ELECTROMAGNEȚI NORMAL – CONDUCTORI ȘI SURSE DE ALIMENTARE REALIZATE DE ICPE-CA ÎN CADRUL CONTRIBUȚIEI IN-KIND A ROMÂNIEI LA PROIECTUL FAIR

Unul dintre cele mai importante proiecte de realizare a unui accelerator de particule aflat în prezent în derulare este proiectul internațional **FAIR – Facility for Antiproton and Ion Research**, care vizează construirea la Darmstadt, în Germania, a unui complex de acceleratoare capabil să furnizeze fascicule de ioni și antiprotoni cu energie ridicată și intensitatea cea mai inaltă și care va oferi cercetătorilor din Europa și din întreaga lume posibilitatea de a realiza studii în domeniul fizicii atomice, fizicii nucleare, fizicii antimateriei (studiul antiprotonilor), fizicii materiei nucleare în condiții extreme, fizicii plasmei și al aplicațiilor conexe. Acceleratorul principal al facilității este un sincrotron supraconductor cu inel dublu, cu o circumferință de ~1.100 m. O altă componentă importantă a FAIR este inelul de stocare **HESR – High Energy Storage Ring**, acesta având o circumferință de 574 m și fiind dedicat studiului interacțiunii tari folosind antiprotoni cu momentul în domeniul 1,5 – 15 GeV/c. În **Fig. 1** este prezentată structura complexului de acceleratoare FAIR și încadrarea HESR în această structură.

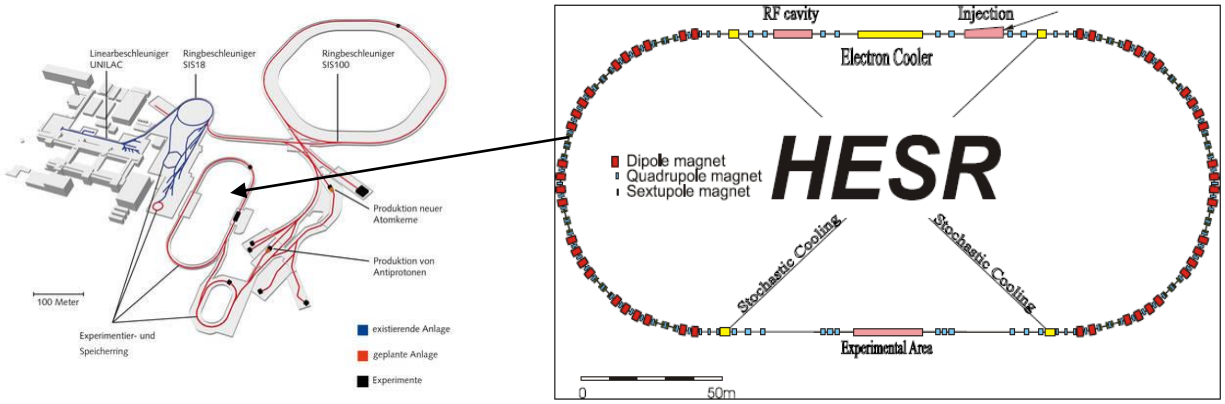


Figura 1. Structura proiectului FAIR și încadrarea HESR în această structură

România s-a implicat în proiectul FAIR încă din anul 2007, fiind acționară la societatea creată pentru implementarea proiectului - FAIR GmbH și membră în consorțiul creat pentru realizarea HESR. Pentru acest inel, România, prin ICPE-CA, s-a angajat să realizeze, testeze și furnizeze către FAIR GmbH următoarele echipamente reprezentând contribuția in-kind a României la proiectul FAIR:

- 66 electromagneți normal-conductori de tip sextupol;
- 27 electromagneți de tip steerer orizontal;
- 26 electromagneți de tip steerer vertical;
- 29 surse de alimentare pentru electromagneții de tip sextupol;
- 43 surse de alimentare pentru electromagneții de tip steerer.

Pentru îndeplinirea acestui obiectiv a fost încheiat un contract tripartit, nr. IKC2.11.2.3/2013, între FAIR GmbH, în calitate de societate beneficiară, Ministerul Cercetării, Inovării și Digitalizării - MCID, în calitate de acționar și finanțator al lucrărilor și INCDIE ICPE-CA, în calitate de furnizor al contribuției in-kind. Având în vedere că toate echipamentele care fac obiectul contribuției in-kind urmează a fi instalate în cadrul HESR, componentă ce reprezinta contribuția Forschungszentrum Julich – FZJ, Germania, la proiectul FAIR, această unitate, care este și leader al consorțiului HESR, a fost desemnată de către FAIR GmbH să coordoneze din punct de vedere tehnic activitățile derulate de ICPE-CA în cadrul contractului menționat și să recepționeze echipamentele care fac obiectul contractului.

În cadrul consorțiului HESR au fost derulate numeroase activități care au presupus vizite de lucru și stagii de pregătire ale cercetătorilor din ICPE-CA la FZJ, precum și vizite de lucru ale reprezentanților FZJ atât la ICPE-CA, cât și la unități industriale din România, acestea find vizate ca și potențiale unități subcontractoare. Cercetători din ICPE-CA au participat la întâlnirile organizate bianual în cadrul consorţiului HESR. O astfel de întâlnire a fost organizată în august 2009, la sediul ICPE-CA, imagini de la această întâlnire fiind prezentate în **Fig. 2**.

