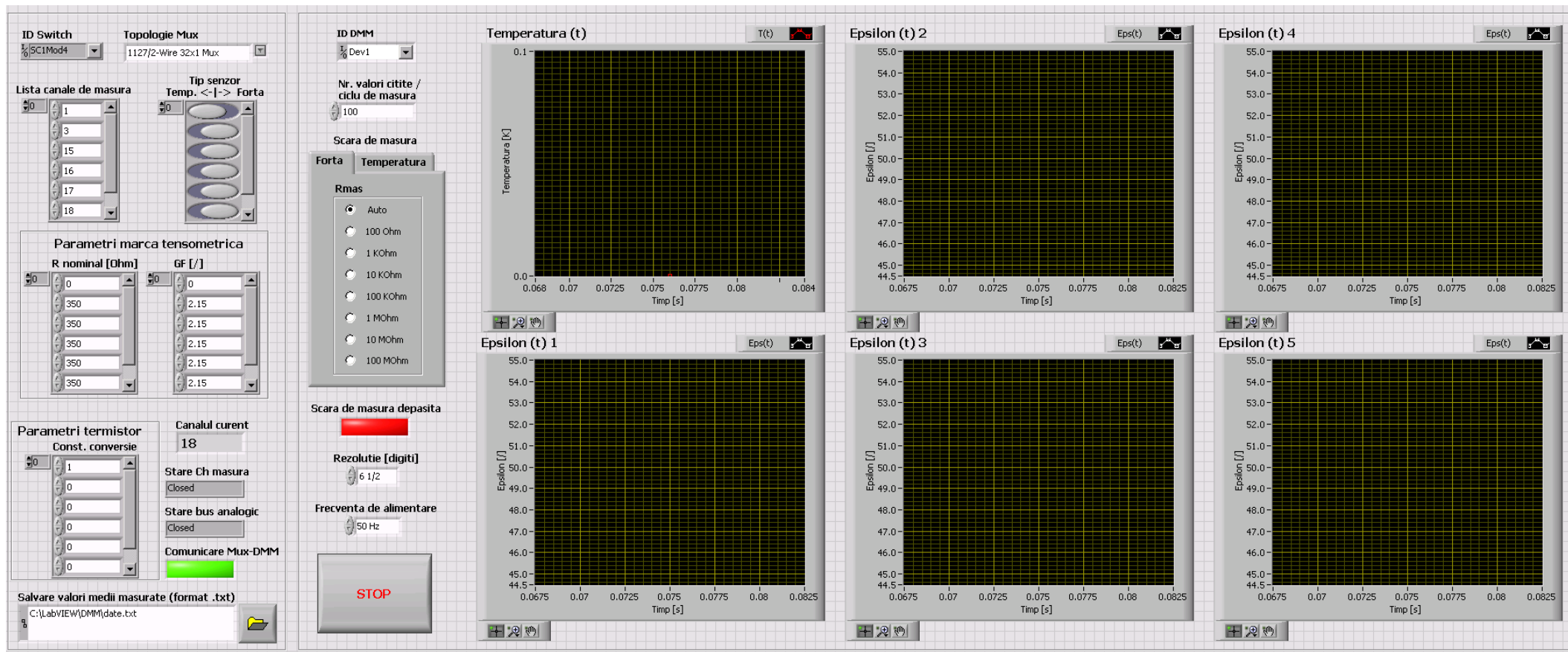
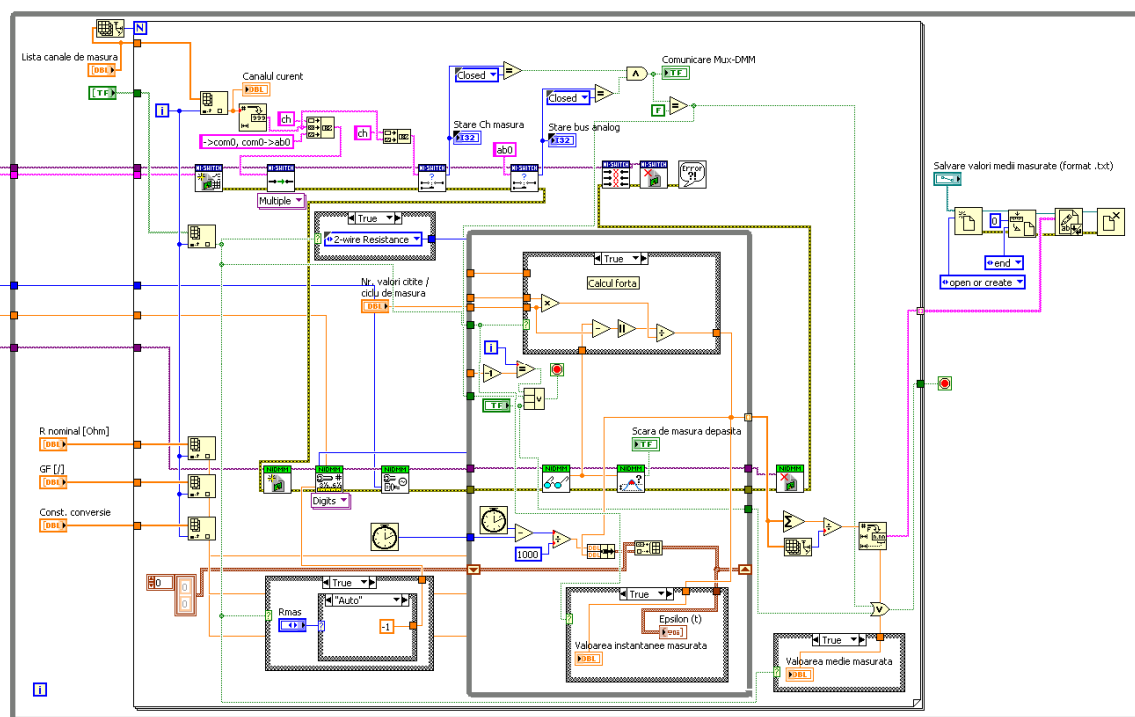
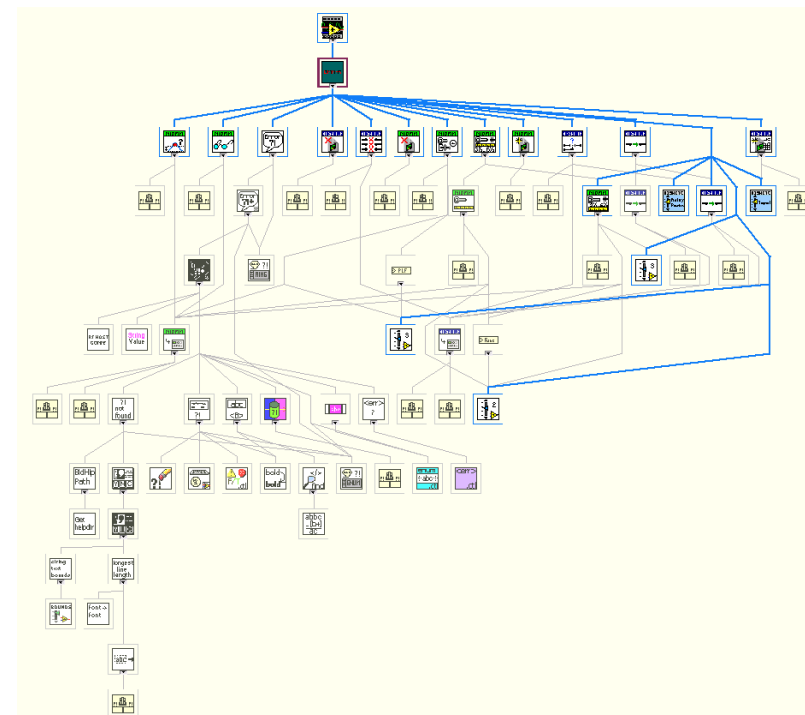


Fig.4. 2. Interfața cu utilizatorul a aplicației LabVIEW destinată măsurării și achiziției datelor. Exemplu de configurare a interfeței pentru cazul utilizării unui sistem cu 6 senzori: un senzor de temperatură conectat la canalul 1 al multiplexorului și patru senzori de forță conectați la canalele 3, 15, 16, 17 și 18.



(a)

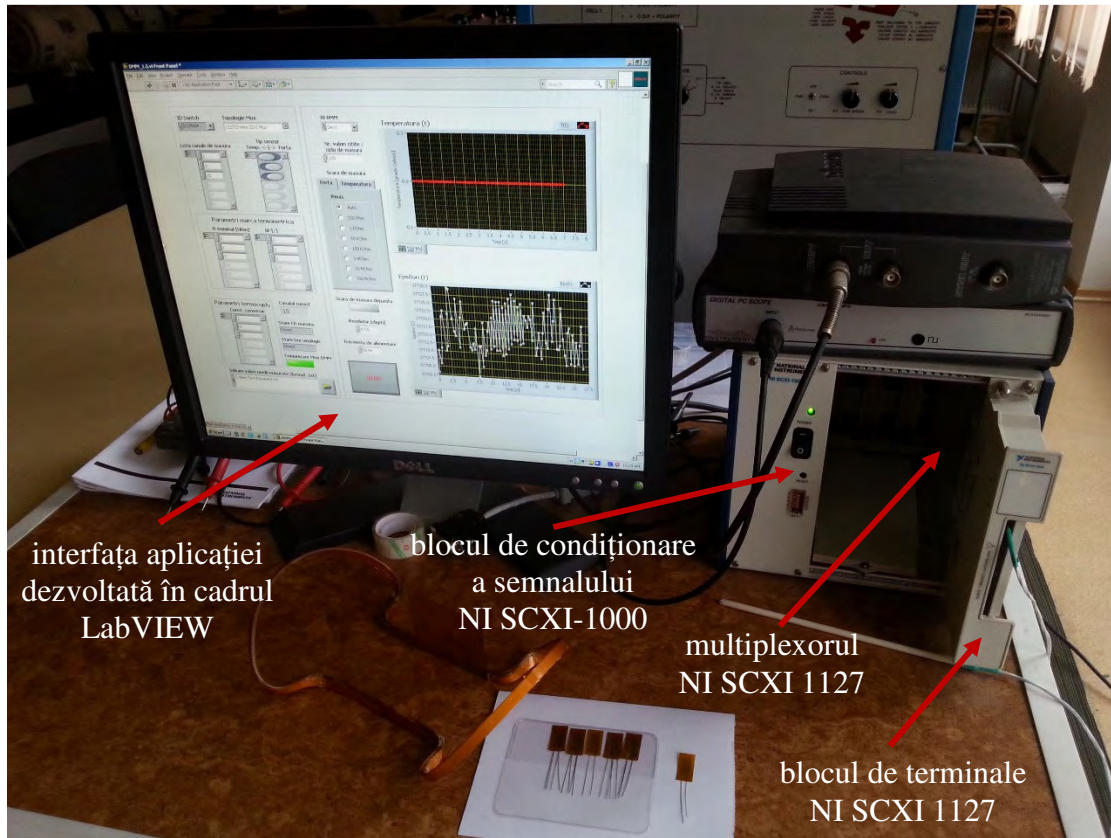


(b)

Fig. 4.3. Diagrama bloc (a) corespunzătoare aplicației LabVIEW destinată măsurării și achiziției datelor și ierarhia (b) VI-urilor din structura acesteia.

4.2. Realizarea sistemului de măsură și achiziție a datelor

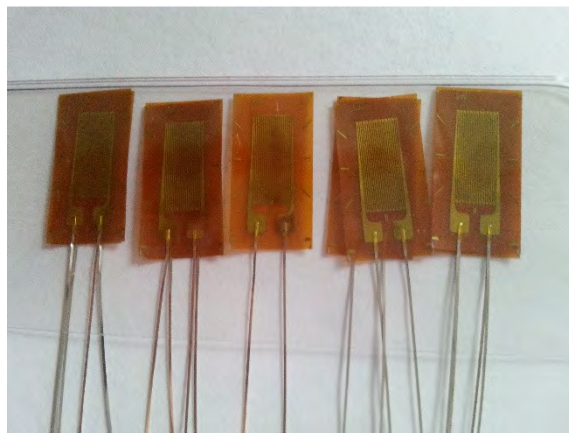
Sistemul de măsură și achiziție a datelor a fost elaborat astfel încât să îndeplinească cerințele impuse de condițiile de lucru: măsurători precise și rapide, realizate baleind mai multe canale de măsură la care sunt conectate mărci tensometrice și termistoare, conversia și salvarea pe hard-disk a mărimilor măsurate pentru analiza ulterioară.



(a)



(b)



(c)

Fig. 4.4. Sistemul de măsură și achiziție a datelor (a), bobina (b) și mărcile tensometrice (c) pregătite pentru efectuarea unor teste preliminare.

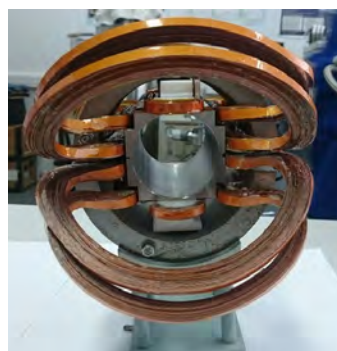
A fost realizată o configurație experimentală (**Fig. 4.4**) care permite efectuarea de măsurători și teste preliminare, folosind o singură bobină de test (**Fig. 4.4,b**) și o configurație de mărci tensometrice (**Fig. 4.4,c**) convenabil poziționate pe suprafața bobinei, cu specificațiile tehnice menționate în cadrul **Anexei 4.1**.

Rezultatele obținute prin modelare matematică și simulare numerică au furnizat informațiile privitoare la regiunile de interes (zonele expuse unor solicitări mecanice periculoase) pentru lipirea mărcilor tensometrice (**Fig. 4.4,c**).

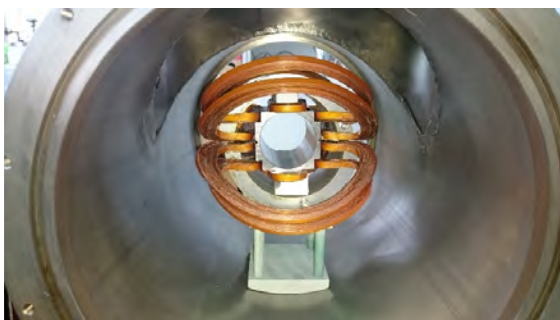
Ulterior, sistemul de măsură și achiziție a datelor poate fi utilizat și pentru evaluarea forțelor și temperaturilor care apar direct în bobina HTS (**Fig. 4.5**).



(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 4.5. Vedere din lateral (a) și din față (b) asupra bobinei HTS și integrarea acesteia în sistemul criogenic (c, d).

4.3. Poziționarea mărcilor tensometrice

Poziționarea mărcilor tensometrice trebuie să țină seama de localizarea eforturilor mecanice. Rezolvarea acestei probleme necesită predeterminarea zonelor susceptibile de sarcini mecanice și deformări structurale semnificative, produse sub acțiunea forțelor electrodinamice care apar în

funcționare. Cunoașterea apriori a stării eforturilor mecanice și a deformărilor constituie este dificil (dacă posibil) utilizând o analiză de ordin de mărime a încărcării mecanice și a deormărilor asociate. O soluție mai precisă este modelarea numerică, și în acest studiu am utilizat-o pentru stabilirea regiunilor cele mai probabil a fi supuse unor eforturi electrodinamice semnificative.

Această strategie necesită formularea și rezolvarea unui ansamblu de modele fizico-matematice: distribuția curentului electric în bobinele electromagnetului; determinarea spectrului câmpului magnetic și a forțelor electrodinamice produse de acesta; determinarea starea de încărcare mecanică aferentă și a deformărilor structurale asociate. Modelele matematice au fost documentate în prima etapă de cercetare [9]. În acest studiu, pentru simplificare, admitem anumite condiții de simetrie indicate de construcția electromagnetului HTS: (1) înfășurarea HTS, este distribuită (spațial) armonic, este alcătuită din spire concentrice; (2) electromagnetul prezintă trei planuri de simetrie; (3) părțile feromagnetice sunt presupuse saturate, deci prezența lor este ignorată. Astfel, modelul numeric poate fi redus la 1/8 din modelul fizic real, Fig. 4.6.

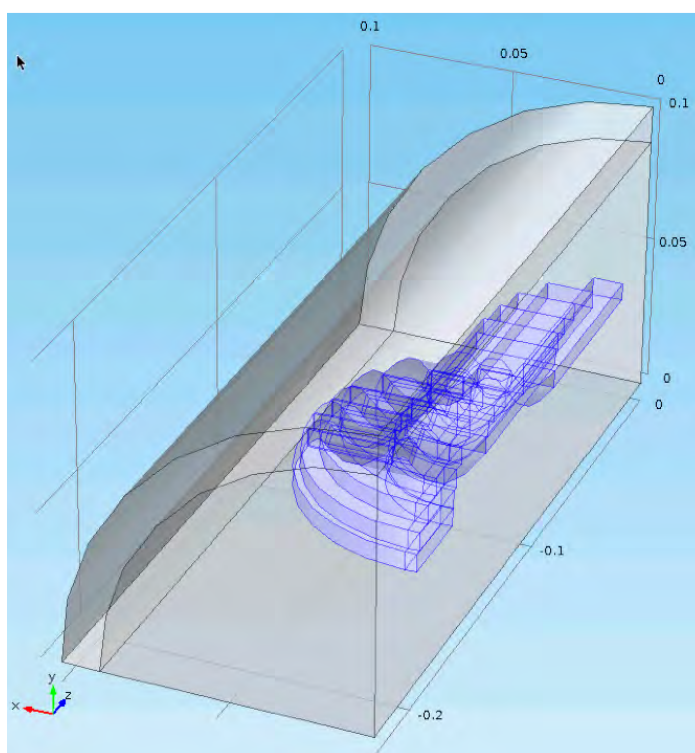
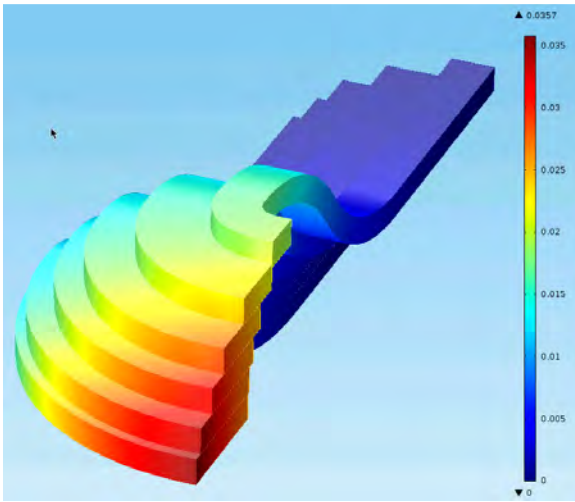
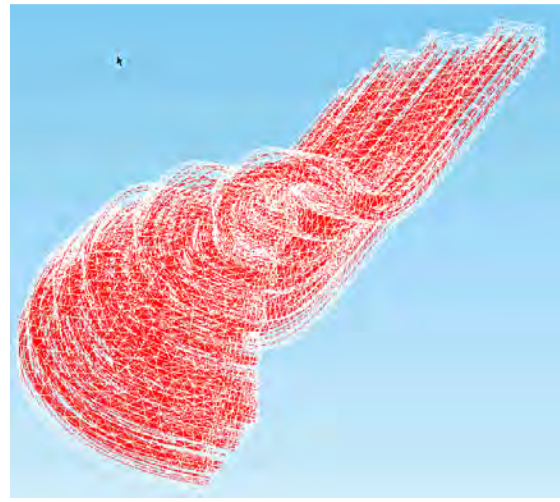


Fig. 4.6. Modelul numeric redus. Dimensiunile sunt în metri.

O primă problemă potențială, auxiliară, este rezolvată pentru a determina anizotropia conductivității electrice a pachetelor de benzi HTS care alcătuiesc înfășurarea HTS. Apoi, este rezolvată problema electrocinetică a distribuției curentului electric în înfășurarea HTS, Fig. 4.7.



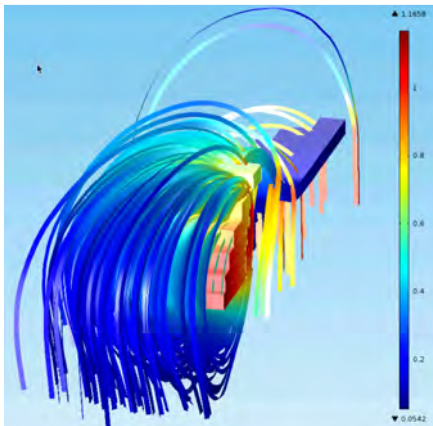
(a) Potențialul electrocinetic [V].



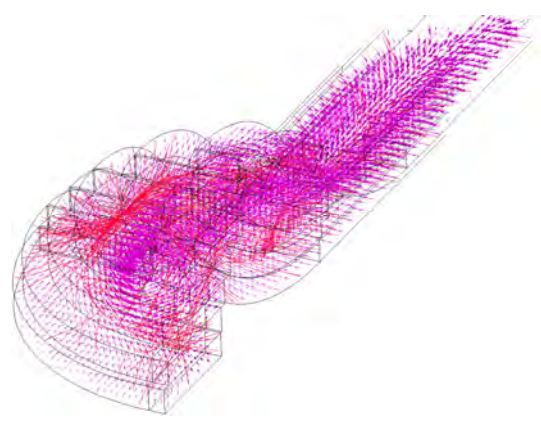
(b) Densitatea curentului electric de conducție.

Fig. 4.7. Rezultate de modelare numerică pentru problema electrocinetică.

În această problemă, sursa de câmp este pe frontieră, se presupune o densitate de curent de 10^7 A/m². Folosind distribuția de curent astfel determinată, se rezolvă problema de câmp magnetic, Fig. 4.8.



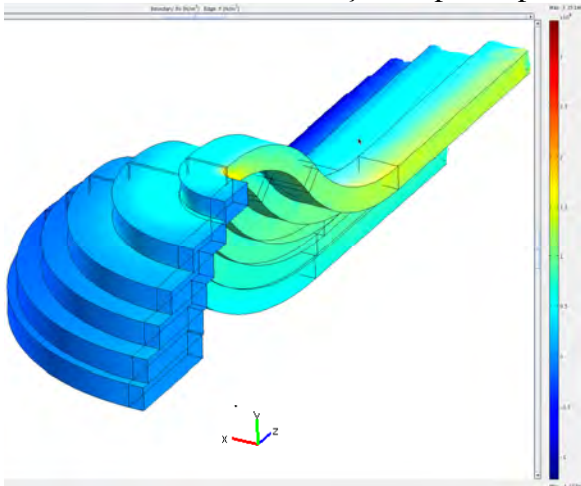
(a) Inducția magnetică [T].



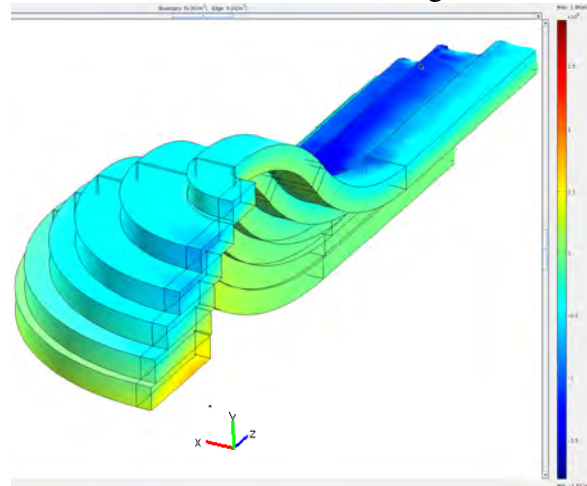
(b) Forțele electrodinamice.

Fig. 4. 8. Rezultate de modelare numerică pentru câmpul magnetic în electromagnetul HTS.

În continuare, utilizând forțele Laplace, poate fi calculată încărcarea mecanică, Fig. 4.9.



(a) Componenta **Ox**, forța Laplace.



(b) Componenta **Oy**, forța Laplace.

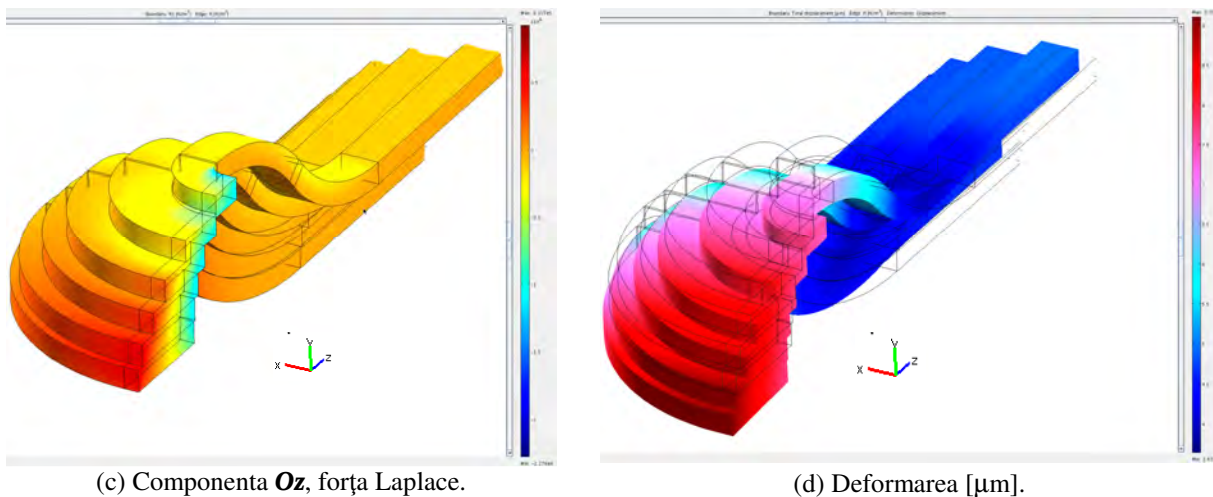


Fig. 4.9. Rezultate de simulare numerică pentru problema structurală.

Mărcile tensometrice pot fi plasate în zonele cu solicitările electrodinamice importante, astfel determinate.

4.4. Concluzii la capitolul 4.

În cadrul acestei etape a fost realizat modelul experimental de masurare a fortelor si tensiunilor din bobinajele supraconductoare HTS, compus din:

- sistemul de măsură și achiziție a datelor
- senzorii tensometrice criogenici de masura.

Acesta urmează a fi utilizat pentru efectuarea măsurătorilor de forțe la care este expusă bobina. Poziționarea mărcilor tensometrice este dictată de rezultatele analizei numerice. În acest fel se asigură utilizarea unui număr optim de senzori, care acoperă toate regiunile de interes. Rezultatele măsurătorilor vor fi comparate cu cele obținute în studiul numeric.

- A fost utilizată modelarea numerică în Comsol Multiphysics, pentru stabilirea regiunilor cele mai probabil a fi supuse unor eforturi electrodinamice semnificative. Aceste date vor fi utilizate pentru poziționarea cu precizie a mărcilor tensometrice pentru monitorizarea stării de încărcare mecanică a înfășurării HTS.

4.5. Bibliografie

- [1] NI DMM-4065, National Instruments Corporation, <http://www.ni.com/pdf/manuals/374315g.pdf>
- [2] NI SCXI-1127, National Instruments Corporation, http://www.ni.com/pdf/products/us/4sw486-487_502.pdf
- [3] NI SCXI-1331, National Instruments Corporation, <http://www.ni.com/pdf/manuals/320515f.pdf>
- [4] NI SCXI-1000, National Instruments Corporation, http://www.ni.com/pdf/products/us/4scxisc333_334_335_336.pdf
- [5] LabVIEW 2011 SP1 (32 bit), National Instruments Corporation, <http://www.ni.com/download/labview-development-system-2011-sp1/2871/en/>
- [6] NI-DMM 14.0, National Instruments Corporation, <http://www.ni.com/download/ni-dmm-14.0/4820/en/>
- [7] NI-SWITCH 14.0, National Instruments Corporation, <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/ro/nid/13621>
- [8] HBM Strain Gauges and Accesories, <https://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/hbmdoc/technical/s3996.pdf>
- [9] „Electromagnet supraconductor dipolar pentru generarea de câmp magnetic intens și uniform” – EMSD – Raportul Etapei I, 2014

CAPITOLUL 5. Realizarea jugului de fier, a sistemului de fixare mecanica al acestuia si a bobinelor supraconductoare pentru EMSD - model experimental.

In cadrul etapei prezente, partenerul P3 a realizat parti componente ale electromagnetului supraconductor – model experimental.

5.1. Jugul de fier

Acesta a fost realizat conform desenelor de executie din etapa anterioara, din tabla silicioasa groasa de 0,2mm. Tolele au fost realizate prin electroeroziune, capatand in final o forma de patura cilindrica cu dimensiunile (fig. 2.10-2.12):

Diametrul exterior : 130mm

Diametrul interior : 90 mm

Lungime: 100 mm

Greutate: 3,5 Kg.

5.2. Sistemul mecanic de fixare

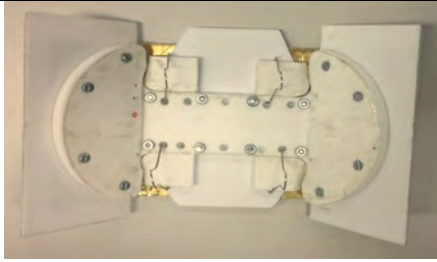
Sistemul mecanic de fixare al jugului de fier este realizat din sticlortextolit si are functia de sustinere mecanica a sistemului de bobine supraconductoare impreuna cu jugul de fier si suportul bobinelor supraconductoare (fig. 2.9). Intrucat face legatura intre jugul de fier si criostat, acesta trebuie sa aibe o conductivitate termica minima.

5.3. Suportul bobinelor supraconductoare

Este realizat din atel inox austenitic (nemagnetic) si are rol de sustinere mecanica a bobinajelor supraconductoare dar si de element conductor de racire a bobinelor HTS, permiitand preluarea caldurii de la bobine si transmitand-o criostatului. (fig. 2.4.-2.5.)

5.4. Dispozitivul de realizare a bobinelor supraconductoare.

Realizat din materiale diverse (alama si teflon), acesta a permis executia bobinelor supraconductoare supraconductoare sub forma de „sa” . (fig. 5.1-5.2.). teflonul a fost necesar pentru a se evita aderenta rasilor de impregnare la materialul dispozitivului.

	
Fig. 5.1. Dispozitivul de executie bobine HTS in forma de „sa” –vedere de sus.	Fig. 5.2. Dispozitivul de executie bobine HTS in forma de „sa” –vedere laterala.

In fig. 5.3., se poate observa ansamblul de sistem de executie bobine in forma planara (realizat in etapa anterioara, impreuna cu dispozitivul de executie a bobinelor in forma de „sa” .

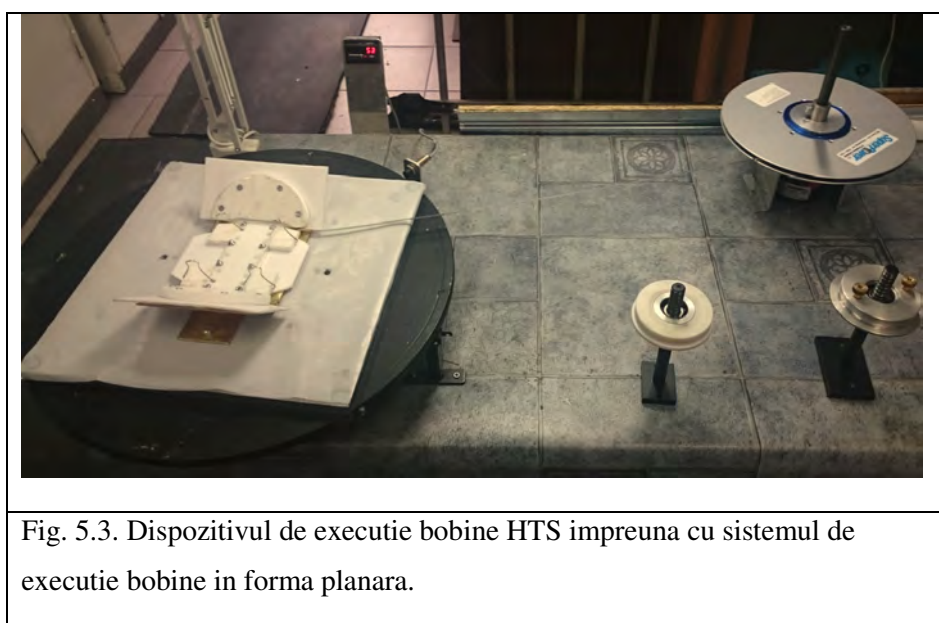


Fig. 5.3. Dispozitivul de executie bobine HTS impreuna cu sistemul de executie bobine in forma planara.

5.5. Concluzii la capitolul 5

In cadrul prezentei etape, partenerul P3, a realizat:

- Executia jugului de fier al electromagnetului EMSD – model de laborator
- Executia sistemului mecanic de fixare al jugului de fier
- Executia suportului mecanic al bobinelor supraconductoare
- Executia dispozitivului de realizare a bobinelor supraconductoare HTS.

Capitolul 6. Diseminarea rezultatelor cercetarii

Rezultatele cercetarilor din cadrul etapei prezente, au fost sustinute la diverse manifestarii stiintifice (conferinte, simpozioane) natioanle si internationale:

1. I. Dobrin, A. M. Morega, D. Enache, M. Morega, A. Dobrin, “**HTS Dipole Magnet, Conduction Cooled for Particle Accelerators**”, International Conference on Superconductivity and Magnetism, Fethiye, Turkey, 2016.
2. D. Enache, I. Dobrin, A. M. Morega, M. Morega, A. Dobrin, “**Experiments on YBCO tape type High Temperature Superconductors Junctions**”, The International Conference on Applied and Theoretical Electricity, Craiova, Romania, 2016, 978-1-4673-8562-6/16/\$31.00©2016 IEEE.
3. D. Enache, I. Dobrin, A. M. Morega, S. Apostol, “**Superconductive Dipolar Electromagnets for Particle Accelerators. Two Constructive Models.**”, Buletinul Institutului Politehnic din Iasi, Tome LIX(LXIII), Fasc. 4, 2015

Capitolul 7. Protejarea drepturilor de proprietate industrială

Coordonatorul proiectului de cercetare, impreuna cu partenerii la prezentul proiect, au depus o cerere de brevet de inventie la OSIM, pentru „Sistem magnetic supraconductor, generator de camp magnetic intens si uniform” cu nr. de inregistrare A/00885/22.11.2016 (Anexa 2)

Capitolul 8. Concluzii Generale

In cadrul etapei 3/2016 la prezentul contract, s-au realizat urmatoarele:

In cadrul prezentei etape, Coordonatorul temei de cercetare (ICPE-CA) a realizat urmatoarele:

- **Executia partilor componente** ale modelului experimental de electromagnet supraconductor dipolar (EMSD): bobinele supraconductoare, conductorii de curent HTS, conductorii de cupru si ecranul termic al sistemului de bobine HTS.
- **Asamblarea modelului experimental** de EMSD alcatuit din: criostat, sistem criogenic de racire a bobinelor supraconductoare (crioracitor G-M in doua trepte de racire), a bobinelor supraconductoare HTS impreuna cu suportul conductiv al acestora, cu jugul de fier si suportii de sustinere (1 si 2) ai ansamblului de bobine, conductorii de curent si ecranul termic.

Partenerul P1 (IFIN-HH) a realizat un model experimental de sistem de masura si mapare a campului magnetic, care are urmatoarea componenta:

- Un sistem electromecanic de deplasare in trei axe (3D) pentru sonda de masura a campului magnetic, cu precizia de deplasare de $\pm 2\mu$ in plan xy si respectiv $\pm 1\mu$ pe directia Oz.
- Un lant de masura a campului magnetic alcatuit din: Gauss-metru digital de tip Group 3, cu domeniul de masura 0-3T si precizie de $\pm 0,016\%$ si o sonda Hall miniatura (Group 3) de tip MPT 132, cu o precizie de masura de $\pm 0.03\%$. Precizia lantului de masura: $\pm 0,033\%$.
- O aplicatie Software in Labview pentru achizitia datelor masurate de lantul de masura si reprezentarea grafica a acestora.
- Au fost efectuate teste preliminare de verificare a functionarii sistemului de masura si mapare a campului magnetic. Au fost puse in evidenta cursele maxime ale sistemului electromecanic de deplasare 3D: 30cm pentru Ox si Oy si 10 cm pentru Oz. Rezolutia de deplasare: 1μ pentru planul xy si $0,5\mu$ pentru Oz.

Partenerul P2 (UPB) a realizat modelul experimental de masurare a fortelor si tensiunilor din

bobinajele supraconductoare HTS, compus din:

- sistemul de măsură și achiziție a datelor
- senzorii tensometrici criogenici de masura.

Acesta urmează a fi utilizat pentru efectuarea măsurătorilor de forțe la care este expusă bobina. Poziționarea mărcilor tensometrice este dictată de rezultatele analizei numerice. În

acest fel se asigură utilizarea unui număr optim de senzori, care acoperă toate regiunile de interes. Rezultatele măsurătorilor vor fi comparate cu cele obținute în studiul numeric.

- A fost utilizată modelarea numerică în Comsol Multiphysics, pentru stabilirea regiunilor cele mai probabil a fi supuse unor eforturi electrodinamice semnificative. Aceste date vor fi utilizate pentru poziționarea cu precizie a mărcilor tensometrice pentru monitorizarea stării de încărcare mecanică a înfășurării HTS.

Partenerul P3 (Nuclear Inginery srl), a realizat:

- Executia jugului de fier al electromagnetului EMSD – model de laborator
- Executia sistemului mecanic de fixare al jugului de fier
- Executia suportului mecanic al bobinelor supraconductoare
- Executia dispozitivului de realizare a bobinelor supraconductoare HTS.

Au fost sustinute lucrari stiintifice la 3 Conferinte Internationale de specialitate si a fost elaborata si depusa 1 (una) cerere de brevet de inventie la OSIM cu nr. A/00885/22.11.2016 (Anexa 2).