Figura 2. Imagini de la întâlnirea consorțiului HESR, București, sediul ICPE – CA, august 2009

Specialişti din cadrul ICPE-CA pe diferite domenii, CAD, modelari şi simulări electromagnetice, fluidice și mecanice, materiale, măsurări mecanice, electrice şi magnetice, prelucrări convenţionale şi neconvenţionale, au alcătuit o echipă de lucru care, în colaborare cu specialiştii din cadrul FZJ, au dezvoltat inițial prototipurile a doi electromagneți de tipul celor care urmau să fie livraţi în cadrul contribuţiei in-kind la proiectul FAIR şi anume: prototipul electromagnetului de tip sextupol, prezentat în **Fig. 3** și prototipul electromagnetului de tip steer vertical, prezentat în **Fig. 4**.

Figura 3. Prototipul electromagnetului de tip sextupol prezentat la târgul Hanovra 2011

Figura 4. Prototipul electromagnetului de tip steerer prezentat la TIB 2011

Prototipul electromagnetului de tip sextupol a fost realizat în colaborare cu SC ELECTROMAGNETICA SA Bucureşti şi a fost testat de către ICPE-CA. Prototipul a fost expus în cadrul târgului Hanovra 2011 (**Fig. 3**), fiind apoi expediat către FZJ, pentru a fi testat şi de către partenerii germani. Prototipul electromagnetului de tip steerer vertical a fost, de asemenea, proiectat şi realizat, fiind expus în cadrul TIB 2011 (**Fig. 4**). Pentru testarea celor două prototipuri au fost realizate și două prototipuri de surse de alimentare pentru acești electromagneți, acestea fiind realizate în colaborare cu societatea SC AAGES SA Sângeorgiu de Mureș.

După cum s-a menționat, HESR va include, pe lângă o serie de electromagneți de tip dipol și de tip quadrupol și un număr de 66 electromagneți de tip sextupol, realizați de către ICPE-CA. Aceștia sunt electromagneți normal-conductori, de c.c., cu o apertură de 140 mm și o lungime magnetică de 300 mm. Principala caracteristică a acestor electromagneți este derivata a doua a inducției câmpului magnetic creat în armătură, valoarea maximă a acestui parametru având prescrisă valoarea de 45 T/m^2. Puterea consumată de electromagnet este de max. 1,8 kW, iar curentul de excitație are valoarea maximă de 290 A.

Jugul electromagnetului de tip sextupol este format din două pachete de tole cu grosimea de 1 mm, realizate din oțel carbon cu conținut foarte scăzut de carbon. Tolele sunt lipite între ele cu ajutorul unui adeziv aplicat pe foile de tablă, încă din procesul de fabricație al materialului. Jugul electromagnetului are 6 poli cu polaritate alternantă, asigurată prin intermediul a 6 bobine dispuse câte una pe fiecare pol. Fiecare bobină are 15 spire dispuse pe 2 straturi și este realizată din țeavă rectangulară de Cu, calitate OF-101, puritate 99,9963% și condiționare R200, conductor achiziționat de la firma Buntmetall Amstetten GmbH, Austria. Conform certificatelor de calitate emise de fabricant, valoarea minimă a conductivității electrice a conductorului de Cu este de 58,6 MS/m. Dimensiunile conductorului de Cu sunt cele din Fig. 5, secțiunea sa fiind de 60,775 mm^2.

Electromagnetul de tip sextupol are un singur circuit electric, cele 6 bobine fiind înseriate în interiorul cutiilor de conexiuni. Sistemul de răcire este alcătuit din două circuite legate în paralel, un circuit format din cele 3 bobine montate pe semijugul superior și un circuit format din cele 3 bobine montate pe semijugul inferior. Intrările ambelor circuite sunt conectate la o țeavă de alimentare cu fluid de răcire, iar ieșirile ambelor circuite sunt conectate la o țeavă de evacuare, țevile de alimentare și evacuare fiind conectate la sistemul de recirculare al fluidului de răcire. Lungimea fiecărui circuit de răcire este de ~35 m, răcirea bobinelor făcându-se prin orificiul circular cu diametrul de 4 mm, prevăzut pe toată lungimea conductorului de bobinaj.

Ca fluid de răcire se utilizează apă, cu următoarele specificații:

- temperatura de intrare: 25°C ± 2°C;
- presiunea de intrare: max. 13 bar;
- căderea de presiune: max. 10 bar;
- debitul: 0.86 l/min;
- conductivitatea: < 1μS/cm;
- PH-ul: 7 – 9;
- conținutul de oxigen: < 0,1 mg/l;
- temperatura de ieșire: ~45°C.

HESR va include și 53 electromagneți de tip steerer, realizați, de asemenea, de către ICPE-CA. Aceștia sunt, ca și electromagneții de tip sextupol, electromagneți normal-conductori, de c.c., cu o apertură de 100 mm și o lungime magnetică tot de 300 mm. Principala caracteristică a acestor electromagneți este unghiul de deviație al fasciculului de particule, valoarea maximă a acestui parametru având prescrisă valoarea de 2 mrad. Puterea consumată de electromagnet este de max. 3,9 kW, iar curentul de excitație are valoarea maximă de 304,1 A.

Jugul electromagnetului de tip steerer este format tot din două pachete de tole cu grosimea de 1 mm, realizate din același material ca și tolele electromagnetului de tip sextupol. Jugul electromagnetului steerer are 2 poli pe care se montează câte o bobină. Fiecare bobină are 44 spire dispuse pe 4 straturi și este realizată din același material ca și bobinele electromagnetului sextupol. Chiar și dimensiunile conductorului de bobinaj sunt aceleași cu cele ale conductorului utilizat pentru realizarea bobinelor electromagnetului de tip sextupol.

Electromagnetul de tip steerer are tot un singur circuit electric, cele 2 bobine fiind înseriate în interiorul cutiilor de conexiuni. Sistemul de răcire este alcătuit și aici din două circuite legate în paralel, câte unul pentru fiecare bobină. Intrările ambelor circuite sunt conectate la o țeavă de alimentare cu fluid de răcire, iar ieșirile ambelor circuite sunt conectate la o țeavă de evacuare, țevile de alimentare și evacuare fiind conectate la sistemul de recirculare al fluidului de răcire. Lungimea fiecărui circuit de răcire este de ~72 m, fluidul de răcire fiind, de asemenea, același.

Principalii parametri ai electromagneților de tip sextupol, de tip steerer orizontal și de tip steerer vertical sunt prezentați în **tabelul 1**.

Tabelul 1. Parametri electromagneților de tip sextupol și steerer pentru HESR

Parametrul	**Electromagnet Sextupol**	**Electromagnet Steerer Orizontal**	**Electromagnet Steerer Vertical**
d^2B/dx^2	max. 45 T/m^2	-	-
Unghiul maxim de deflexie	-	2 mrad la p_{max}	2 mrad la p_{max}
Apertura	140 mm	100 mm	100 mm
Lungimea magnetica	300 mm	300 mm	300 mm
Lungimea jugului magnetic	270 mm	250 mm	250 mm
Latimea jugului magnetic	480 mm	596 mm	450 mm
Inaltimea jugului magnetic	480 mm	450 mm	596 mm
Masa circuitului magnetic	~290 kg	~165 kg	~165 kg
Numarul de bobine	6	2	2
Nr. de spire / bobina	15	44	44
Nr. de straturi / bobina	2	4	4
Nr. de spire / strat	7,5	11	11
Dimensiunile conductorului	10,6 x7 mm^2	10,6 x7 mm^2	10,6 x7 mm^2
Diametrul orificiului de racire	4 mm	4 mm	4 mm
Sectiunea conductorului	60,77 mm^2	60,77 mm^2	60,77 mm^2
Lungimea conductorului / bobina	~ 12 m	~ 72 m	~ 72 m
Masa conductorului / bobina	~ 6,5 kg	~ 39 kg	~ 39 kg
Curent maxim	290 A	304,1 A	304,1 A
Densitatea de curent	4,77 A/mm^2	5 A/mm^2	5 A/mm^2
Masa totala	~ 400 kg	~ 315 kg	~ 325 kg
Tensiunea (cc)	6,12 V	12,84 V	12,84 V
Rezistenta	21,12 mΩ	42,2 mΩ	42,2 mΩ
Inductivitatea	3,4 mH	0,28 mH	0,28 mH
Puterea	1,8 kW	3,9 kW	3,9 kW
Debit fluid racire	~ 0,86 l/min	~ 1,81 l/min	~ 1,81 l/min
Cadere de presiune	~ 1,14 bar	~ 5,21 bar	~ 5,21 bar

După semnarea și lansarea, în noiembrie 2013, a contractului ce are ca obiect contribuția in-kind pe care INCDIE ICPE-CA trebuie să o asigure în cadrul proiectului FAIR, și după începerea, în decembrie 2013, a finanțării activităților ce trebuie efectuate în cadrul contractului, au fost demarate lucrările referitoare la pregătirea de fabricație a electromagneților și a surselor care fac obiectul contribuției in-kind și care au constat, în principal, în derularea următoarelor lucrări:

Pentru elaborarea modelelor 3D ale electromagneților s-a procedat la elaborarea modelelor 3D ale tuturor componentelor acestor electromagneți și la crearea subansamblurilor și a ansamblului general, permițând astfel ca, înainte de execuția efectivă a produselor, să se verifice corectitudinea soluțiilor constructive adoptate. Modelele 3D au fost elaborate cu ajutorul sofware-ului parametrizat SolidWorks, software ce permite evidențierea dimensiunilor reperelor componente, a materialelor din care acestea se vor executa și implicit a cantităților necesare, precum și evidențierea tuturor componentelor standardizate care trebuie achiziționate.

Pentru electromagnetul sextupol, în realizarea structurii mecanice se pornește de la elementul de bază constituit de tola electromagnetului sextupol. Pe baza configurației impusă de beneficiar prin specificațiile detaliate ”DetailedSpecHESR6poleV2”, a fost creat modelul 3D al tolei electromagnetului sextupol, prezentat în **Fig. 5**.

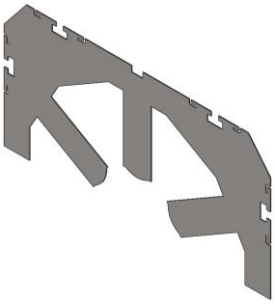


Figura 5. Modelul 3D al tolei electromagnetului sextupol

Modelul 3D a fost creat ținând cont de materialul din care tola se va executa și anume tablă cu grosimea de 1 mm din oțel electrotehnic tip M1300-100A, acoperită pe ambele fețe cu un strat izolator de lac epoxidic cu grosimea de 6 μm, tip Remisol EB 549. Prin utilizarea unui număr de minimum 265 de tole, necesar pentru a asigura gradul de umplere de 98% și lungimea de 270 mm impuse pentru un pachet de tole, se realizează două pachete de tole, prin utilizarea unui dispozitiv adecvat și consolidare în etuvă. Pe pachetele de tole se sudează o serie de plăci pentru rigidizare și pentru montarea ulterioară a elementelor de conexiuni electrice și hidraulice, rezultând jugul superior al sextupolului (**Fig. 6**) și jugul inferior al sextupolului (**Fig. 7**).