In concluzie, toate obiectivele etapei au fost realizate.

Anexă 1. — Mărci tensometrice alese pentru configurația experimentală [8].

SG in series Y

Series Y

with 1 measuring grid / linear SG

LY11

Linear SG

Temperature response matched to steel
with $\alpha = 10,8 \cdot 10^{-6}/K$ ($6,0 \cdot 10^{-6}/^{\circ}F$)

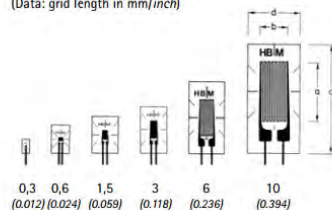
LY13

Temperature response matched to aluminum
with $\alpha = 23 \cdot 10^{-6}/K$ ($12,8 \cdot 10^{-6}/^{\circ}F$)

LY1x

Temperature response matched to customer's choice
see page 16

Illustrations show actual size
(Data: grid length in mm/inch)



Contents per package: 10 pcs.



Types available ex stock		Variants	No- minal resis- tance	Dimensions (mm/inch)				Max. perm. effective bridge ex. voltage	Solder terminals
Steel	Aluminum	Other	Ω	Measuring grid		Measuring grid carrier		V	
				a	b	c	d		
1-LY11-0.3/120		1-LY1x-0.3/120 ^(*)	120	0.3 0.012	0.9 0.035	2 0.079	1.2 0.047	0.6	LS 7
1-LY11-0.6/120	1-LY13-0.6/120	1-LY1x-0.6/120 ^(*)	120	0.6 0.024	1 0.039	5 0.197	3.2 0.126	1.5	LS 7
1-LY11-1.5/120	1-LY13-1.5/120	1-LY1x-1.5/120	120	1.5 0.059	1.2 0.047	6.5 0.256	4.7 0.185	2.5	LS 7
1-LY11-3/120	1-LY13-3/120	1-LY1x-3/120	120	3 0.118	1.6 0.063	8.5 0.335	4.5 0.177	4	LS 7
1-LY11-3/120A		1-LY1x-3/120A	120	3 0.118	1.6 0.063	8.5 0.335	4.5 0.177	4	LS 7
1-LY11-6/120	1-LY13-6/120	1-LY1x-6/120	120	6 0.236	2.7 0.106	13 0.512	6 0.236	8	LS 5
1-LY11-6/120A		1-LY1x-6/120A	120	6 0.236	2.7 0.106	13 0.512	6 0.236	8	LS 5
1-LY11-10/120	1-LY13-10/120	1-LY1x-10/120	120	10 0.394	4.6 0.181	18.5 0.728	9.5 0.374	13	LS 5
1-LY11-10/120A		1-LY1x-10/120A	120	10 0.394	4.6 0.181	18.5 0.728	9.5 0.374	13	LS 5
1-LY11-1.5/350	1-LY13-1.5/350	1-LY1x-1.5/350 ^(*)	350	1.5 0.059	1.2 0.047	5.7 0.224	4.7 0.185	4.5	LS 7
1-LY11-3/350	1-LY13-3/350	1-LY1x-3/350	350	3 0.118	1.6 0.063	8.5 0.335	4.5 0.177	7	LS 7
		1-LY1x-3/350A	350	3 0.118	1.6 0.063	8.5 0.335	4.5 0.177	7	LS 7
1-LY11-6/350	1-LY13-6/350	1-LY1x-6/350	350	6 0.236	2.8 0.11	13 0.512	6 0.236	13	LS 5
		1-LY1x-6/350A	350	6 0.236	2.8 0.11	13 0.512	6 0.236	13	LS 5
1-LY11-10/350		1-LY1x-10/350	350	10 0.394	5.0 0.197	18.5 0.728	9.5 0.374	23	LS 5
		1-LY1x-10/350A	350	10 0.394	5.0 0.197	18.5 0.728	9.5 0.374	23	LS 5

LY21

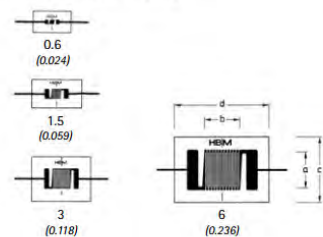
Linear SG

Temperature response matched to steel
with $\alpha = 10,8 \cdot 10^{-6}/K$ ($6,0 \cdot 10^{-6}/^{\circ}F$)

LY2x

Temperature response matched to customer's choice
see page 16

Illustrations show actual size
(Data: grid length in mm/inch)



Contents per package: 10 pcs.

Types available ex stock		Variants	No- minal resis- tance	Dimensions (mm/inch)				Max. perm. effective bridge ex. voltage	Solder terminals
Steel	Aluminum	Other	Ω	Measuring grid		Measuring grid carrier		V	
				a	b	c	d		
1-LY21-0.6/120		1-LY2x-0.6/120 ^(*)	120	0.6 0.024	0.6 0.024	3.5 0.138	6.4 0.252	1	LS 7
		1-LY2x-1.5/120	120	1.5 0.059	1.5 0.059	4.7 0.185	8.3 0.327	2	LS 5
1-LY21-3/120		1-LY2x-3/120	120	3 0.118	2.8 0.11	7.5 0.295	10 0.394	6	LS 5
		1-LY2x-6/120	120	6 0.236	6 0.236	11 0.433	16 0.63	12	LS 4

^(*) Types are only available with matching to aluminum, ferritic or austenitic steel



CERERE DE BREVET DE INVENTIE

Nr. referinta solicitant/mandatar <i>ICPE-CA</i>	Registratura OSIM (numarul si data primirii): <i>A/00885</i> <i>22-11-2010</i>
---	---

Sa completeaza de catre OSIM

a	t	
a		
a1	a	a
dupa primirea parti lipsa la Registratura Generala a OSIM		
a1	a	a
a		

1. Solicitanți (nume și prenume/denumire, adresă de domiciliu/sediu, telefon, fax, e-mail) Institutul National de Cercetare Dezvoltare pentru Inginerie Electrică ICPE-CA Splaiul Unirii 313, sector 3, Bucuresti, 030138 Tel: 346 72 31, Fax: 346 82 99 ☐ continuare pe pag.3
--

2. Solicitam în baza Legii nr. 64/1991 privind brevetele de invenție, republicată, modificată prin Legea nr.83/2014 privind invențiile de serviciu acordarea unui brevet de invenție cu titlul: Sistem magnetic supraconductor, generator de camp magnetic intens si uniform 2.1. Solicitantul este îndreptățit la depunerea cererii de brevet de invenție în baza : Legii nr. 64/1991 privind brevetele de invenție, republicată; Legii nr.83/2014 privind invențiile de serviciu. X unui contract de cercetare 2.2. Referinta la o cerere depusă anterior (numar, data de depozit, tara/oficiul):

3. Declarăm că inventatorii sunt cei desemnați în formularul „Declarație conținând desemnarea inventatorilor” ☒ anexat ☐ care va fi transmis ulterior

4. Rezumatul invenție se publică împreună cu figura numărul:

5. Revendicăm prioritatea convențională (stat, numar, data depozit):

6. Revendicăm prioritatea internă (numar cerere de brevet, data depozit):
--

- sarcina maxima 3 Kg;
- excursia 30 cm
- precizie pozitionare +/- 10 microni
- repetabilitatea pozitionare +/- 0,5 microni
- viteza maxima 50mm/secunda
- franare electromagnetica

3. Partenerul P2 a realizat:

- proiectarea unui sistem de măsură și achiziție a datelor corespunzătoare forțelor din bobinajele supraconductoare și a temperaturilor din domeniul criogenic.

Performante ale acestui sistem:

- precizie (rezoluție de 6 digiți)
- viteză mare de achiziție a datelor măsurate (10 eşantioane/sec, la rezoluție maximă).

Sistemul este dezvoltat pe baza unui multimetru digital PCI și a unui multiplexor, care permite conectarea și scanarea unui număr maxim de 64 de senzori.

- Comanda și controlul sistemului hardware și pentru achiziția, procesarea și stocarea datelor măsurate a fost dezvoltată o aplicație în mediul de programare LabVIEW.

Sistemul de măsură și achiziție a forțelor și temperaturilor va fi utilizat în corelație cu rezultatele obținute prin modelare matematică și simulare numerică a câmpului electromagnetic și stării de încărcare structurală, care oferă informații despre solicitările mecanice (niveluri și distribuție spațială) generate de forțele electrodinamice care apar în configurația bobinelor supraconductoare.

4. Partenerul P3 a realizat:

- Proiectarea jugului de fier și a sistemului mecanic de fixare a bobinajului supraconductor .

Jugul de fier a fost conceput într-o formă care să permită asamblarea peste bobinajele supraconductoare, fiind realizat din tole din tabla silicioasă cu grosimea de 0,5mm, pentru evitarea pierderilor prin curenți turbionari. Dimensiunile lui sunt: 100mm lungime și diametrul exterior de 130mm, iar cel interior de 100 mm.

- Proiectare dispozitiv de execuție cilindrică a bobinajelor supraconductoare HTS.

Au fost realizate desenele de execuție ale dispozitivului de execuție a bobinajelor în formă cilindrică (pentru asamblare finală a bobinajelor).. Bobinele supraconductoare, după execuție în formă planară, trebuie asamblate pe cindrul interior al electromagnetului. Acest dispozitiv realizează formatarea finală a bobinajului supraconductor.

- A fost executat dispozitivul de realizare bobinaje supraconductoare în formă planară. Acesta este alcătuit în principal dintr-un dispozitiv plan, rotitor, pe care sunt așezate formele pentru bobinaje în formă planară și un dispozitiv de derulare a benzii supraconductoare și de tensionare controlată a acestuia.

În concluzie, toate obiectivele din cadrul prezentei etape, au fost realizate.

SECTIUNEA 1

RAPORTUL STIINTIFIC SI TEHNIC

DENUMIRE CONTRACT: Electromagnet supraconductor dipolar pentru generarea de
camp magnetic intens si uniform

ACRONIM: EMSD

FAZA DE EXECUTIE NR. 4/2017

CU TITLUL. Experimentare electromagnet supraconductor dipolar si diseminare rezultate

RST – raport stiintific si tehnic in extenso

Electromagnet supraconductor dipolar pentru generarea de camp magnetic intens si uniform
Etapă 4 / 2017: “Experimentare electromagnet supraconductor dipolar si diseminare
rezultate”

Cuprins

pag.

A.OBIECTIVE GENERALE	4
B.OBIECTIVELE ETAPEI DE EXECUȚIE	
C. REZUMATUL ETAPEI DE EXECUȚIE	4
D. DESCRIEREA ȘTIINȚIFICĂ ȘI TEHNICĂ	4
Capitolul 1. Experimentarea generala a EMSD –model experimental. (CO, P3 – Activitate 4.1)	7
1.1. Introducere	7
1.2. Descrierea electromagnetului supraconductor dipolar	8
1.2.1.Parametrii de proiectare ai modelului experimental	8
1.2.2.Realizarea modelului experimental de electromagnet supraconductor	8
1.3. Testarea si experimentarea generala a electromagnetului supraconductor	10
1.3.1. Testarea la vid a criostatului	10
1.3.2.Testarea parametrilor functionali ai crioracitorului	10
1.3.3.Masurarea parametrilor functionali ai bobinelor supraconductoare	11
1.3.3.1. Bobinele supraconductoare HTS	11
1.3.3.2.Masurarea parametrilor electrici ai bobinelor supraconductoare	12
1.3.3.3.Masurarea curentilor critici ai bobinelor supraconductoare	13
1.3.3.3.1.Montajul de masura pentru curentii critici	13
1.3.3.3.2.Rezultate experimentale	14
1.3.4.Masurarea inductiei campului magnetic generat de EMSD	16
1.3.4.1.Montajul utilizat pentru generarea campului magnetic	16
1.3.4.2.Montajul utilizat pentru masurarea campului magnetic	16
1.3.4.3.Rezultate experimentale	17
1.4. Concluzii	19
Bibliografie	19
P3 – Realizare sistem mecanic de fixare a jugului de fier si a bobinelor supraconductoare	20

Capitolul 2.

Experimentarea sistemului de mapare a campului magnetic.

(P1- Activitate 4.2.)	21
2.1.Experimentarea sistemului de mapare a campului magnetic	21
2.1.1.Executia si caracteristicile sistemului de masura. Teste si masuratori.	21
2.1.2. Testare/calibrare sistem de masura. Teste si masuratori.	23
2.2. Diseminare rezultate	26
2.3. Concluzii	28

Capitolul 3. Experimentarea sistemului de masura a tensiunilor mecanice pe modelul experimental de EMSD (P2 – Activitate 4.3.)

3.1. Analiza stabilitatii structurale a magnetului dipolar supraconductor	29
3.1.1.Introducere	29
3.1.2. Proiectarea si realizarea electromagnetului EMSD	29
3.1.3.Rezultatele modelarii matematice si simularilor numerice	30
3.1.4.Masurarea fortelor exercitate asupra bobinajelor HTS	34
3.1.5.Rezultate experimentale	36
3.1.6. Concluzii	37
Bibliografie	38

Capitolul 4. Diseminare rezultate.

(CO,P1, P2: Activitatea II.4.)	39
--------------------------------	----

Capitolul 5. Concluzii generale

40

A. OBIECTIVELE GENERALE ALE PROIECTULUI

În cadrul proiectului se preconizează realizarea unui electromagnet supraconductor dipolar pentru generarea de câmp magnetic intens și uniform pentru acceleratoare de particule.

Proiectul are drept obiective generale:

- realizarea și testarea unui electromagnet supraconductor cu bobinaj HTS, pentru generarea de câmp magnetic dipolar cu acces direct la zona de câmp magnetic, din exterior.
- Realizarea și testarea unui sistem de măsură a câmpului magnetic produs de electromagnet.
- Realizarea și testarea unui sistem de măsură a tensiunilor mecanice din bobinajul supraconductor
- Realizarea unui sistem de execuție a bobinelor supraconductoare HTS pentru electromagnetul supraconductor.

B.OBIECTIVELE ETAPEI DE EXECUTIE

Conform cu planul de realizare a proiectului, în prezenta etapă s-a realizat:

„Experimentare electromagnet supraconductor dipolar și diseminare rezultate”

Obiectivele principale ale etapei de execuție cu numărul 4/2017, sunt:

1. Experimentarea generală a EMSD –model experimental
2. Experimentarea sistemului de mapare a câmpului magnetic pe modelul experimental de EMSD
3. Experimentarea sistemului de măsură a tensiunilor mecanice pe modelul experimental de EMSD
4. Realizare sistem mecanic de fixare a bobinelor supraconductoare și a jugului de fier.
5. Diseminare rezultate.

C. REZUMATUL ETAPEI DE EXECUTIE

În cadrul etapei au fost realizate:

Coordinator CO:

- Teste și experimentări pentru stabilirea funcționalității modelului experimental și a parametrilor funcționali ai acestuia.
- Caracteristicile magnetului supraconductor dipolar:
 - magnetul supraconductor, produce un câmp magnetic intens ($>2T$) în centrul sau, cu o uniformitate de $\sim 10^{-3}$;
 - un canal „cald” de acces pentru particulele accelerate;
 - diametrul canal interior acces: 20 mm;

- dimensiuni zona utila de camp: cca 80 cm³;
 - racire fara agenti criogenici (utilizare criocooler) prin conductie termica.
 - utilizare materiale supraconductoare HTS de tip YBCO;
- Electromagnetul supraconductor este alcatuit din: criostat, suportul bobinelor supraconductoare, bobinele supraconductoare HTS, si jugul de fier .
 - Bobinele supraconductoare s-au realizat din material HTS de tip YBCO, sub forma de banda cu urmatoarele caracteristici:latimea benzii: 6 mm; grosimea benzii: 0.11 mm, curent critic: 120A @77K.
 - Sistemul criogenic de racire al electromagnetului. Acesta este un crioracitor cu ciclu inchis, de tip Gifford-McMahon care raceste prin conductie termica, cu doua trepte de racire. Caracteristicile tehnice specifice ale acestuia sunt puterea termica si valoarea temperaturii celor doua capete de racire, respectiv: 35W@50K si 1,5W@4,2K.
 - Criostatul electromagnetului supraconductor. Este realizat din otel austenitic cu rol de izolare termica a bobinelor supraconductoare si a crioracitorului. Criostatul se vedeaza la un nivel de 10⁻⁵ torr.
 - Conductorii de alimentare electrica a magnetului. Acestia sint conductori mixti (cupru si conductori HTS), pentru alimentarea electrica a bobinajelor supraconductoare de la sursa de cc externa. Conductorii de cupru si cei HTS sunt dimensionati corespunzator pentru un curent de maxim 300A.
 - Au fost efectuate urmatoarele teste si experimentari pe elementele componente ale electromagnetul supraconductor realizat cat si pe electromagnetul propriuzis, dupa cum urmeaza:
 - teste de verificare a vidului din criostat (10⁻⁵-10⁻⁶ torr)
 - testarea functionalitatii si a parametrilor de racire ai criocoolerului: temperatura de racire pe treapta 1 a fost de 60K iar pe treapta 1 de 4,2K iar temperatura bobinajului HTS ~ 25K.
 - testarea capabilitatii de racire a ansamblului bobine supraconductoare/jug de fier si a ecranului termic;
 - masurarea campului magnetic generat de electromagnet si a uniformitatii acestuia (B_{max} ~2,30T si ~ 0,1% neuniformitate).

Partener P1:

Experimentare sistem de masura campului magnetic.

A fost realizat si testat un sistem masurare si mapare a campului magnetic generat de electromagnetul supraconductor. Acesta consta in:

- sonda Hall de masurare a campului magnetic

- teslametru pentru conversia semnalului sondei Hall in unitati de inductie camp magnetic (T);
- sistem mecanic de translatie 3D, pentru pozitionarea sondei Hall in punctele predeterminate pentru masurarea valorilor inductiei campului magnetic.
- Soft specializat pentru construirea unei „harti 3D a valorilor inductiei campului masurate in diverse puncte.
- Au fost realizate masurarea campului magnetic generat de electromagnetul supraconductor de-a lungul axului sau geometric si s-au obtinut urmatoarele rezultate:
- inductia campului pe axul central al magnetului: 2,303 T
- neuniformitatea campului de-a lungul axului geometric: $\sim 0,1\%$

Partener P2:

- A realizat si testat un sistem masurare a tensiunilor mecanice din bobinajele supraconductoare care apar cu precadere in capetele de bobinelor datorita interactiei electromagnetice (forte Lorentz), intre elementele de bobinaj. Acest sistem este alcatuit din urmatoarele parti componente: senzori tensometrici amplasati pe zonele de interes ale bobinajului, sistemul de achizitie a datelor de la senzori si software-ul (interfata de lucru) pentru vizualizarea indicatiilor senzorilor.

S-au efectuat masuratori pe bobinajul supraconductor HTS la temperatura azotului lichid (77K)

Partener P3:

- Executia sistemului mecanic de fixare a bobinelor HTS.
 - A fost executat sistemul mecanic de fixare a bobinajelor supraconductoare HTS si a jugului de fier.
 - Au fost realizate teste experimentale asupra electromagnetului in coparticipare cu Coordonatorul.