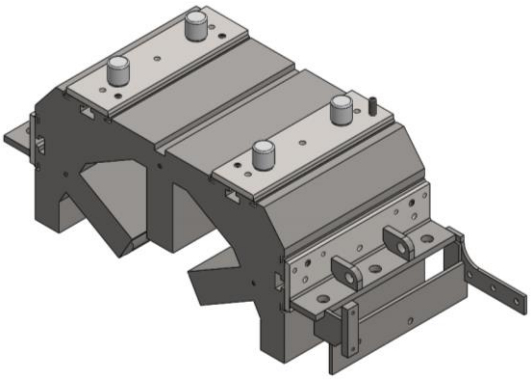


Figura 6. Modelul 3D al jugului superior

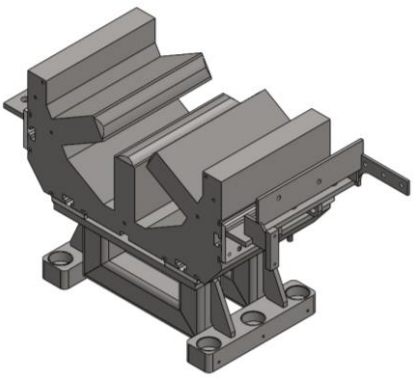


Figura 7. Modelul 3D al jugului inferior

Prin asamblarea celor două juguri cu ajutorul unor bride, tiranți și piulițe M12, rezultă ansamblul structurii mecanice a electromagnetului sextupol, modelul 3D al acestei structuri fiind prezentat în **Fig. 8**.

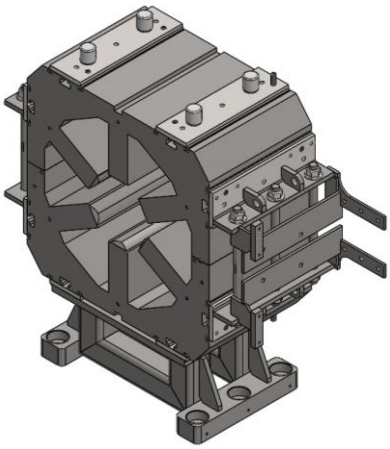
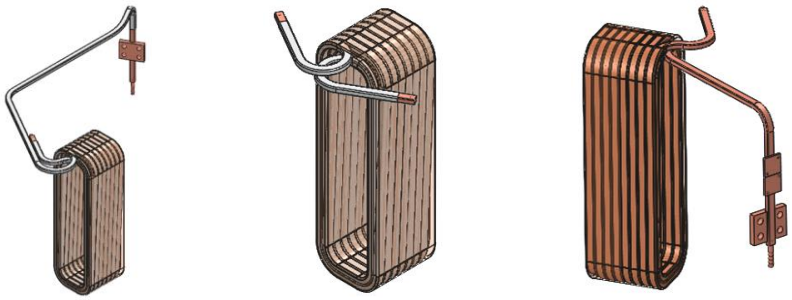
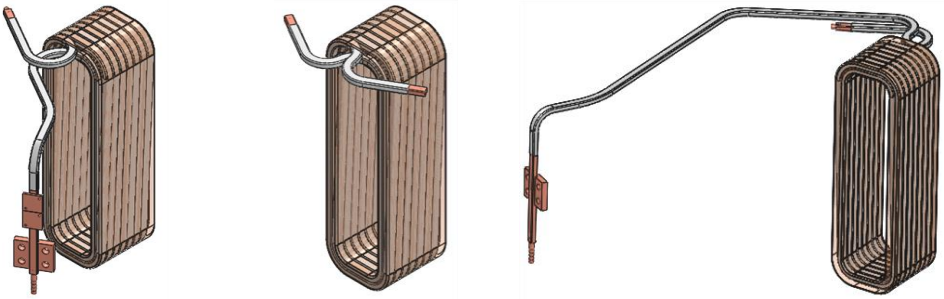


Figura 8. Modelul 3D al structurii mecanice a electromagnetului sextupol

Bobinajul electromagnetului sextupol se compune din șase bobine, fiecare având câte 15 spire dispuse pe două straturi, conductorul de bobinaj fiind țeavă rectangulară de Cu, cu dimensiunile de 10,6 x 7 mm și cu un orificiu de 4 mm pentru circularea apei utilizată pentru răcirea bobinajului. Conductorul de bobinaj este izolat cu bandă din fibra de sticlă, grosimea stratului izolator fiind de 0,5 mm în jurul fiecărei spire. După realizarea bobinelor izolate cu fibră de sticlă, corpul acestora se înglobează într-o rășină epoxidică ce asigură atât rigidizarea spirelor bobinelor, dimensiunile exterioare ale bobinei pentru asamblarea pe jugul electromagnetului, cât și izolarea electrică față de jug. Modelele 3D ale celor 6 bobine sunt prezentate în **Fig. 9**.



a) Bobina 1 **b) Bobina 2** **c) Bobina 3**



d) Bobina 4 **e) Bobina 5** **f) Bobina 6**

Figura 9. Modelele 3D al bobinelor electromagnetului sextupol

După cum se observă, modelele 3D ale bobinelor 1, 3, 4 și 6 au fost completate cu o serie de elemente necesare pentru înserierea bobinelor între ele, conectarea terminalelor, alimentarea cu apă de răcire și fixarea termostatelor de monitorizare a circuitului de răcire. Toate aceste elemente sunt prevăzute a se realiza din cupru și a se fixa prin brazare, conform normelor tehnice impuse de beneficiarul final al electromagneților.