Diseminare rezultate: Sustinerea a **doua lucrari** stiintifice la doua conferinte internationale de specialitate.

D. DESCRIERE STIINTIFICA SI TEHNICA

CAPITOLUL 1.

EXPERIMENTAREA ELECTROMAGNETULUI SUPRACONDUCTOR DIPOLAR

1.1. INTRODUCERE

Proiectul propune realizarea unui prototip de electromagnet supraconductor dipolar care generează un câmp magnetic intens (2- 3T) și uniform într-o zonă extinsă și bine definită, așa numitul „canal cald” al electromagnetului, pe toată lungimea acestuia. Prin acest canal cald trece fluxul de particule încărcate electric și accelerate la energii mari ($\sim$ GeV-TeV), pentru a fi deviat de la direcția inițială și menținut pe o traiectorie curbilinie. Aceasta deviere se realizează prin trecerea particulelor încărcate electric prin zone de câmp magnetic intens și uniform.

Acest tip de electromagnet supraconductor este destinat utilizării în acceleratoarele de particule moderne, de mare energie, fără de care nu poate fi conceput progresul fizicii actuale sau pentru diverse alte aplicații industriale. În cadrul temei, pentru dimensionarea electromagnetului, se vor utiliza ultimele realizări în domeniul software-ului destinat modelării numerice 3D (Comsol Multiphysics) a câmpului magnetic și a simulării funcționării electromagnetului. De asemenea se va utiliza ultima generație a tehnologiei pentru obținerea temperaturilor joase (Crioracitoare) care elimină utilizarea agenților criogenici și se va folosi ultimul tip de materiale supraconductoare așa numite supraconductori HTS (High Temperature Superconductors).

În cadrul lucrărilor s-au realizat și testat un sistem de măsurare a tensiunilor mecanice care apar în bobinajele supraconductoare de către partenerul 2 – Universitatea Politehnica București, care pune în evidență zonele cele mai solicitate de către forțele electromagnetice Laplace în vederea asigurării acelor zone împotriva deformării bobinajului.

Partenerul 1- IFIN-HH, a realizat și testat un model experimental de măsurare și „mapare” a câmpului magnetic. Astfel, câmpul magnetic generat va putea fi și evaluat din punct de vedere a calității câmpului (valoare și uniformitate).

În cadrul etapei actuale (4/2017), obiectivul principal este testarea și experimentarea modelelor experimentale realizate în etapa anterioară: a electromagnetului supraconductor, a sistemului de măsură și mapare a câmpului magnetic și a sistemului de măsură a tensiunilor mecanice din bobinajele supraconductoare.

Diseminarea s-a realizat prin susținerea în anul 2017 a două lucrări științifice la Conferințe Internaționale de prestigiu, organizate sub egida societății IEEE (ATEE 2017 și EUCAS 2017).

1.2. DESCRIEREA ELECTROMAGNETULUI SUPRACONDUCTOR DIPOLAR

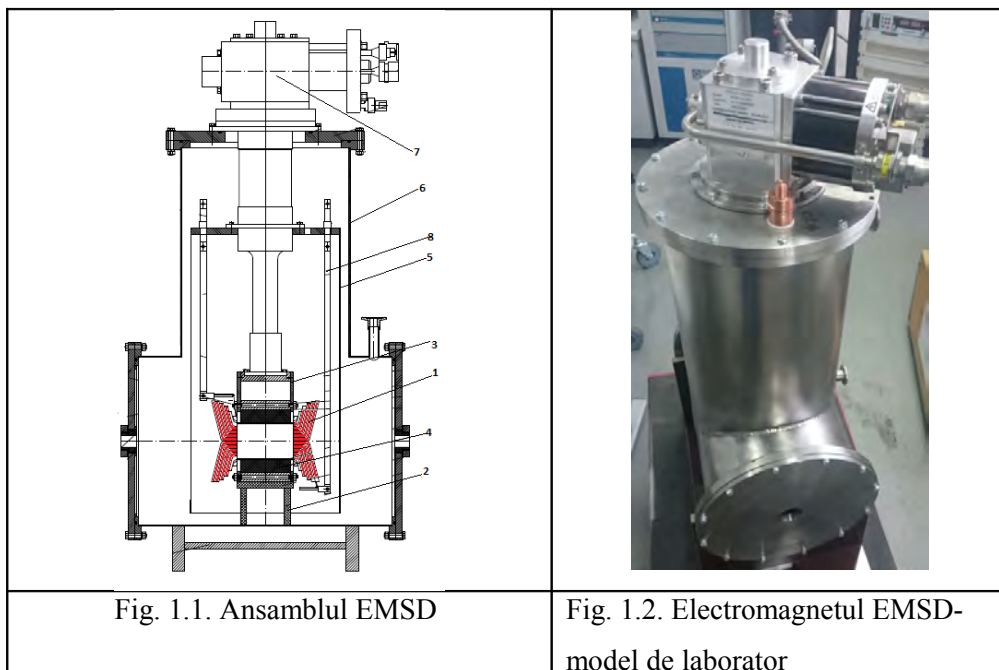
În cadrul etapei anterioare (3/2016), a fost realizat modelul experimental de EMSD, care are următoarea componentă:

1.2.1. Parametrii de proiectare ai modelului experimental

- câmp magnetic generat: 2- 3T
- neuniformitatea câmpului: 10^{-3}
- volum zona de câmp: $\sim 80 \text{ cm}^3$

1.2.2. Realizarea modelului experimental de electromagnet supraconductor.

Modelul experimental de generator supraconductor de câmp magnetic intens și uniform, este alcătuit din următoarele părți componente (fig. 1.1 și fig.1.2.):

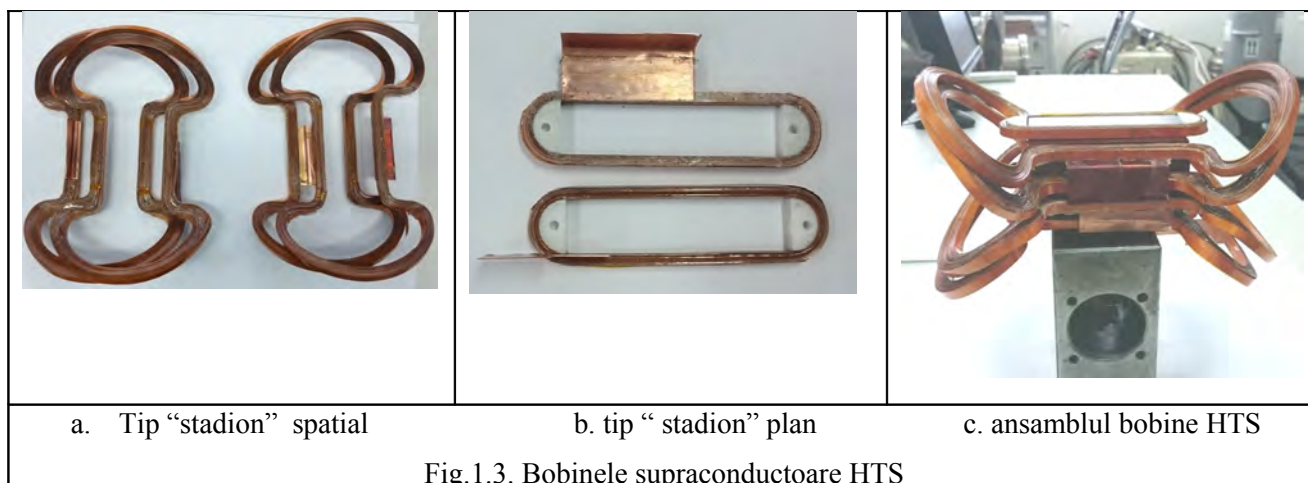


A. Bobinele supraconductoare (1) B. Suportul bobinelor supraconductoare (2) C. Sunt termic (3)
D. Jugul de fier (4) E. Ecran termic (5) F. Criostat (6) G. Crioracitor (7) H. Conductor HTS de curent(8)

Bobinele supraconductoare au fost realizate din banda supraconductoare HTS cu următoarele caracteristici:

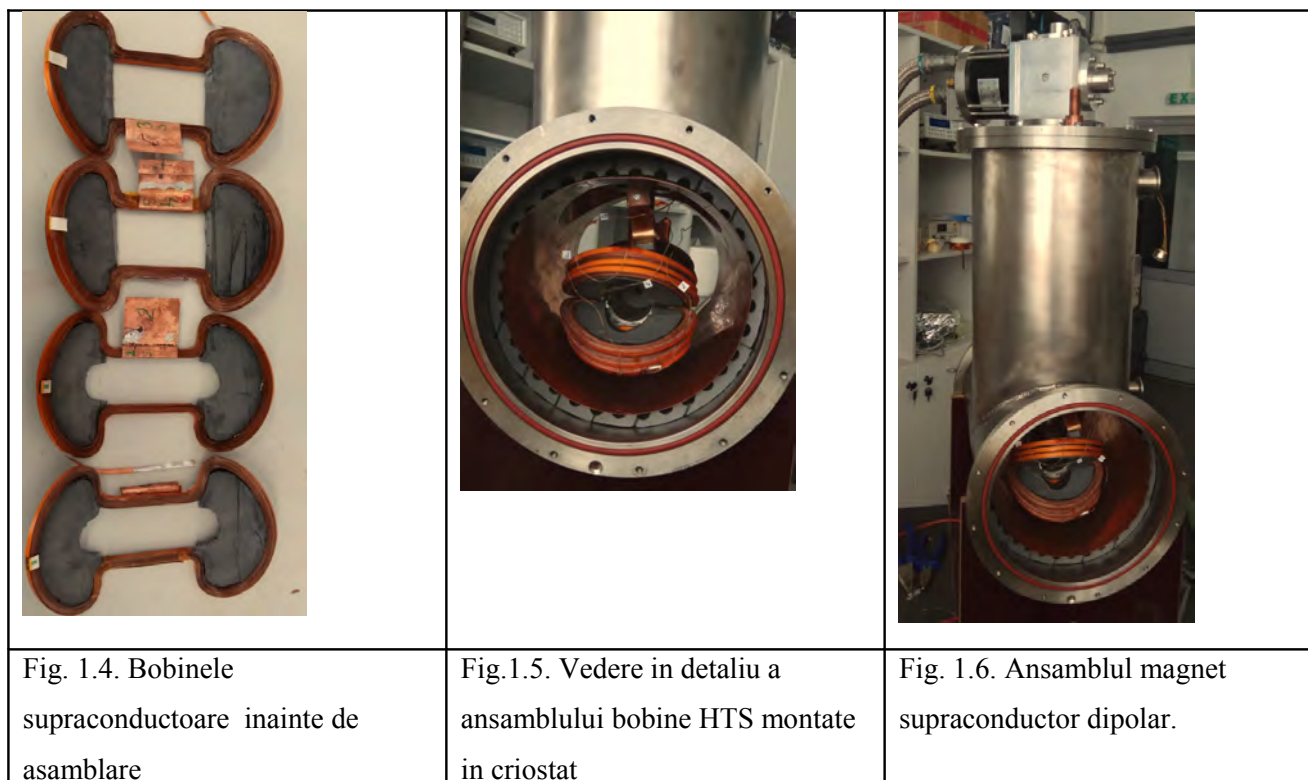
- lățime 6 mm
- grosime 0.10 mm
- izolație kapton # 0.05 mm

Bobinele sunt realizate sub formă de galetă simplă din banda supraconductoare de tip YBCO (Superpower) și impregnate cu rășină epoxidică de temperaturi joase, întărită la temperatura camerei. Rășina este de vâscozitate mică, pentru temperaturi joase (4,2K), produsă de firma Epoxy Technology EPO – TEK 301.



Ansamblul magnet supraconductor

In figurile 1.4. .. 1.6. sunt redade detalii asupra ansamblului bobine supraconductoare asamblate impreuna cu sistemul criogenic de racire in interiorul criostatului.



Ansamblul magnetului supraconductor realizat in cadrul etapei3/2016, a fost supus unor teste si experimentari atat pentru confirmarea sigurarii conditiilor de functionare corecta a electromagnetului – model experimental cat si a parametrilor de functionare ai acestuia (camp magnetic generat si uniformitatea campului magnetic obtinut).

1.3. TESTAREA SI EXPERIMENTAREA GENERALA A ELECTROMAGNETULUI

1.3.1. Testarea la vid a criostatului



Pentru efectuarea vidării ansamblui magnet supraconductor (criostat), s-a utilizat un sistem de vidare cu pompa turbomoleculara EDWARDS, cu capacitate de 50l/min și o presiune finală de 10^{-8} mbar. După cum se poate vedea din figura 1.7, presiunea de lucru din criostat a fost de $\sim 10^{-6}$ mbar. Este valoarea presiunii gazului rezidual din incintă, care asigură izolarea termică necesară bunei funcționări a electromagnetului supraconductor.

1.3.2. Testarea parametrilor funcționali ai criocoolerului (sistem criogenic de răcire)

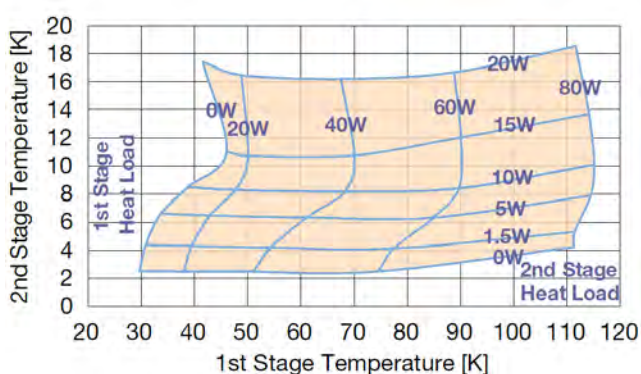


Fig.1.9. Curbele caracteristice de răcire ale criocoolerului

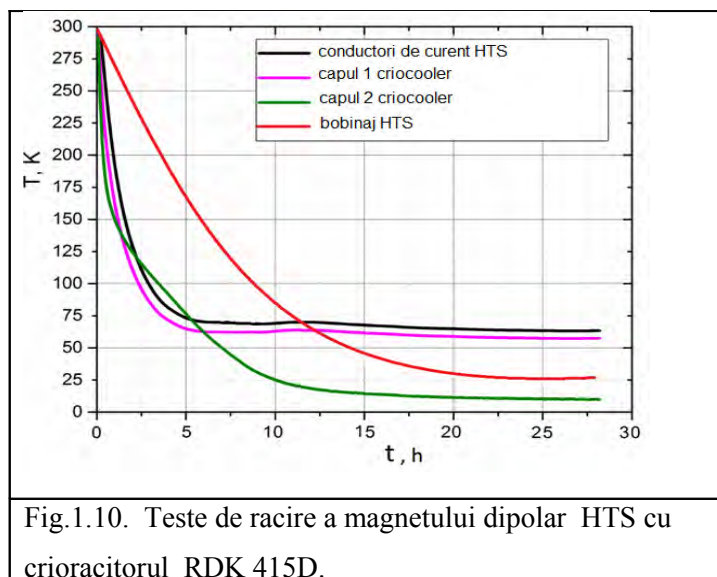


Fig.1.10. Teste de racire a magnetului dipolar HTS cu crioracitorul RDK 415D.

Analizand reprezentarea grafica a inregistrarilor senzoriali montati in diverse locuri importante din ansamblul EMSD (fig.1.10.) observam ca bobinajul supraconductor ajunge in final (dupa cca. 28 ore) la o temperatura de cca. 25K, iar conductorii de curent HTS ajung la o temperatura finala de 65K.

1.3.3. Masurarea parametrilor functionali ai bobinelor supraconductoare

1.3.3.1. Bobinele supraconductoare HTS

Bobinele supraconductoare sunt executate din banda supraconductoare HTS, de tip YBCO, cu latimea de 6 mm si grosime 0,11mm, de la firma SuperPower Inc.[1] prezentate in fig. 1.3.

Caracteristicile benzii supraconductoare sunt prezentate in tabelul 1.1.

Tabelul.1.1. Caracteristicile sârmei 2G HTS de la Super Power

Tip	Banda SC S6050	Comentarii
Lățime (mm)	6	
Grosime (mm)	0.105	
Strat protector de Ag – grosime (μm)	2	
Stabilizator de cupru-grosime (nm)	0.04	Hastelloy nonmagnetic
Efort de întindere maxim (MPa)	> 550	La temperatura camerei
Efort limita de curgere (MPa)	1200	La 70K
Diametrul critic la comprimare – (mm)	11	La temperatura camerei
Densitatea de curent critic maxim @ 77K	10300 A/cm ²	

Iar structura constructiva a benzii supraconductoare HTS este prezentat in figura 1.11.

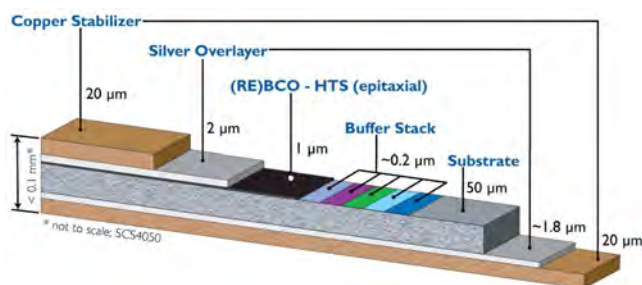


Fig. 1.12. Structura benzii HTS de tip YBCO de la firma SuperPower

Jonctionarea bobinelor HTS (Cupru-YBCO sau YBCO-YBCO) sunt detaliate in lucrarea [3].

1.3.3.2. Masurarea parametrilor electrici ai bobinelor HTS

Au fost executate opt bobine supraconductoare, ai caror numar de spire si parametri electrici sunt prezentati in tabelul 1. Acestia au fost masurati utilizandu-se o punte digitala de tip HIOKI, model IM 3536, prezentata in figura 1.13.

Tabelul 1.2. Parametri bobinelor supraconductoare HTS

Nr. Bobina	Numar spire	Rezistenta [Ω]	Inductanta [H]
1	56	3.095	$1.15 \cdot 10^{-3}$
2	56	3.017	$1.1 \cdot 10^{-3}$
3	73	3.94	$1.8 \cdot 10^{-3}$
4	68	3.41	$1.36 \cdot 10^{-3}$
5	68	3.715	$1.59 \cdot 10^{-3}$
6	73	4.43	$2.28 \cdot 10^{-3}$
7	38	0.9123	$0.207 \cdot 10^{-3}$
8	38	0.94125	$0.22 \cdot 10^{-3}$

De mentionat ca temperature la care s-au efectuat masuratorile a fost de 25 gr.C



Figura 1.13. Punte electronica de masura HIOKI

Caracteristicile principale ale puntii HIOKI:

Domenii de masura: 100 m Ω to 100 M Ω ,

L: $\pm(0.00000 \mu$ to 9.99999 GH)

9.99999 G Ω)

C: $\pm(0.0000$ p to 9.99999 GF)

R: $\pm(0.00$ m to

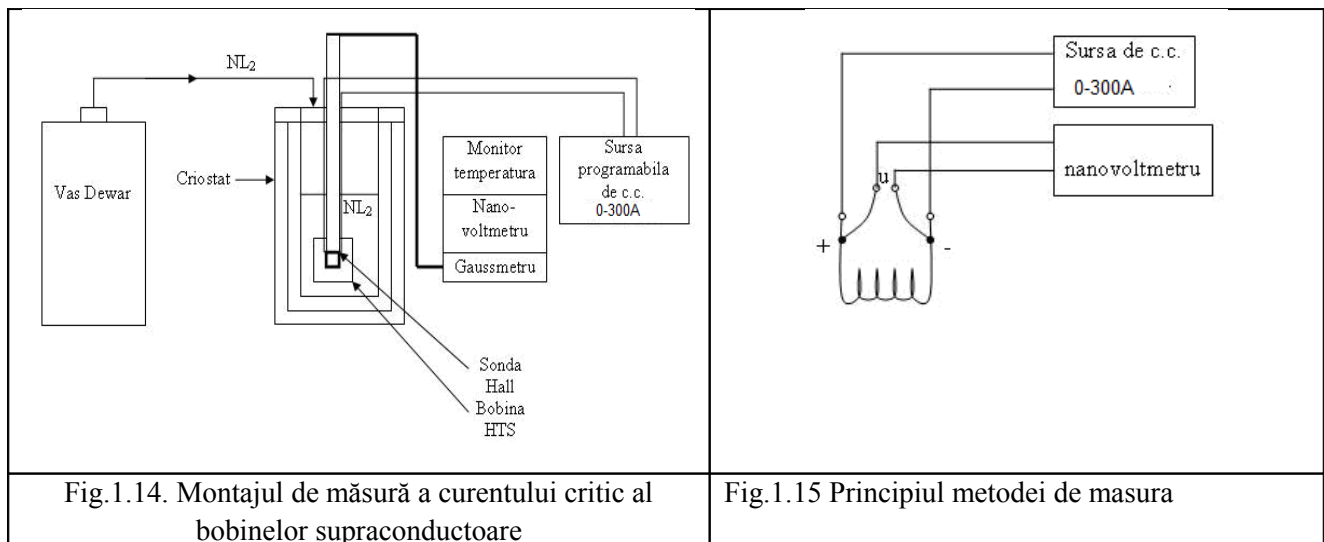
Precizie de masura: Z $\pm 0.05\%$ rdg.

θ : $\pm 0.03^\circ$

Domeniul de frecventa: 4 Hz .. 8 MHz

1.3.3.3. Masurarea curentilor critici ai bobinelor HTS

1.3.3.3.1. Montajul de măsură pentru curentul critic



Montajul de măsură a curentului critic din ICPE-CA, este compus din următoarele (fig.1.14):

- Sursa de curent constant 0-300 A, 5-10 V, c.c.
- Nanovoltmetru de c.c. Keithley
- Criostat pentru azot lichid 30 litri
- Sistemul de fixare al probei
- Monitor de temperatură Lake Shore cu 8 canale

Sursa de cc de 300A: este o sursă programabilă, tip AMI – 300, (American Magnetics) care permite o creștere controlată a curentului de alimentare a probei supraconductoare, cu viteză variabilă: 1A/min – 100A/s. De asemeni permite staționarea pe paliere de curent și descreșterea curentului de la valoarea finală la zero, cu viteze variabile.

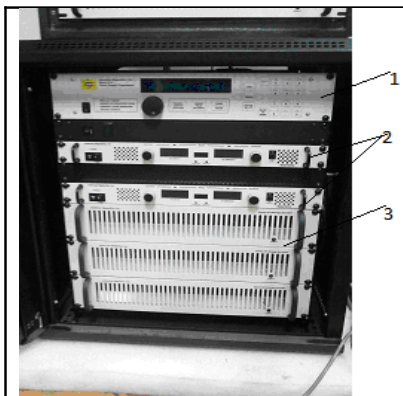


Fig.1.16. Sursa programabilă de 300A, c.c 1. Programatorul sursei 2. sursa propriu-zisă 3. protecția la quench.



Fig.1.17.Nanovoltmetru de c.c. Keithley model 182



Fig.1.18. Monitor de temperature cu 8 canale, Lake Shore.

Sursa este dotată cu protecție la quench, care permite descarcarea rapida a curentului pe un rezistor extern.

Nanovoltmetrul Keitley: este un voltmetru de c.c., de mare rezoluție ($\pm 10\text{nV}$) cu scală de 3V, cu memorarea ultimelor 100 citiri. Acesta permite măsurarea unor tensiuni $\sim \mu\text{V}$ cu precizie de 0,1%.

Criostatul pentru azot lichid: este un vas tip Dewar, din oțel inoxidabil, de 30 l capacitate, în care se introduce sistemul de fixare al probei. Principala lui caracteristică o reprezintă viteza de evaporare a azotului ($\sim 1\text{ l}/12\text{ h}$).

		
Fig1.19. Criostatul de masura	Fig.1.20. Sistemul de fixare al probei: 1. Suport probă 2. Proba supraconductoare 3. Terminal electric 4. Suporti inox 5. Cablu alimentare curent 6. Ecran termic 7. flanșă superioară	Fig. 1.21. Sistemul de fixare al probei si criostat-detaliiu.

Sistemul de fixare al probei: sistemul de fixare al probei este partea din montajul de măsură a curentului critic, care are mai multe funcții:

- permite introducerea probei în azot lichid și menținerea acesteia la temperatură fixă
- permite fixarea probei supraconductoare în terminale adecvate
- permite alimentarea probei supraconductoare cu curenți electrici din domeniul 0-300A
- permite măsurarea temperaturii în locația probei

În fig. 1.20. este detaliat sistemul de fixare al probei.

Monitorul de temperatură Lake Shore: permite măsurarea temperaturii în domeniul temperaturilor criogenice (4.2 – 300 K). Are posibilitatea să lucreze cu 8 canale (senzori) simultan. Senzorii sunt de tip diodă criogenică, cu o precizie de măsură de $\pm 0,005\text{ K}$. Senzorul de temperatură se montează chiar lângă proba supraconductoare, pentru a avea o monitorizare a temperaturii probei.

1.3.3.3.2. Rezultate masuratori

Măsurarea curentului critic s-a realizat prin metoda de măsură în 4 puncte. Conexiunile de tensiune s-au realizat direct pe proba supraconductoare (vezi fig. 1.15. si 1.22).

S-a determinat experimental curentul critic al benzii supraconductoare HTS la temperatura de 77 K, rezultand graficul prezentat in Figura 1.23.

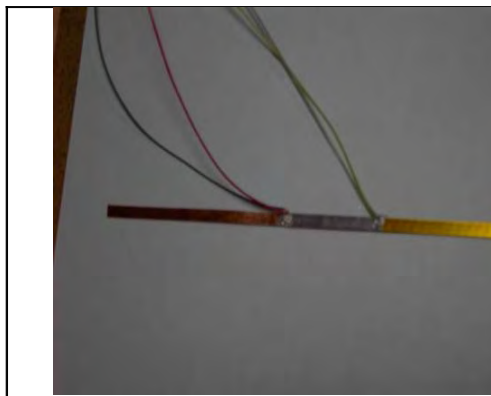


Fig. 1.22. Conexiuni de tensiune pe proba supraconductoare HTS

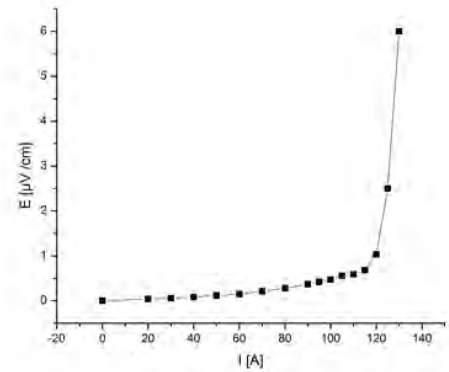


Figura 1.23. Curentul critic pentru banda supraconductoare HTS, de tip YBCO, cu latime de 6 mm

In tabelul 1.3 sunt sintetizate rezultatele masuratorilor de curent critic pentru fiecare bobina componenta a magnetului supraconductor.

Tabelul 1.3. Curentul critic al bobinelor supraconductoare HTS

Nr. Bobina	$I_c[A]@77K$
1	110
2	72
3	70
4	75
5	115
6	75
7	84
8	75

In graficele din fig.1.24 si fig.1.25. sunt prezentate curbele de variatie a curentului critic al benzii HTS in prezenta campului magnetic, pe directie paralela cu suprafata benzii si respectiv perpendiculara pe suprafata benzii supraconductoare[1].

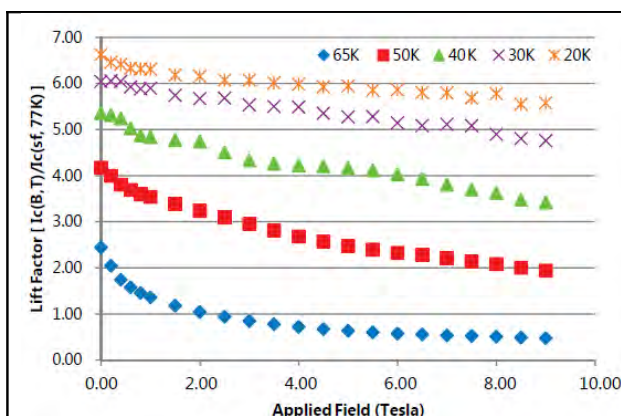


Fig. 1.24. Variatia I_c functie de temperatura si in prezenta campului magnetic ($B//$ suprafata benzii)

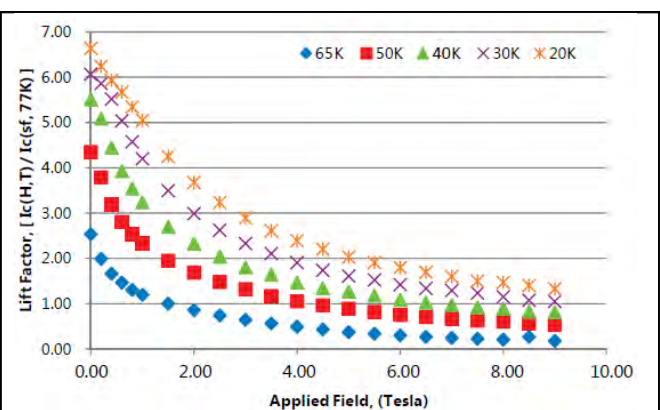


Fig.1.25. Variatia I_c functie de temperatura si in prezenta campului magnetic ($B \perp$ suprafata benzii)

In prezenta campului magnetic si la o temperatura de referinta de 20K, vom avea atunci pentru bobinele supraconductoare ale bobinajului magnetului dipolar supraconductor urmatoarele valori

ale curentului critic multiplicat corespunzator cu asa numitul „factor de amplificare - f_a ”, considerat atat pentru $B//S$ cat si pentru $B \perp S$, la un camp de 2,5T (tabelul 1.4.).

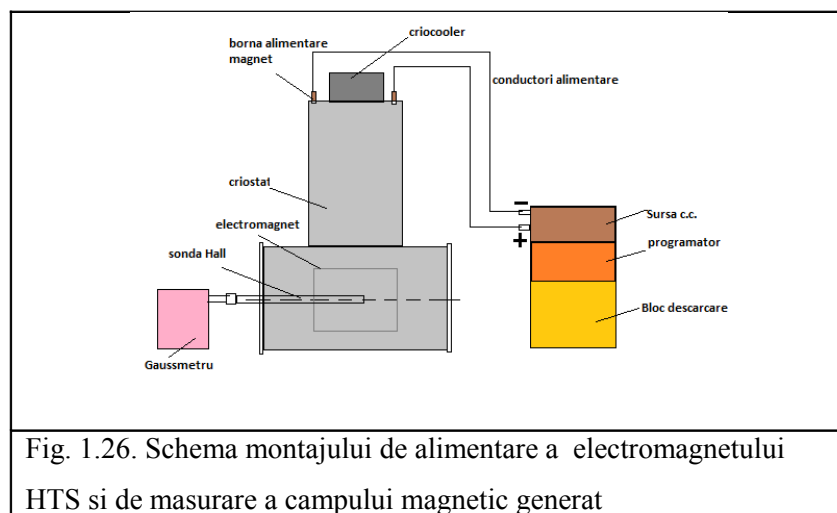
Tabel 1.4. Curentii critici ai bobinelor HTS in prezenta campului magnetic.

Nr. Bobina	$I_c[A]@77K$	$B//S$ ($f_a=6$)	$B \perp S$ ($f_a=3$)
		$I_c * f_a$	$I_c * f_a$
1	110	660	330
2	72	432	216
3	70	420	210
4	75	450	225
5	115	690	345
6	75	450	225
7	84	504	251
8	75	450	225

1.3.4. Masurarea inductiei campului magnetic generat de EMSD

1.3.4.1. Montajul utilizat pentru generarea campului magnetic

Conectarea sursei de curent continuu programabile (fig.1.26.) care poate genera max. 300A la bornele exterioare ale electromagnetului (EMSD), permite alimentarea acestuia si generarea de camp magnetic dipolar. Controlul valorilor inductiei campului magnetic (B) va fi efectuat prin controlul valorilor curentului de alimentare generat de sursa. De stabilitatea curentului electric generat de sursa va depinde in mod direct, stabilitatea campului magnetic generat.



1.3.4.2. Montajul utilizat pentru masurarea campului magnetic

Masurarea Campului magnetic s-a realizat cu echipamente produse de compania LakeShore, specializata in sisteme destinate lucrului la temperature criogenice. Astfel, sistemul de masura are in componenta in principiu, o sonda Hall transversala de masura a campului magnetic pentru mediu cryogenic incarcasata intr-un tub de otel inox si un Gaussmeter model 475.

Acestea sunt prezentate in figurile 1.27 si 1.28. de mai jos:

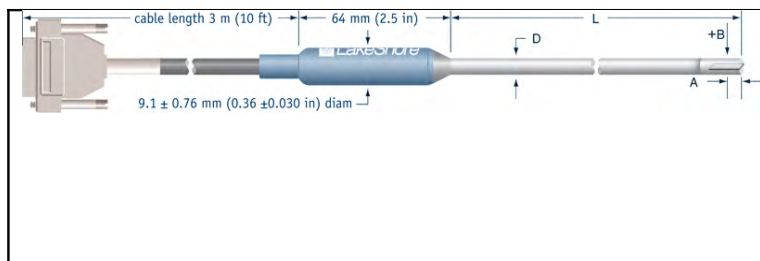


Fig.1.27. Sonda Hall criogenica model HMCT-3160-WN



Fig. 1.28. Gaussmetrul Lake Shore model 475.

Sonda Hall de la Lake Shore, model HMCT-3160-WN prezentata in fig.1.27. are urmatoarele caracteristici:

- Aria activa: 1x3 mm
- calibrare: -0.70% (4 K)
- domeniu de lucru: 35G to 350KG
- Precizia de masura (% rdg at 25 °C): ±2% to 100 kG

Iar Gaussmetrul (fig. 1.24.) are caracteristicile de mai jos:

- Domeniu de masura: 35 mG to 350 kG
- Precizie de masura: ±0.05%

In figurile 1.29 si 1.30 sunt prezentate ansamblul experimental de masura a campului magnetic si o vedere de detaliu asupra aparatelor de masura utilizate.



Fig.1.29. Ansamblul EMSD si sistem de masura a campului magnetic.

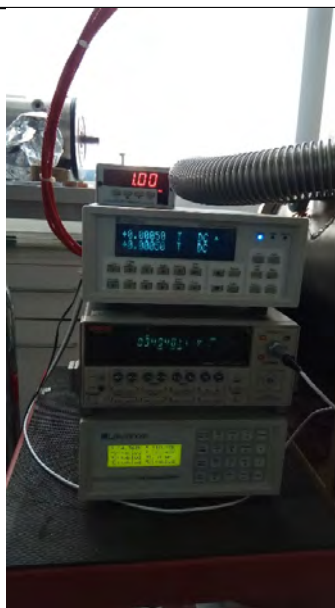


Fig. 1.30. Detaliu ansamblu aparatura de masura pentru EMSD.

1.3.4.3. Rezultate experimentale

Campul magnetic generat de electromagnet a fost masurat pe directia axei geometrice a electromagnetului cu un pas de 5mm. Rezultatele sunt prezentate in tabelul 1.5. si reprezentate graphic in fig. 1.31 si fig.1.32.

Tabel.1.5. Rezultatele masuratorilor de camp magnetic(B) produs de EMSD

d [mm]	B [T]	$\Delta B/B$ [%]
-----------	-------	---------------------

0	1.95001	15.3274
5	2.25002	2.3013
10	2.30069	0.1000
15	2.30075	0.0976
20	2.30090	0.0912
25	2.30130	0.0738
30	2.30180	0.0521
35	2.30233	0.0303
40	2.30261	0.0173
45	2.30292	0.0100
50	2.30310	0.0001
55	2.30320	0.0002
60	2.30320	0.0002
65	2.30290	0.0043
70	2.30250	0.0217
75	2.30210	0.0391
80	2.30150	0.0651
85	2.30077	0.0968
90	2.30069	0.1000
95	2.24001	2.7355
100	2.00010	15.1512

Din analiza datelor inregistrate, rezulta obtinerea unui camp magnetic dipolar cu o inductie maxima de 2.303T. Campul s-a dovedit a fi “constant” incepand cu punctul situat la 10mm de la marginea din stanga a magnetului si pana in punctual situat de asemeni la cca 10mm de marginea din dreapta a magnetului.

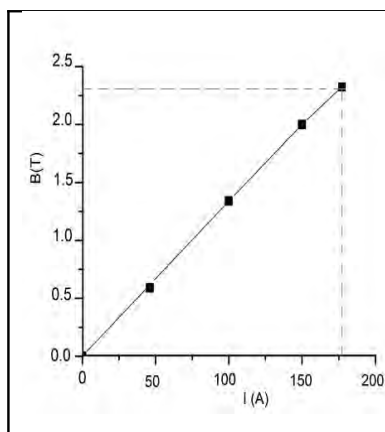


Fig.1.31. Caracteristica magnetului EMSD.

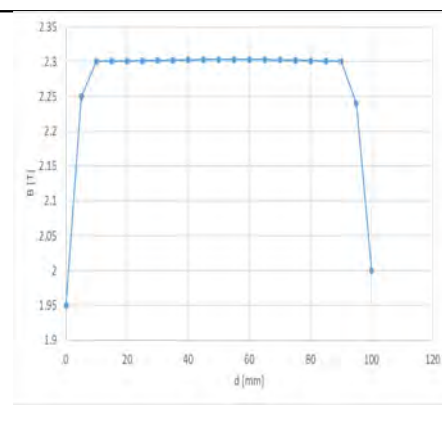


Fig.1.32. Campul magnetic generat de EMSD pe axul geometric al magnetului.

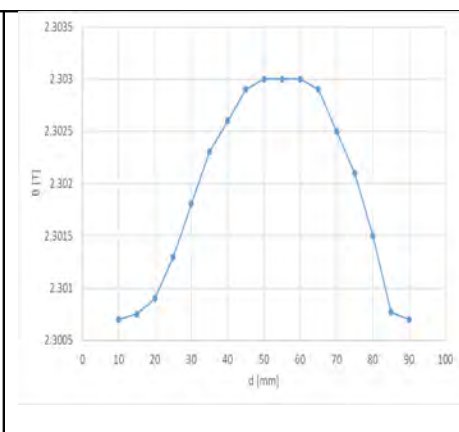


Fig. 1.33. Uniformitatea campului magnetic masurat pe axul geometric al EMSD.