Pentru montarea și fixarea bobinelor pe polii structurii mecanice a electromagnetului a fost conceput și modelat un subansamblu format dintr-o serie de plăci izolatoare și bride de fixare.

Cele șase bobine sunt înseriate, trei câte trei, existând deci patru terminale scoase în afara bobinajului. Subansamblul bobinaj va arăta ca în **Fig. 10**, dar, în realitate, conexiunile dintre bobine se vor realiza după introducerea lor pe polii structurii mecanice.

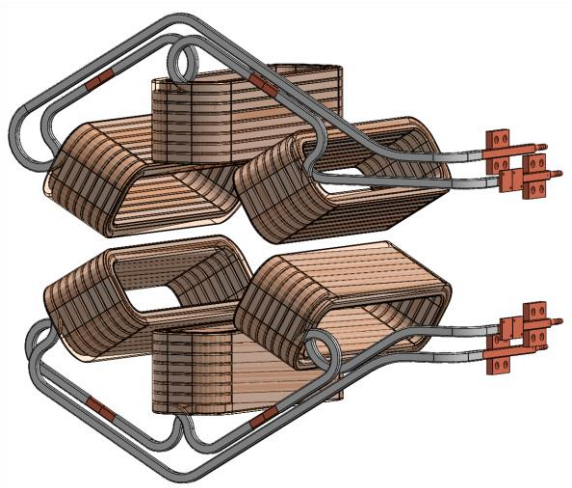


Figura 10. Modelul 3D al subansamblului bobinaj al electromagnetului sextupol

Pe polii structurii mecanice se introduce câte un subansamblu format din plăci izolatoare și bride de fixare, precum și bobina corespunzătoare polului respectiv. Se realizează prin brazare conexiunile dintre bobinele 1 și 2, 2 și 3, 4 și 5 și 5și 6, protejându-se apoi aceste conexiuni cu tub termocontractabil. Din această asamblare va rezulta un ansamblu format din structura mecanică și subansamblul bobinaj, ansamblu care face obiectul unui subcontract de execuție și al cărui model 3D este prezentat în **Fig. 11**.

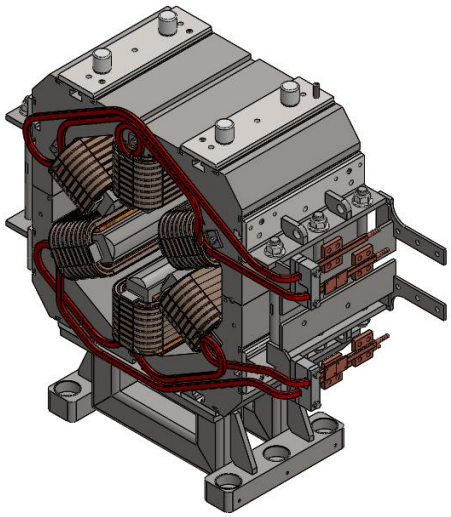


Figura 11. Modelul 3D al ansamblului format din structura mecanică și bobinajul electromagnetului sextupol

Sistemul de conexiuni electrice al electromagnetului sextupol constă, pe lângă subansamblul bobinaj, dintr-o serie de componente, sau executate conform documentației de execuție ce urmează a fi elaborată. Modelul 3D al subansamblului circutului electric al electromagnetului sextupol este prezentat în **Fig. 12**.

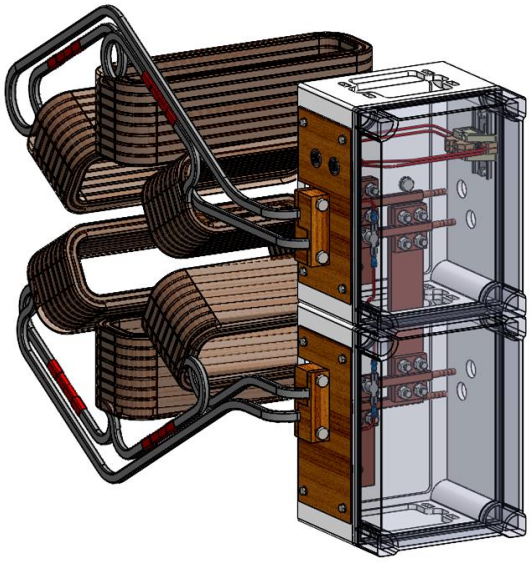


Figura 12. Modelul 3D al subansamblului circuitului electric al electromagnetului sextupol

Pentru protecția terminalelor bobinelor și pentru a preveni accesul în zona de alimentare cu tensiune a bobinajului, se utilizează două cutii de tip CI23-150, fabricant Eaton (Moeller). Pentru menținerea terminalelor bobinajului în poziția prevăzută, acestea se fixează pe structura mecanică a electromagnetului prin intermediul unor bride din textolit, care asigură izolarea electrică față de structura mecanică și care sunt prinse cu șuruburi cu cap hexagonal M8x50, pe plăcuțele 80x25x12. Închiderea cutiilor în zona de intrare a terminalelor bobinelor se realizează cu ajutorul unei plăci din sticlotextolit gros de 2 mm, fixată pe cutie cu ajutorul a patru subansambluri formate din câte un șurub cu cap hexagonal M5x16, o piuliță hexagonală M5 și două șaibe plate A5. Pe placa utilizată pentru închiderea cutiei superioare sunt practicate două orificii în care se montează două mufe, una cu 3 pini, cod Binder 09-308-30-03 și una cu 5 pini, cod Binder 09-316-30-05, utilizate pentru cuplarea unor aparate de monitorizare a regimului de lucru. Pe fiecare din cele patru plăcuțe pentru fixarea termostatelor se montează câte un termostat, cod Microtherm R20V 071 03, care asigură decuplarea bobinajului electromagnetului de la sursa de alimentare, în cazul în care temperatura apei de răcire depășește valoarea de 70˚C. Fiecare termostat se fixează pe plăcuța corespunzătoare cu câte două șuruburi cu cap crestat M3x6 ISO 2007.