In fig.1.31. este reprezentata neuniformitatea campului magnetic masurat de-a lungul axei geometrice a magnetului din care rezulta o neuniformitate maxima a campului magnetic de $\sim 0,1\%$ considerand zona de camp magnetic masurat intre 10-90 mm.

1.4. CONCLUZII

In cadrul programului de teste si experimentari generale a electromagnetului EMSD din cadrul etapei 4/2017 la prezentul contract, au fost realizate urmatoarele experimente cu rezultatele prezentate:

- Testarea la vid a electromagnetului. S-a obtinut in timpul functionarii o presiune reziduala la vidare, de $\sim 10^{-6}$ mbar.
- Masurarea parametrilor functionali ai crioracitorului (sistemului criogenic de racire). Ca urmare a functionarii crioracitorului timp de cca. 28 ore, temperatura bobinajului supraconductor a ajuns la valoarea de $\sim 25\text{K}$ iar a conductorilor HTS de alimentatie, la ca. 65K .
- Masurarea parametrilor functionali ai bobinelor supraconductoare (rezistenta electrica si inductanta electrica) la temperature camerei.
- Masurarea curentului critic al benzii supraconductoare utilizate, la temperature de 77K , obtinandu-se o valoare de 120A .
- Masurarea curentului critic al bobinelor supraconductoare, gasindu-se valori in domeniul: $70\text{-}110\text{A}$.
- Masurarea inductiei campului magnetic generat de electromagnetul EMSD pe axa geometrica a acestuia, gasindu-se o valoare maxima de $2,303\text{T}$ pentru un current de alimentare de 175A .
- Determinarea neuniformitatii campului magnetic generat de EMSD pe axa geometrica a acestia, obtinandu-se o neuniformitate maxima de $\sim 0,1\%$.
- Diseminarea rezultatelor cercetarilor prin participarea la doua Conferinte Internationale IEEE.

Bibliografie

- [1] SuperPower, <http://www.superpower-inc.com>
- [2] Sumitomo Heavy Industries Ltd., <http://www.shicryogenics.com/>
- [3] "Copper-YBCO tape low resistivity junctions", D. Enache, I.Dobrin, A. Chernikov, s.a. *The XX International Scientific Conference of Young Scientists (AYSS-2016)*, <https://indico-new.jinr.ru/conferenceDisplay.py?confId=73>

Realizare sistem mecanic de fixare a jugului de fier si a bobinelor supraconductoare

(P3) – Activitate 4.1.

Sistemul de fixare al jugului de fier al electromagnetului este un sistem de sustinere mecanica a miezului de fier (jugul electromagnetului) si din acest motiv acest suport mecanic trebuie sa aibe o conductivitate termica cat mai redusa.

In figura 1.34. este prezentat acest sistem de sustinere mecanica asamblat. Acesta este practice alcatuit din 6 componente: partea superioara a suportului, partea inferioara a suportului si cei patru suporti care face legatura dintre cele doua parti principale. Materialul din care sunt realizate este cunoscut ca G10. G10 este un material realizat din fibre de sticla si rasina epoxidica de temperatura joasa. Conductivitatea termica a acestui material G10 este extreme de redusa: cca 0,02 W/m.K la temperature joase.

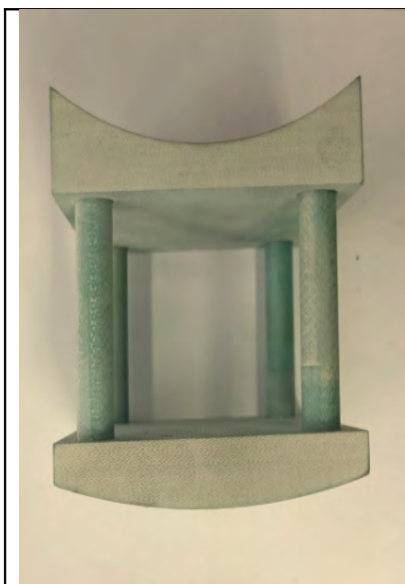


Fig.1.34. Sistemul de fixare al jugului de fier.

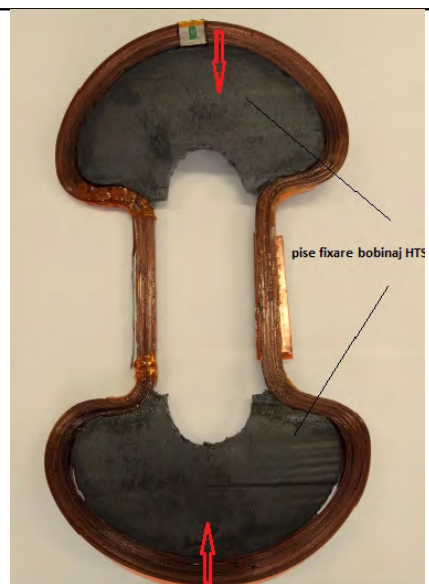


Fig. 1.35. Sistemul de fixare a bobinelor HTS

In cadrul etapei 4/2017, a fost realizate si sistemele de fixare / rigidizare a bobinelor supraconductoare. Aceste elemente de fixare au rolul de a rigidiza bobinajul supraconductor pentru a contracara fortele Laplace care actioneaza asupra bobinajului supraconductor in sens coercitiv (spre interiorul bobinajului – indicat de sagetile rosii, fig. 1.35.). Aceste elemente de fixare/rigidizare a bobinajelor HTS au fost realizate din polistiren expandat de densitate ridicata. Aceasta alegere a avut in vedere atat rigidizarea dar si o contributie cat mai mica la masa de ansamblu a bobinajului supraconductor.

CAPITOLUL 2.

2.1. Experimentarea sistemului de mapare a câmpului magnetic pe modelul experimental EMSD. Testarea sistemului de măsurare și mapare a câmpului magnetic.

2.1.1. Execuția și descrierea caracteristicilor sistemului de măsură și mapare a câmpului magnetic

Sistemul de măsurare a câmpului magnetic realizat în cadrul IFIN-HH este compus dintr-un sistem de poziționare mecanică 3D a unei sonde Hall, un sistem de măsurare a câmpului magnetic și o aplicație software care gestionează resursele și salvează datele în diferite formate digitale.

Sistemul de poziționare mecanică precisă este prezentat în figura 2.1 de mai jos.



Figura 2.1. Sistemul de poziționare mecanică - XYZ

Parametrii caracteristici care asigură precizia mișcării au fost obținuți prin folosirea unor motoare electrice prevăzute cu dispozitive de tip „encoder” care furnizează semnalele de feedback pentru verificarea deplasării mecanice reale cu ajutorul controllerului. Parametrii mecanici specifici sistemului de mișcare obținuți și folosiți în teste sunt următorii: o sarcină mecanică maximă de 2Kg pe verticală și 10Kg în plan orizontal, o rezoluție în modul "full step" a suprafeței de translație de 1 micron pe orizontală și 0,5 micrometri pe verticală la o viteză maximă a mișcării mecanice de translație de 50mm pe secundă pe oricare axă. Frânarea electromagnetica a fost implementată pe axa Z (verticală), astfel încât se menține poziția verticală pentru perioade nedefinite de timp chiar și în absența alimentării electrice. Suportul sondei de măsurare este realizat din aluminiu și a fost prevăzut cu o fantă pentru orientarea flexibilă a capsulei ceramice perpendicular pe câmpul magnetic analizat. Diametrul exterior al suportului sondei este de ~11 mm iar diametrul interior este de ~9 mm.

Pentru optimizarea procesului de achiziție, a fost introdusă o valoare temporală de o secundă de întârziere între efectuarea a două mișcări consecutive. Acest interval este considerat suficient

pentru procesul de achiziție de date si a fost stabilit in urma proceselor de testare realizate de IFIN-HH.

Aplicația software de gestionare a resurselor a fost scrisa in LabView si e prezentata in figura 2.2.

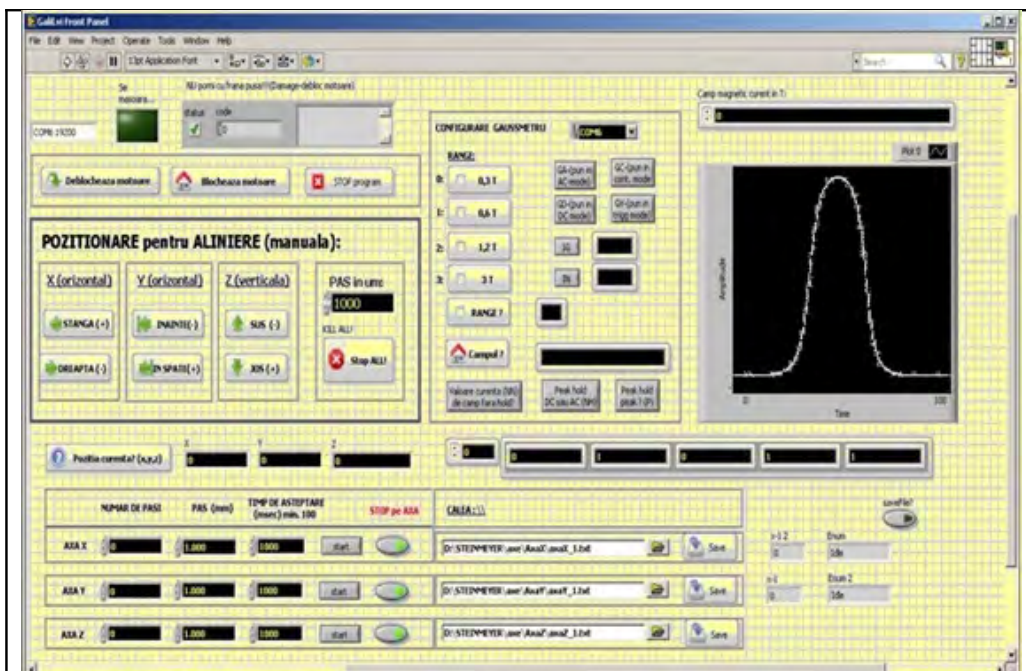


Figura 2.2. „Printscreen” cu aplicația software folosită pentru maparea 3D a câmpului magnetic

Aplicația software dezvoltată de IFIN-HH, gestionează resursele prin intermediul unor protocoale de comunicare. Comunicarea de tip client/server se realizează pe două cai distincte, astfel: între PC și Gaussmetru pe o linie de tip serial iar între PC și controller, printr-o rețea de tip Ethernet.

Aplicația este compusă din mai multe module care implementează: poziționarea sondei pentru aliniere sau executarea unui profil de baleiaj de tip XYZ, gestionarea resurselor Gaussmetrului (alegerea scalei, investigarea câmpului magnetic pe poziția spațială curentă a sondei, alegerea portului de comunicare, afișarea modului / tipului de măsurare, afișarea temperaturii exterioare), afișarea grafică a profilului de variație a câmpului magnetic, salvarea datelor în format *.txt în fișierul ales de utilizator, poziționarea absolută a sondei (deplasarea sondei față de un reper absolut al instrumentului) sau poziționarea relativă (mișcarea sondei prin deplasarea cu un număr de pași față de poziția curentă), realizarea unui profil de baleiaj de tip 1-D pe oricare axă, oprirea de urgență a baleiajului cu pierderea memorării poziției spațiale curente (notată prin „kill all” pe G.U.I. – figura 2.2) sau cu memorarea stării curente și continuarea mișcării atunci când utilizatorul decide ca acest lucru devine posibil și necesar.

Dimensiunile tipice ale sondelor cu efect Hall folosite în procesele de măsurare sunt prezentate în figura 2.3 de mai jos:

Sonda Hall folosită în majoritatea proceselor de mapare este prevăzută cu un circuit electronic de calibrare dedicat, specific fiecărei sonde în parte. Acest detaliu de implementare consolidează caracteristicile funcționale ale sondelor Hall folosite de IFIN în procesul de mapare.

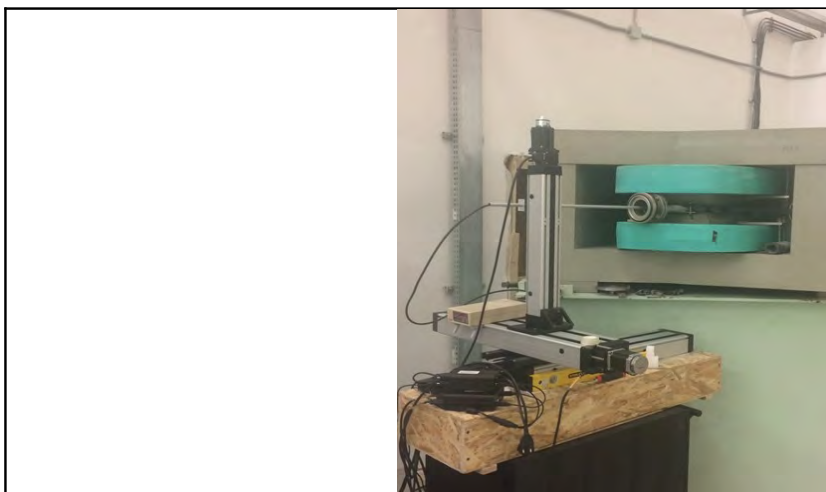


Figura 2.4. Testarea unei sonde cu efect Hall pe un magnet analizor la 90 de grade

Calibrarea s-a realizat cu o sonda RMN în centru camerei pentru vedere. Indicațiile prezentate de cele două sisteme de măsurare a câmpului magnetic *au fost identice până la a patra zecimală*. Sonda a fost montată pe un sistem de poziționare 3D cu o rezoluție de ~ 2 microni.

Cel mai precis echipament de măsurare a câmpului magnetic este sonda de tip RMN. Dar, aceasta nu este miniaturizată și ocupă un volum relativ extins (sonda are dimensiuni de ordinul zecilor de centimetri iar aria activă este de ordinul centimetrilor). Astfel, testarea achiziției cu sonda Hall pe un magnet analizor la 90 de grade, convențional, a fost realizată prin montarea sondei pe un sistem de mișcare XYZ. Ulterior, magnetul a fost alimentat cu o sursă de mare precizie (6 zecimale) de la Danfysik (modelul MPS 8500). Magnetul prezentat în figura 2.4 este prevăzut cu o sonda RMN plasată în centrul incintei camerei metalice vădate și la mijlocul traiectoriei optice a ionilor. A fost crescut curentul de alimentare al dispozitivului de optica ionică până când s-a atins un câmp de ~ 1 T. Indicațiile de citire a câmpului magnetic (observate pe controllerul sondei RMN și pe aplicația LabView de citire a sondei cu efect Hall prin PC) au fost identice până la a patra zecimală. În plus, folosind sistemul de mișcare XYZ, s-a observat gradul de uniformitate a câmpului generat de magnet în diferite puncte din centru și din aperturile de intrare sau de ieșire. Nu a fost posibilă conectarea magnetului la circuitul de răcire cu apă motiv pentru care nu am crescut curentul furnizat de MPS 8500 la valori mai ridicate. Pe tot domeniul analizat, valorile indicate de sonda RMN și de sonda Hall au fost identice până la a patra zecimală.

S-a realizat și testarea sondei Hall pe un magnet calibrat de la o parabolă Thompson (spectrometru ionic) pentru care IFIN-HH deține buletine de analiză și de calibrare. Rezultatele au confirmat datele certificate de producător.



Figura 2.5. Procesul de achiziție cu sonda Hall a datelor de câmp magnetic generate de un magnet calibrat dintr-un spectrometru ionic (parabola Thomson).

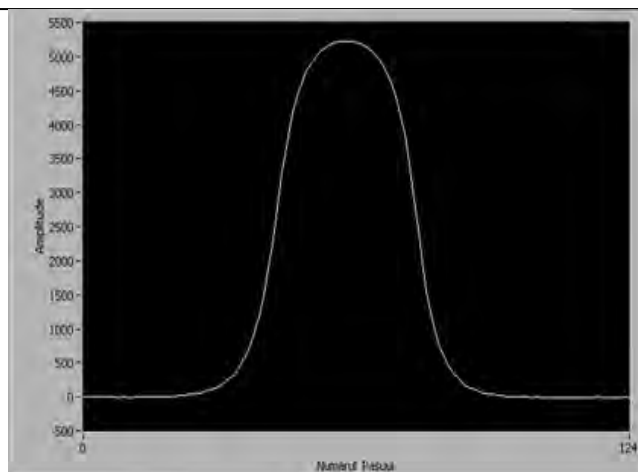


Figura 2.6. Reprezentare grafica 1D a datelor de mapare a câmpului magnetic pentru un magnet calibrat cu buletine de analiza de la fabricant, inclus intr-un spectrometru ionic.

A fost verificata si capabilitatea sistemului de a achizitiona informatiile de camp magnetic printr-o apertura redusa tipica, asa cum este prezentata in figura 2.7. Acest tip de apertura este specific zonelor de ghidare a ionilor prin aplicarea campului magnetic asupra unei incinte (camera) vidata.



Figura 2.7. Apertura cu dimensiuni reduse din structura de ghidaj al ionilor in acceleratoarele de particule.



Figura 2.8. Profil liniar prin sectiunea de intrare in camera magnetului.

Apertura apare la cuplajul dintre camera magnetului si ghidul structurii de accelerare. Dimensiunile aperturii sunt reduse ($\sim$ cm), standardizate la o instalatie nucleara dar pot varia de la un site la altul. In fig. 2.7. se observa pozitionarea sondei in interiorul magnetului prin folosirea acestei deschizaturi.

Campul magnetic inregistrat la apertura este prezentat in figura 2.8, in profil liniar, unde sunt incluse doar primele 3 zecimale din variatia de ~ 1 T a campului magnetic, rezultand un profil grafic aproape liniar pe distanta de ~ 3 cm. Notez ca spre deosebire de sondele RMN, minisondele cu efect Hall permit si analiza campurilor cu un grad mare de neuniformitate.

O secvență de achiziționare este prezentată în figura 2.9. Gaussmetrul oferă informațiile computerului atunci când este interogată pe baza unui protocol de comunicare prestabilit. Protocolul serial permite configurarea aparatului de analiză, prin stabilirea gamei de măsurare și a modului de lucru. Există posibilitatea a citi temperatura mediului în care este plasată sonda prin intermediul protocolului de comunicare, o facilitate extrem de utilă, care a fost folosită în experimentele cu EMSD.



Figura 2.9. Moment din procesul de achiziție de date prin Gaussmetrul digital.

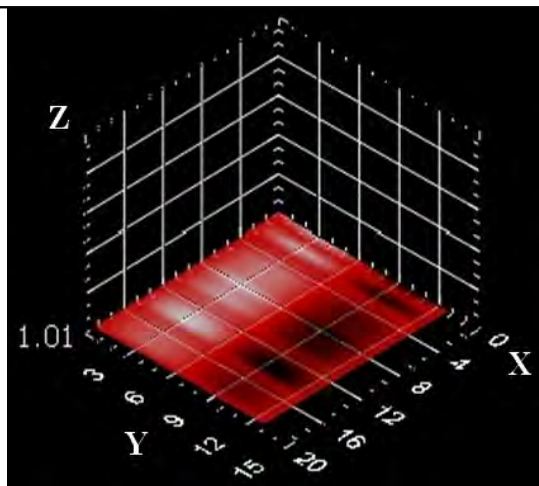


Figura 2.10. Mapare de suprafață și reprezentare 3D a valorilor achiziționate.