Pentru alimentarea cu tensiune a bobinajului electromagnetului se utilizează două bride, care se montează, una pe brida de fixare a terminalului bobinei 1 și una pe brida de fixare a terminalului bobinei 6, prin intermediul a câte patru subansambluri formate dintr-un șurub cu cap hexagonal și pas fin M8x30 ISO 8676, o piuliță hexagonală cu pas fin M8 ISO 8673, o șaibă plată A8 DIN 125 și o șaibă cu dinți A8 DIN 6797. Bridele de fixare a terminalelor bobinelor 3 și 4 se conectează între ele cu ajutorul unei bridei de înseriere, fixarea făcându-se cu opt subansambluri identice cu cele utilizate pentru fixarea bridelor de alimentare.

Legăturile dintre termostate și mufele cu 3 și 5 pini se realizează prin intermediul unui subansamblu format din două blocuri Weidmuller SAK 4/35, două blocuri de capăt Endwinkel EW35 și un capac terminal, montate pe o șină profil omega, perforată, 35 x 7,5 mm, conform DIN EN 60715, producător OBO. Șina se fixează pe cutia superioară cu ajutorul a două subansambluri formate din câte un șurub cu cap hexagonal M5x16, o piuliță hexagonală M5 și două șaibe plate A5. Cablurile pentru realizarea legăturilor dintre termostate, blocurile de conectare și mufele

pentru aparate sunt realizate cu ajutorul unor cabluri MYF cu secțiunea de 1,5 mm^2, prevăzute unele dintre ele cu papuci DIN 46245, cod Druseidt Elektrotechnische GmbH 01103 și pini cod Druseidt Elektrotechnische GmbH 56003.

Din punct de vedere al circuitului hidraulic al electromagnetului sextupol, acesta constă, pe lângă subansamblul bobinaj care permite curgerea apei de răcire prin orificiul central Ø4 mm din conductorul de bobinaj, dintr-un sistem de două țevi, una de alimentare și una de evacuare, conectate la terminalele bobinelor prin intermediul unor furtune fixate cu coliere pe racordurile montate pe capetele terminalelor și pe cele două țevi. Modelul 3D al subansamblului circutului hidraulic al electromagnetului sextupol este prezentat în **Fig. 13**.

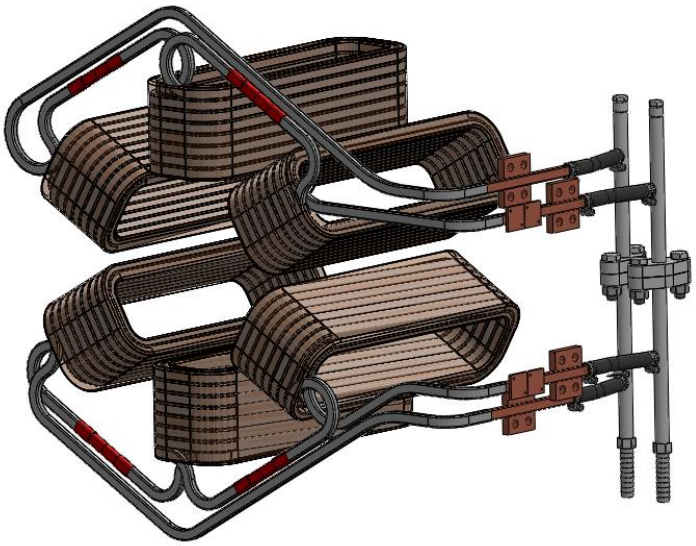


Figura 13. Modelul 3D al subansamblului circuitului hidraulic al electromagnetului sextupol