În fig. 2.10, este redată o reprezentare 3D a câmpului magnetic măsurat. Este de observat o variație redusă în jurul valorii de 1,013T. Se poate considera că aceste variații provin de la neliniaritatea sursei de alimentare și/sau de la suprapunerea câmpului magnetic al Pământului în zona analizată.

2.2. Diseminare rezultate.

Experiența acumulată prin realizarea proiectului a fost folosită în lucrări care au condus la participarea la trei conferințe:

1. *Investigating C-13+C-12 Reaction by the Activation Method. Sensitivity Tests*
D. Chesneanu, L. Trache, R. Margineanu, A. Pantelica, D. Ghita, M. Straticiuc, I. Burducea, A.M. Blebea-Apostu, C.M. Gomoiu, X. Tang EXOTIC NUCLEI AND NUCLEAR/PARTICLE ASTROPHYSICS (V). FROM NUCLEI TO STARS Book Series: AIP Conference Proceedings Volume: 1645 Pages: 311-316 DOI: 10.1063/1.4909592

2. *Properties of low-lying intruder states in Al-34 and Si-34 populated in the beta-decay of Mg-34*
R. Lica, F. Rotaru, F. Negoita, S. Grevy, N. Margineanu, P. Desagne, T. Stora, C. Borcea, R. Borcea, S. Calinescu, J.M. Daugas, D. Filipescu, I. Kuti, L.M. Fraile, S. Franchoo, I. Gheorghe, D.G. Ghita, R. Margineanu, C. Mihai, P. Mourface, P. Morel, J. Mrazek, A. Negret, D. Pietreanu, T. Sava, D. Sohler, M. Stanoiu, I. Stefan, R. Suvaila, S. Toma, C.A. Ur EXOTIC NUCLEI AND NUCLEAR/PARTICLE ASTROPHYSICS (V). FROM NUCLEI TO

3. *Conceptual model of a Hall sensor based system for magnetic field mapping*, I. Dobrin, TB Sava, B. Savu, D Enache, M Popa, 10th Sielmen 2015 International Conference and Exhibition on Electromechanical and PowerSystems, Romania, Craiova

Au fost publicate doua articole:

1. RADIOISOTOPE PRODUCTION FOR MEDICAL APPLICATIONS AT ELI-NP
Author(s): Bobeica, M (Bobeica, M.); Niculae, D (Niculae, D.); Balabanski, D (Balabanski, D.); Filipescu, D (Filipescu, D.); Gheorghe, I (Gheorghe, I.); **Ghita, DG** (Ghita, D. G.); Luo, W (Luo, W.) **Romanian Reports in Physics** Volume: 68 Pages: S847-S883 Supplement: 2 Published: 2016
2. PHOTOFISSION EXPERIMENTS AT ELI-NP Author(s): Balabanski, DL (Balabanski, D. L.); Ibrahim, F (Ibrahim, F.); Krasznahorkay, A (Krasznahorkay, A.); Boztosun, I (Boztosun, I.); Choudhury, D (Choudhury, D.); Coban, S (Coban, S.); Constantin, P (Constantin, P.); Csige, L (Csige, L.); Cuong, PV (Cuong, P. V.); Dickel, T (Dickel, T.); Djapo, H (Djapo, H.); **Dobrin, I** (Dobrin, I.); Essabaa, S (Essabaa, S.); Filipescu, D (Filipescu, D.); Franchoo, S (Franchoo, S.); Georgiev, G (Georgiev, G.); Gheorghe, I (Gheorghe, I.); **Ghita, D** (Ghita, D.); Glodariu, T (Glodariu, T.); Gupta, M (Gupta, M.); Jokinen, A (Jokinen, A.); Kaur, J (Kaur, J.); Marginean, N (Marginean, N.); Marginean, R (Marginean, R.); Moore, I (Moore, I.); Pentilla, H (Pentilla, H.); Petcu, C (Petcu, C.); Plass, W (Plass, W.); **Sava, T** (Sava, T.); Savard, G (Savard, G.); Scheidenberger, C (Scheidenberger, C.); Yordanov, D (Yordanov, D.), **Romanian Reports in Physics** Volume: 68 Pages: S621-S698 Supplement: 2 Published: 2016.

Rezultatele si modalitățile de obținere a acestora au fost diseminate si prin cursuri si demonstrații practice oferite studenților care participa la astfel de activitati organizate in cadrul IFIN-HH.

2.3. Concluzii

In cadrul etapei 4/2017 la prezentul proiect, P1 a efectuat urmatoarele lucrari cu sistemul de masurare si mapare a campului magnetic realizat in cadrul etapei precedente:

- Experimentarea si calibrarea sistemului de masura si mapare a campului magnetic prin masurarea campului magnetic ($B \sim 1T$) generat de un electromagnet cu deviatie de 90 grade, prin comparatie cu un sistem dotat cu sonda RMN. Rezulattele au coincis la 4 zecimale.
- S-a testat sistemul si pe un magnet dipolar (spectrometru ionic), care genereaza un camp de 1T (parabola Thomson), care genereaza un camp calibrat (cu certificate de calibrare de la fabricant)
- Sau realizat masuratori de camp magnetic cu sistemul de masura si mapare cu achizitia datelor masurate, intr-un magnet generator de un camp de 1T. Datele au fost reprezentate 3D, punandu-se in evidenta neuniformitatile depistate.
- S-au diseminat cunostintele dobandite in cadrul temei prin participare la 3 conferinte nationale si internationale) cu lucrari stiintifice si s-a concretizat si in doua lucrari stiintifice publicate in reviste cotate ISI.

CAPITOLUL 3. Experimentarea sistemului de masura a tensiunilor mecanice.

3.1. Analiza stabilitatii structurale a magnetului dipolar supraconductor HTS pentru campuri magnetice intense supus actiunilor pondero-motoare electromagnetice Laplace

3.1.1. Introducere

În cadrul acestui raport se prezinta proiectarea si principalele etape in fabricarea unui electromagnet dipolar supraconductor, destinat generarii unui camp magnetic intens (~ 2.5 T) si uniform (10^{-3}) in regiunea centrala a electromagnetului denumita „zona de camp bun” (GFZ) [1].

GFZ-ul asigura conditiile necesare obtinerii unui camp magnetic util pentru accelerarea unui flux de particule incarcate electric, care odata ce parcurg aceasta regiune, isi modifica traiectoria initiala. Un asemenea electromagnet supraconductor la temperaturi ridicate (HTS) permite obtinerea unor campuri magnetice intense la temperaturi de valori mari. Acesta este util in acceleratoare de particule de mare energie, cu rol crucial in progresul fizicii moderne (spre exemplu, fizica particulelor elementare, studii experimentale de structuri nucleare, materie condensata la temperaturi si densitati deosebit de inalte etc.) si in diverse aplicatii medicale / industriale (de exemplu, terapie cu protoni, implant ionic, fabricare de radioizotopi etc.).

Racirea electromagnetului supraconductor se realizeaza cu ajutorul unui criocooler Gifford-McMahon, care nu necesita folosirea de lichide criogenice (Heliu) [2]. Infasurarile sunt realizate folosind cea mai recenta generatie (cea de a II-a) de HTS, si anume din material supraconductor cu invelis de YBCO.

In raport sunt descrise cateva componente cheie care intra in componenta prototipului proiectat si realizat. Dimensionarea acestora este detaliata in [3, 4]. Rezultatele obtinute prin modelare matematica si simulare numerica vizeaza fortele electrodinamice care se exercita in cadrul infasurarilor. Proiectarea electromagnetului HTS s-a facut astfel incat sa fie asigurata operarea in conditii sigure a acestuia (s-a prevenit ruperea infasurarilor cauzata de fortele electrodinamice mari).

3.1.2. Proiectarea si realizarea electromagnetului

Bobinele HTS sunt realizate in forma de sa, cu exceptia a doua dintre acestea, care au forma unui circuit de curse. Un numar total de 10 bobine sunt interconectate pentru a genera un camp magnetic uniform cu inductia de 2.5 T (Figurile 3.5, 3.6). Principalele caracteristici ale bobinelor HTS sunt mentionate in Tabelul 3.1.

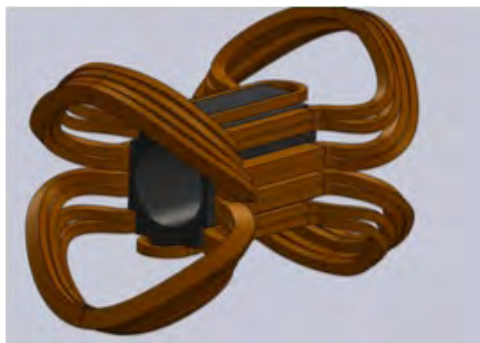


Figura 3.5. Modelul CAD al bobinelor HTS.

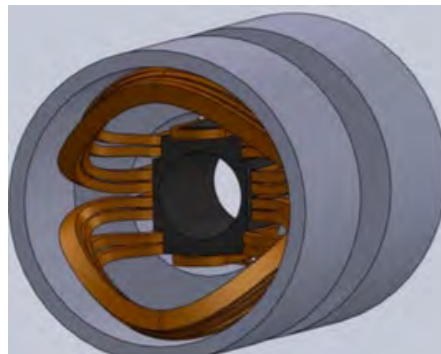


Figura 3.6. Modelul CAD al ecranului magnetic

Tabelul 3.1. Caracteristicile bobinelor HTS.

Indicele bobinei	Grosimea bobinei	Numarul de infasurari
1	13.5	75
2	12.5	69
3	11	61
4	9.5	53
5	7.5	42

Din cauza existentei unui cuplaj prin conductie termica cu cel de-al doilea nivel de racire al criocoolerului, temperatura de functionare a bobinelor este de 19 K. Forma de sa a bobinelor este necesara pentru a face loc canalului prin centrul DMS-ului. Unghiurile mari de curbura de la capetele bobinelor sunt impuse de raza minima admisa de banda YBCO (11 mm) [6]. Scutul metalic (5) are rolul de a proteja criocoolerul si mediul extern de campuri magnetice perturbatoare prin atenuarea efectului campului periferic.

Ecranul (jugul) magnetic dimprejurul bobinelor HTS (Figura 3.6) este realizat din fasii silicioase in vederea reducerii fluxului de pierderi al DMS-ului.

Tabelul 3.2. Caracteristicile DMS-ului.

Inductia magnetica	0 ... 2.5 T
Uniformitatea campului magnetic (GFZ)	0.1 %
Volumul GFZ	~ 80 cm ³
Lungimea GFZ	100 mm
Diametrul canalului central	50 mm
Intensitatea curentului de operare	180 A

3.1.3. Rezultatele modelarii matematice si simularii numerice

Fortele electrodinamice care se exercita asupra infasurarilor bobinelor HTS pot afecta stabilitatea mecanica a sistemului in timpul functionarii. Evaluarea acestora presupune predeterminarea regiunilor care sunt susceptibile la aparitia unor sollicitari si deformari mecanice generate de fortele electrodinamice. Calculul *a priori* si cu exactitate al acestora este deosebit de dificil, insa, ceva mai simplu, poate fi evaluat ordinul de marime al lor.

O abordare pragmatica este analiza prin modelare numerica folosita pentru a prezice regiunile predispuse aparitiei sollicitarilor mecanice. In acest sens, s-au formulat o serie de modele matematice, care, odata rezolvate cuplat, au oferit informatii despre distributia curentului electric prin infasurarile bobinelor, despre campul magnetic si fortele electrodinamice generate de curentul care circula prin bobine si despre sollicitarile mecanice generate de fortele electrodinamice.

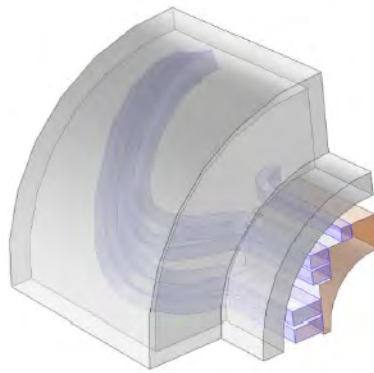


Figura 3.7. Domeniul de calcul. Se foloseste conditia de simetrie pentru a reduce dimensiunea modelului. Domeniul corespunzator aerului este eliminat pentru o vizualizare mai clara.

Modelele matematice corespunzatoare celor trei probleme (camp electric, camp magnetic si mecanica structurilor) au fost rezolvate numeric folosind metoda elementului finit (FEM) [7]. In Figura 3.7 este prezentat domeniul de calcul, pentru care s-au folosit conditii de simetrie axiale in vederea reducerii acestuia la 1/8 din dimensiunea originala, fara a compromite, insa, nivelul de acuratete al rezultatului numeric obtinut. Problema de camp magnetic este „inchisa” cu ajutorul unui domeniu compus din elemente infinite.

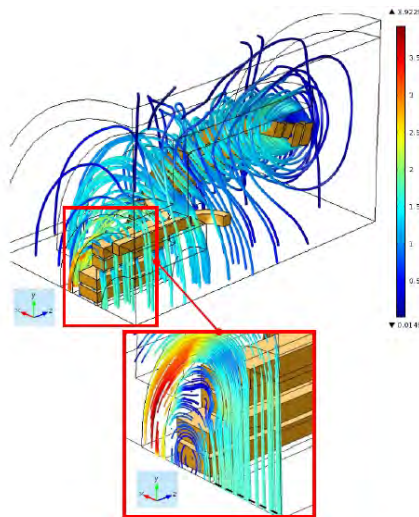
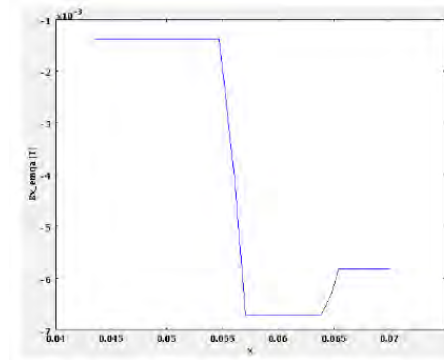


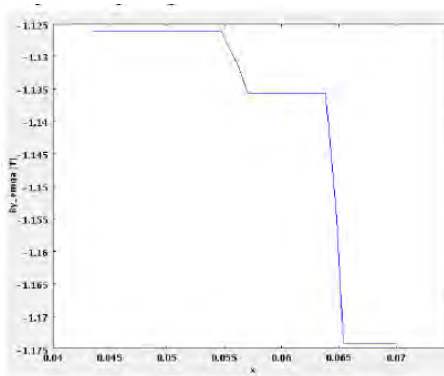
Figura 3.8. Inductia campului magnetic reprezentata prin tuburi de flux. Culoarea acestora reflecta amplitudinea locala (valorile sunt exprimate in tesla).

S-a formulat si s-a rezolvat, mai intai, o problema de tip Laplace. Rezultatul obtinut a folosit la modelarea unei conductivitati anizotrope specifice bobinelor HTS, fabricate din benzi YBCO in cazul real, si reprezentate sub forma unor conductori masivi in model.

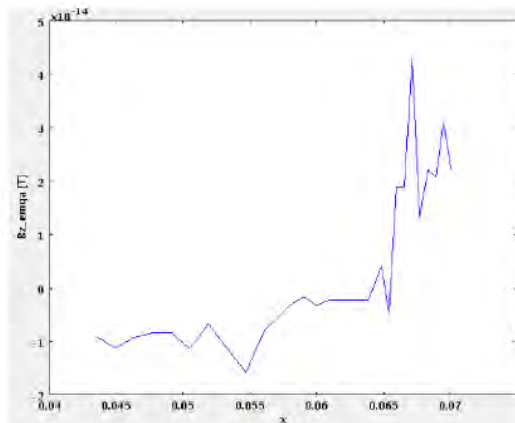
Ulterior, s-a formulat si s-a rezolvat o problema de electrocinetica pentru a determina distributia densitatii de curent prin infasarile bobinelor. S-a considerat ca bobinele sunt alimentate cu un curent a carui intensitate este de 300 A, egal cu valoarea limita suportata de bobinele HTS [6]. Densitatea de curent electric astfel obtinuta este, mai departe, folosita ca sursa de camp magnetic pentru rezolvarea unei probleme de magnetostatica. In Figura 3.8 este prezentat spectrul liniilor de camp magnetic.



a. Componenta B_x a inducției campului magnetic după direcția Ox .



b. Componenta B_y a inducției campului magnetic după direcția Ox .



c. Componenta B_z a inducției campului magnetic după direcția Ox .

Figura 3.9. Componentele inducției magnetice evaluate după direcția Ox (linia intreruptă din Fig. 13) în interiorul canalului cald.

Calitatea campului magnetic generat este evaluată cu ajutorul gradientului inducției magnetice în canalul cald. Figura 3.9 prezintă distribuția acestuia în lungul liniei negre intrerupte, trasată după direcția Ox (imaginea marită din Figura 3.8).

Apărent, în limitele nivelului de acuratețe aferent soluției numerice obținute (inclusiv calitatea rețelei de discretizare utilizate), $B_z \sim O(10^{-14})$ T, deci neglijabil, iar $B_x \sim O(10^{-3})$ T este cu trei ordine de mărime mai mic decât B_y . Totuși, este recomandată realizarea unor teste de acuratețe pentru a verifica în profunzime corectitudinea rezultatului numeric obținut. De asemenea, o distribuție a înfășurărilor bobinelor mai apropiată de cea teoretică de tip „cos teta” [4] va trebui luată în considerare.

Fortele electrodinamice sunt descrise in Figura 3.15 cu sageti de culoare rosie si reprezinta efortul care se exercita asupra bobinelor HTS in problema de analiza structurala.