Teava de alimentare, se compune din două țevi Ø14x2, una cu dop și una cu racord, sudate pe câte o flanșă. Flanșele sunt fixate între ele prin două șuruburi cu cap hexagonal M10x40, două piulițe hexagonale M10 și două șaibe plate A10. Pe capătul superior al țevii cu dop se sudează o bucșă, în care se înfiletează un șurub cu cap hexagonal M8x16, pentru închiderea țevii. Pe fiecare din cele două țevi Ø14x2 se sudează, în orificiile practicate în aceste țevi, câte un racord, pentru realizarea legăturii dintre țeava de alimentare și terminalele bobinelor 1 și 6. Pe capătul inferior al țevii cu racord se înfiletează un racord, pentru conectarea circuitului la sursa de alimentare cu apa utilizată pentru răcire. Teava de evacuare are o construcție similară, singurele elemente care diferă fiind cele două țevi Ø14x2, care diferă doar prin dispunerea găurilor în care se montează racordurile pentru conectarea cu terminalele bobinelor 3 și 4. Toate elementele componente ale țevilor se execută din oțel inox, pentru a preveni oxidarea cauzată de mediul lichid care circulă prin ele. Legăturile dintre racordurile sudate pe țevi și racordurile brazate pe terminalele bobinelor, se realizează prin intermediul unor furtune Ø14x4, DESY/HERA 8/86, producător J. Meinert Hamburg GmbH, din cauciuc armat cu kevlar, presiune de lucru min. 16 bar, presiune de test min. 80 bar la 60˚C, rezistență la radiații până la $5x10^8$ rad, rezistență de izolație la 2500 V, de min. 10^5 Ohm. Fixarea pe racorduri a capetelor furtunelor se realizează cu ajutorul unor coliere cu șurub melcat, cu capacitatea de strângere 10 - 16 mm și lățimea de 9 mm. După asamblarea țevilor de alimentare și de evacuare, acestea se montează pe structura mecanică a electromagnetului, fixarea lor pe poziție făcându-se prin intermediul a două blocuri, prinse pe jugurile inferior și superior cu ajutorul a câte trei șuruburi cu cap hexagonal M8x35. Prin montarea pe ansamblul format din structura mecanică și bobinajul electromagnetului sextupol a componentelor și subansamblurilor sistemelor de conexiuni electrice și mecanice, va rezulta ansamblul general al electromagnetului sextupol, modelul 3D al acestuia fiind prezentat în **Fig. 14**.

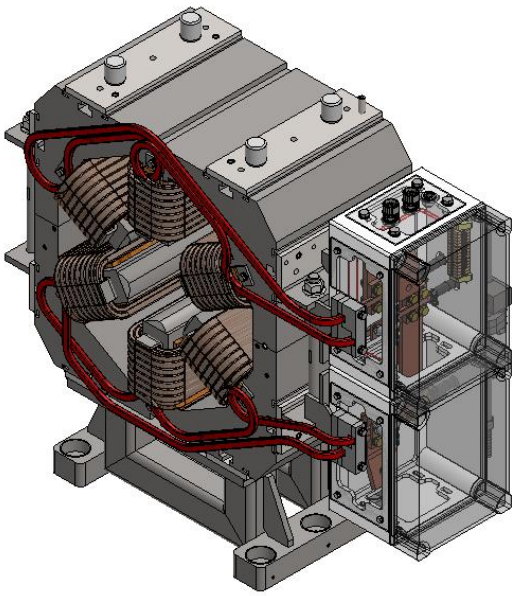


Figura 14. Modelul 3D al ansamblului general al electromagnetului sextupol

<u>Pentru electromagnetul steerer orizontal</u>, ca și la sextupol, pe baza configurației impusă de beneficiar prin specificațiile detaliate ”DetailedSpecHESRCorrectorV2”, a fost creat modelul 3D al tolei electromagnetului steerer orizontal, prezentat în **Fig. 15**.

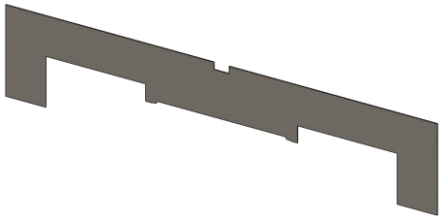


Figura 15. Modelul 3D al tolei electromagnetului steerer orizontal

Materialul din care se va executa tola este același ca în cazul tolei electromagnetului sextupol și anume tablă cu grosimea de 1 mm din oțel electrotehnic tip M1300-100A, acoperită pe ambele fețe cu un strat izolator de lac epoxidic cu grosimea de 6 µm, tip Remisol EB 549. Prin utilizarea unui număr de minimum 245 de tole, necesar pentru a asigura gradul de umplere de 98% și lungimea de 250 mm impuse pentru un pachet de tole, se realizează două pachete de tole, prin utilizarea unui dispozitiv adecvat și consolidare în etuvă. Pe pachetele de tole se sudează o serie de plăci pentru rigidizare și pentru montarea ulterioară a elementelor de conexiuni electrice și hidraulice, rezultând jugul superior al steererului orizontal (**Fig. 16**) și jugul inferior al steererului orizontal (**Fig. 17**).

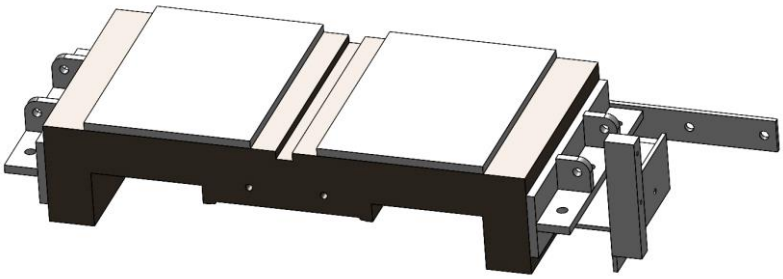


Figura 16. Modelul 3D al jugului superior al electromagnetului steerer orizontal

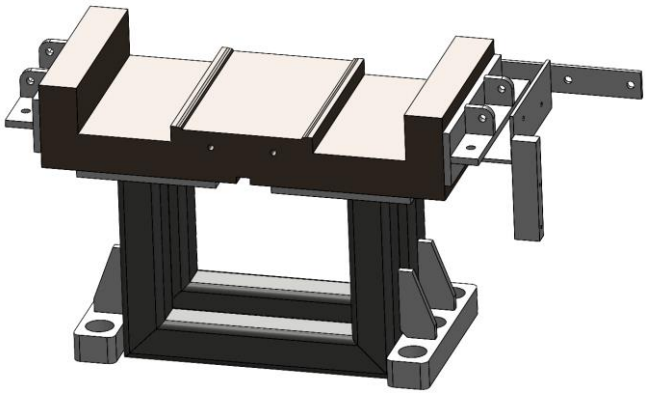


Figura 17. Modelul 3D al jugului inferior al electromagnetului steerer orizontal

Prin asamblarea celor două juguri cu ajutorul unor tiranți și piulițe M12, rezultă ansamblul structurii mecanice a electromagnetului steerer orizontal, modelul 3D al acestei structuri fiind prezentat în **Fig. 18**.