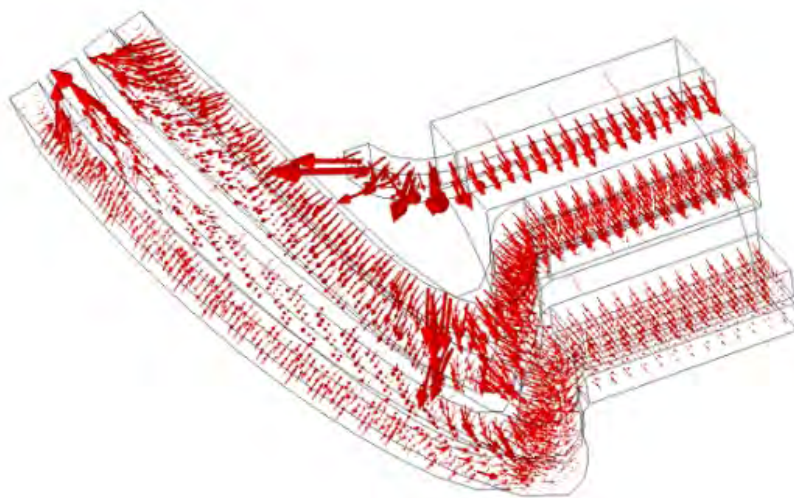
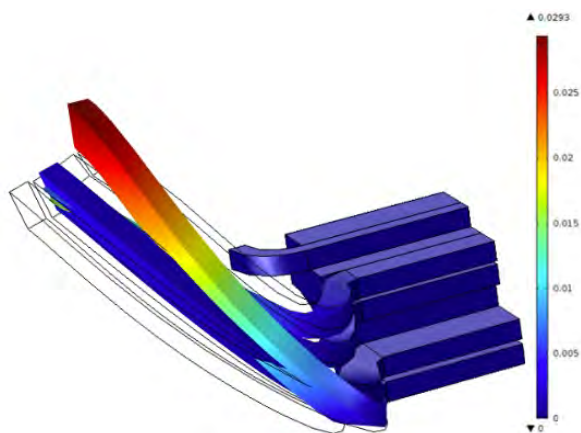
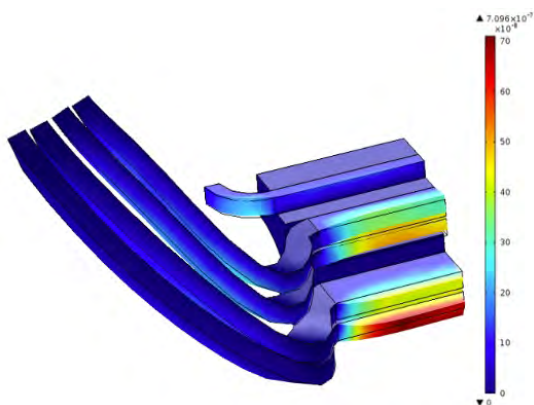


Figura 3.10. Fortele electrodinamice din infasurarile bobinelor HTS.

Deformarea infasurarilor bobinelor datorita fortelor electrodinamice este influentata de suportul pe care acestea sunt fixate. In studiul de fata s-au analizat trei cazuri (Figura 3.16): a) doar canalul cald este fixat, b) canalul cald si fetele interioare verticale de la capetele bobinelor sunt fixate si c) canalul cald, fetele interioare verticale de la capetele bobinelor si fetele verticale ale bobinelor paralele cu fetele verticale ale canalului cald sunt fixate.

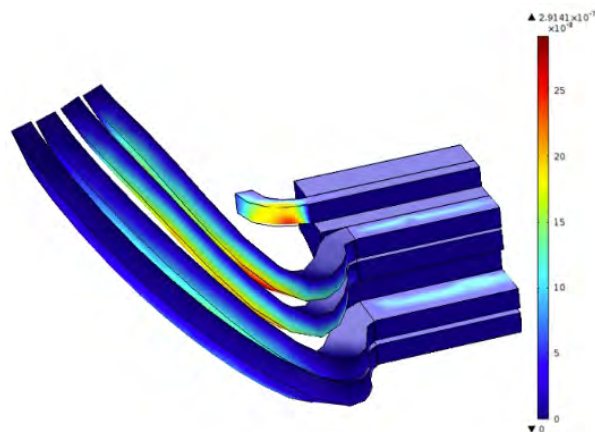


a. Canalul cald este singura piesa fixa.



b. Canalul cald si fetele interioare verticale de la capetele bobinelor sunt fixate.

Deformările sunt amplificate de 5000 de ori pentru o mai buna vizualizare.



c. Canalul cald, fetele interioare verticale de la capetele bobinelor și fetele verticale ale bobinelor paralele cu fetele verticale ale canalului cald sunt fixate.

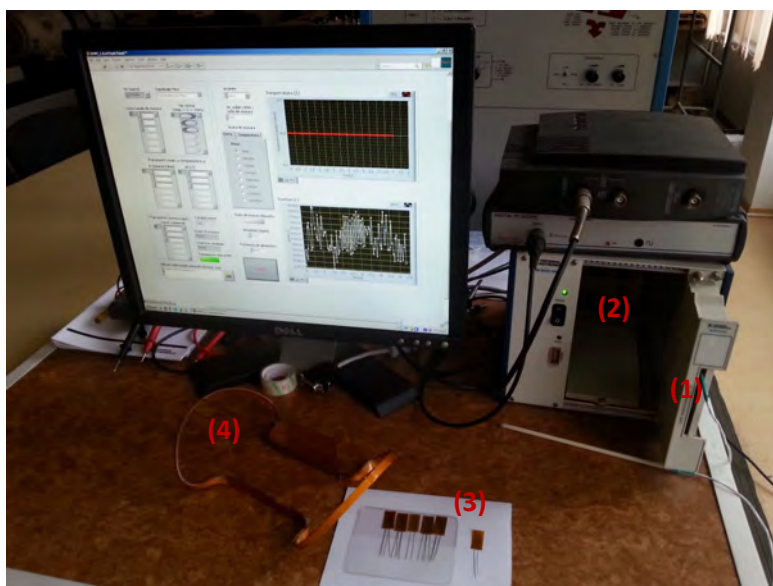
Figura 3.11. Deformările generate de forțele electrodinamice. Canalul cald este punctul de sprijin. Valorile sunt exprimate în metri. Deformările sunt amplificate de 5000 de ori pentru o mai buna vizualizare.

Bobinele sunt compacte, impregnate cu rasini, sub forma unor blocuri, cu proprietati mecanice anizotrope, diferite de cele corespunzatoare benzilor YBCO. Totusi, in acest studiu s-au folosit proprietatile de baza (modulul lui Young $E = 113$ GPa, coeficientul Poisson $\nu = 0.1$, densitatea masica $\rho = 6.3$ g / cm³ [8]). Utilizarea altor proprietati, aferente blocului compozit sunt subiectul unui studiu viitor. Rezultatele obtinute ofera informatii cantitative deosebit de utile procesului de proiectare mecanica a DMS-ului.

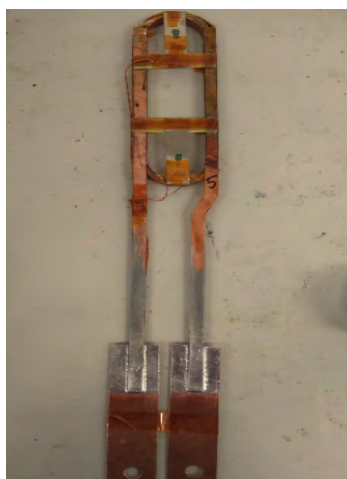
3.1.4. Masurarea fortelor exercitate asupra bobinelor HTS

Pentru evaluarea solicitarilor mecanice si termice care se exercita asupra unei bobine HTS de test in timpul functionarii, a fost dezvoltat un workbench destinat masurarii si achizitiei datelor bazat pe o platforma National Instruments, care foloseste o aplicatie dezvoltata sub mediul LabVIEW pentru comanda si control.

Partea hardware a workbenchului (Figura 3.12, a) are in componenta (1) un bloc de terminale NI-SCXI 1331 [9] la care sunt conectate marcele tensometrice si termocuplurile (Figura 3.17, c), (2) un multiplexor NI-SCXI 1127 [10], (3) un bloc de conditionare a semnalului NI-SCXI 1000 [11]. Sistemul hardware este controlat cu ajutorul unei aplicatii (4) dezvoltate in LabVIEW 2011 [12]. Aceasta comunica cu un multimetru PCI NI-DMM 4065 [13] care permite masurarea cu precizie a variatiei rezistentelor aferente senzorilor si calculeaza valorile deformatiilor si temperaturii. Informatia astfel obtinuta este afisata in timp real pe displayul de lucru si salvata intr-un fisier text pentru eventuale verificari, prelucrari si analize ulterioare.



a. Bench-ul destinat masurarii temperaturii si sollicitarilor mecanice care apar in timpul functionarii unei bobine HTS



b. Bobina HTS de test



c. Marci tensometrice pentru masurarea deformatiilor mecanice.

Figura 3.12. Sistemul de masurare si achizitie a eforturilor mecanice si termice care sollicita o bobina HTS de test

Pozitionarea marcilor tensometrice pe bobina de test este indicata de rezultatele simularii numerice (Figura 3.11) si prezentata in figurile 3.13 – 3.14.



Fig. 3.13. Pozitionarea senzorilor tensometrici pe bobinele HTS(indicate prin sageti)

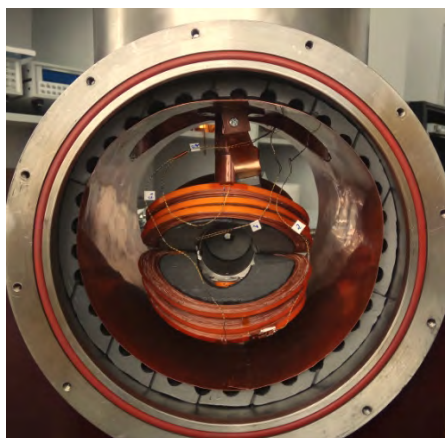


Fig. 3.14. Detaliu montaj senzori tensometrici pe bobinele supraconductoare ale EMSD

In timpul testelor de stabilire a caracteristicii electromagnetului HTS, au fost inregistrate si indicatiile senzorilor tensometrici criogenici. Acest tip de senzori, produsi de compania japoneza Tokyo Sokki Kenkyujo au fost montati pe un suport de otel, acest suport fiind fixat apoi pe bobinele supraconductoare.

3.1.5. Rezultate experimentale:

Testele realizate in timpul experimentelor din ICPE-CA au pus in evidenta urmatoarele rezultate prezentate in tabelul 3.3.

Tabel 3.3.Rezultate masurari deformari bobinaje HTS

Curent (A)	Temperatura (K)	Deformare bobina 1(mm)	Deformare bobina 2(mm)
50	25	0,010	0,013
100	25	0,015	0,018
150	25	0,018	0,022
175	25	0,022	0,029

Rezultatele obtinute arata ca deformarea capetelor bobinelor HTS nu este pronuntata, ci este de ordinal micronilor. Acest lucru demonstreaza rigidizarea bobinelor HTS cu suportii de fixare respectivi, care confirma astfel solutia aleasa. Desi fortele electrodinamice sunt destul de mari, deformarile sunt extreme de mici, ceea ce permite bobinelor sa functioneze fara a se initia quench trigerat mecanic prin deformari locale ale bobinajului.

3.1.6. Concluzii

In cadrul etapei 4/2017 partenerul P2 a realizat urmatoarele:

- O reevaluare numerica prin simulate COMSOL a fortelor electrodinamice din bobinele supraconductoare si a tensiunilor mecanice generate, punandu-se astfel in evidenta zonele supuse unor sollicitari mai mari. Astfel, s-a pus in evidenta ca zona capetelor bobinelor sunt cele mai expuse sollicitarilor mecanice;
- A fost testat si utilizat sistemul de achizitie al datelor de temperatura si ale senzorilor tensometrici realizat in cadrul etapei anterioare a proiectului, utilizandu-se senzori tensometrici criogenici;
- Au fost efectuate masuratori de deformari mecanice pe bobinajul supraconductor HTS in timpul experimentelor la temperature joase, pentru stabilirea caracteristicii de functionare a electromagnetului supraconductoar dipolar. S-au masurat deformatiile aparute pe doua bobine HTS in la diverse valori de current: 50, 100, 150 si 175 A.
- Au fost diseminate rezultatele cercetarilor, prin participare cu doua lucrari stiintifice (alaturi de Coordonator) la doua conferinte internationale IEEE si care se vor publica in volumele conferintelor.

Bibliografie

- [1]. A. M. Morega, I. Dobrin, M. Morega, "Thermal and magnetic design of a dipolar superferric magnet for high uniformity magnetic field", *7th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering – ATEE 2011*, May 12-14, Bucharest, pp. 589-592, IEEE no: CFP1114P-PRT, ISBN 978-1-4577-0507-6.
- [2]. Sumitomo Inc., <http://www.shicryogenics.com>
- [3]. D. Enache, A. Morega, I. Dobrin, A. Dobrin, M. Morega, "Experiments on YBCO tape type high temperature superconductor junctions", *ICATE, 2016 International Conference on Applied and Theoretical Electricity*, October 6-8, Craiova, Romania, IEEE Xplore, 978-1-4673-8562-6/16
- [4]. I. Dobrin, A.M. Morega, D. Enache, A. Dobrin, I. Popovici, S. Zamfir, "Bobine supraconductoare pentru acceleratoare de particule și sistemul criogenic de răcire al acestora", *Simpozionul de Mașini Electrice, SME'16*, ediția a XIIa, 11 Noiembrie, 2016, FIE-UPB, București ISSN 2067-4147.
- [5]. SuperOx Co, <http://www.superox.ru/en/products/998-2ghs/>
- [6]. Superpower Inc., <http://www.superpower-inc.com/>
- [7]. Comsol Multiphysics, v. 3.5a (2010), v. 5.0 (2015)
- [8]. A. Bartalesi, *Design of High Field Solenoids made of High Temperature Superconductors*, M.Sc. Thesis, 2008-2009, Università degli studi di Pisa, Facoltà di Ingegneria — Dept. of Eng.
- [9]. NI SCXI-1331, National Instruments Corporation, <http://www.ni.com/pdf/manuals/320515f.pdf>
- [10]. NI SCXI-1127, National Instruments Corporation, http://www.ni.com/pdf/products/us/4sw486-487_502.pdf
- [11]. NI SCXI-1000, National Instruments Corporation, http://www.ni.com/pdf/products/us/4scxisc333_334_335_336.pdf
- [12]. LabVIEW 2011 SP1 (32 bit), National Instruments Corporation, <http://www.ni.com/download/labview-development-system-2011-sp1/2871/en/>
- [13]. NI DMM-4065, National Instruments Corporation, <http://www.ni.com/pdf/manuals/374315g.pdf>

CAPITOLUL 4. Diseminare rezultate.

In cadrul etapei 4/2017, au fost sustinute doua lucrari stiintifice la doua Conferinte Internationale sub egida IEEE din care una este déjà publicata cea dea doua urmand a se publica in IEEE transactions on Applied Superconductivity, indexata ISI.

1. CONFERINTA INTERNATIONALA ATEE 2017

Titlu conferinta : The 10th International Symposium on ADVANCED TOPICS IN ELECTRICAL ENGINEERING

Titlu Lucrare : High Temperature Superconductor dipolar magnet for high magnetic field generation - design and fabrication elements.

Autori: I. Dobrin ; A.M. Morega ; D. Enache ; A. Dobrin ; M. Morega ; A.A. Dobre ; I. Popovici

Electronic ISBN: 978-1-5090-5160-1 DOI: 10.1109/ATEE.2017.7905109

2. CONFERINTA INTERNATIONALA EUCAS 2017 – GENEVA 2017

Titlu conferinta : „European Conference on Applied Superconductivity”

Titlu Lucrare : „Conduction Cooled HTS Dipolar Magnet, Realization and Experimental Results”

Autori: I. Dobrin, A. M. Morega, D. Enache, A. Dobrin, M. Morega, I. Popovici, A. Dobre.

CAPITOLUL 5. CONCLUZII GENERALE

În cadrul etapei prezente a lucrărilor, au fost realizate de către partenerii consorțiului următoarele lucrări:

1. Coordonatorul lucrărilor, a realizat următoarele obiective:

- Testarea la vid a electromagnetului. S-a obținut în timpul funcționării o presiune reziduală la vidare, de $\sim 10^{-6}$ mbar.
- Măsurarea parametrilor funcționali ai crioracitorului (sistemului criogenic de răcire). Ca urmare a funcționării crioracitorului timp de cca. 28 ore, temperatura bobinajului supraconductor a ajuns la valoarea de $\sim 25\text{K}$ iar a conductorilor HTS de alimentare, la ca. 65K .
- Măsurarea parametrilor funcționali ai bobinelor supraconductoare (rezistența electrică și inductanța electrică) la temperatură camerei.
- Măsurarea curentului critic al benzii supraconductoare utilizate, la temperatură de 77K , obținându-se o valoare de 120A .
- Măsurarea curentului critic al bobinelor supraconductoare, găsiindu-se valori în domeniul: $70\text{-}110\text{A}$.
- Măsurarea inducției câmpului magnetic generat de electromagnetul EMSD pe axa geometrică a acestuia, găsiindu-se o valoare maximă de $2,303\text{T}$ pentru un curent de alimentare de 175A .
- Determinarea neuniformității câmpului magnetic generat de EMSD pe axa geometrică a acestuia, obținându-se o neuniformitate maximă de $\sim 0,1\%$.
- Diseminarea rezultatelor cercetărilor prin participarea la două Conferințe Internaționale IEEE.

2. Partenerul 1, a realizat:

- Experimentarea și calibrarea sistemului de măsură și mapare a câmpului magnetic prin măsurarea câmpului magnetic ($B \sim 1\text{T}$) generat de un electromagnet cu deviație de 90° , prin comparație cu un sistem dotat cu sonda RMN. Rezultatele au coincis la 4 zecimale.
- S-a testat sistemul și pe un magnet dipolar (spectrometru ionic), care generează un câmp de 1T (parabolă Thomson), care generează un câmp calibrat (cu certificate de calibrare de la fabricant)
- Sau realizat măsurători de câmp magnetic cu sistemul de măsură și mapare cu achiziția datelor măsurate, într-un magnet generator de un câmp de 1T . Datele au fost reprezentate 3D, punându-se în evidență neuniformitățile depistate.

- S-au diseminat cunostintele dobandite in cadrul temei prin participare la 3 conferinte nationale si internationale) cu lucrari stiintifice si s-a concretizat si in doua lucrari stiintifice publicate in reviste cotate ISI.

3. Partenerul P2 a realizat:

- O reevaleare numerica prin simulate COMSOL a fortelor electrodinamice din bobinele supraconductoare si a tensiunilor mecanice generate, punandu-se astfel in evidenta zonele supuse unor sollicitari mai mari. Astfel, s-a pus in evidenta ca zona capetelor bobinelor sunt cele mai expuse sollicitarilor mecanice;
- A fost testat si utilizat sistemul de achizitie al datelor de temperatura si ale senzorilor tensometrici realizat in cadrul etapei anterioare a proiectului, utilizandu-se senzori tensometrici criogenici;
- Au fost efectuate masuratori de deformari mecanice pe bobinajul supraconductor HTS in timpul experimentelor la temperature joase, pentru stabilirea caracteristicii de functionare a electromagnetului supraconductor dipolar. S-au masurat deformarile aparute pe doua bobine HTS in la diverse valori de current: 50, 100, 150 si 175 A.
- Au fost diseminate rezultatele cercetarilor, prin participare cu doua lucrari stiintifice (alaturi de Coordonator) la doua conferinte internationale IEEE si care se vor publica in volumele conferintelor.

4. Partenerul3 a realizat:

- Un sistem mecanic de fixare/sustinere a jugului de fier al electromagnetului
- Un sistem mecanic de fixare a bobinelor supraconductoare HTS impotriva deformarilor mecanice
- A participat la testele si experimenatrile desfasurate in ICPE-CA pentru stabilirea parametrilor functionali ai electromagnetului HTS

Ca o concluzie generala, obiectivele etapei au fost atinse integral si lucrarile desfasurate sunt sustinute de 16 referinte bibliografice.