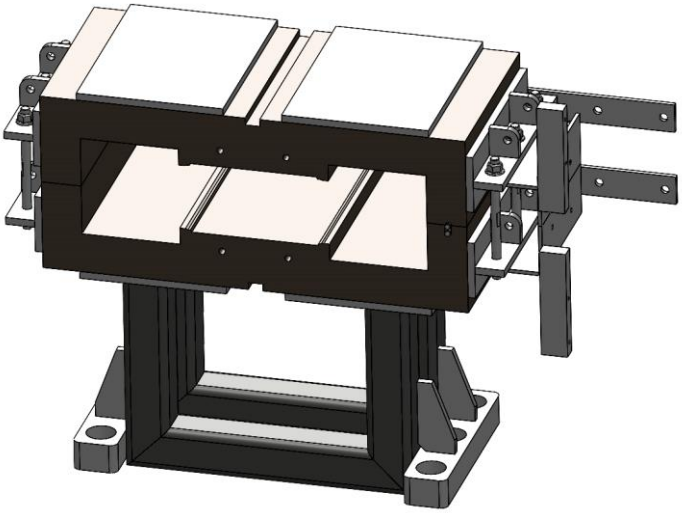


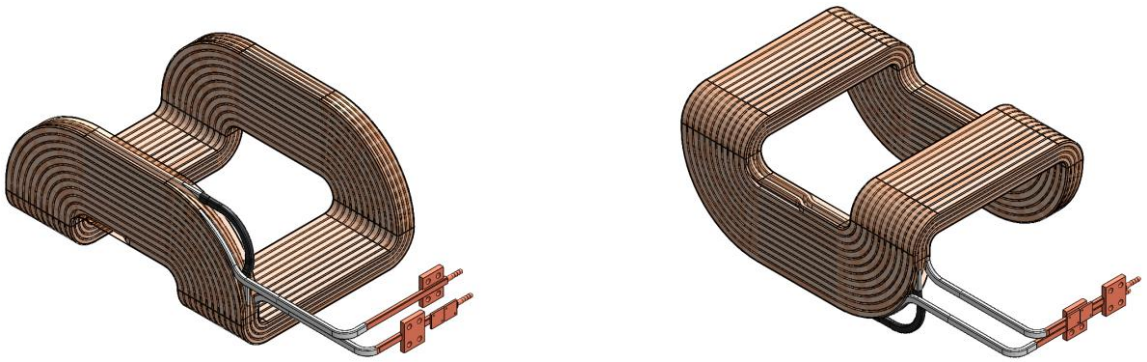
Figura 18. Modelul 3D al structurii mecanice a electromagnetului steerer orizontal

Bobinajul electromagnetului steerer orizontal se compune din două bobine, fiecare având câte 44 spire dispuse pe 4 straturi, conductorul de bobinaj fiind țeavă rectangulară de Cu, cu dimensiunile de 10,6 x 7 mm și cu un orificiu de 4 mm pentru circularea apei utilizată pentru răcirea bobinajului. Conductorul de bobinaj este izolat cu bandă din fibra de sticlă, grosimea stratului izolator fiind de 0,5 mm în jurul fiecărei spire. După realizarea bobinelor izolate cu fibră de sticlă, corpul acestora se înglobează într-o rășină epoxidică ce asigură atât rigidizarea spirelor bobinelor, dimensiunile exterioare ale bobinei pentru asamblarea pe jugul electromagnetului, cât și izolarea electrică față de jug.

Deoarece pe parcursul execuției prototipului electromagnetului steerer s-a constat că bobinele acestuia, așa cum erau concepute, cu cele 44 spire dispuse pe 4 straturi realizate dintr-o singură bucată de conductor, fără nicio conexiune intermediară, nu a fost posibil să se realizeze cu tehnologia existentă în țară, s-a convenit cu beneficiarul să se execute bobina din două părți, fiecare având 22 spire dispuse pe două straturi. Straturile 1 și 2 compun o bobină, iar straturile 3 și 4 compun o altă bobină, cele două bobine putându-se realiza din câte o bucată de conductor, fără alte conexiuni. La execuția prototipului, cele două părți au fost înseriate direct, conexiunea rezultată între straturile 2 și 3 fiind dispusă la interiorul bobinei cu 4 straturi rezultate. Amplasarea

conexiunii la interiorul bobinei nu a fost agreată, beneficiarul solicitând ca această conexiune să fie accesibilă. Această cerință a impus remodelarea celor două părți ale bobinei, astfel încât conexiunea dintre ele să se poată face în exteriorul bobinei.

Modelele 3D ale celor bobinelor electromagnetului steerer orizontal sunt prezentate în **Fig. 19**. După cum se observă, modelele 3D ale bobinelor superioară și inferioară au fost completate, ca și în cazul electromagnetului sextupol, cu o serie de elemente necesare pentru înserierea bobinelor între ele, conectarea terminalelor, alimentarea cu apă de răcire și fixarea termostatelor de monitorizare a circuitului de răcire. Toate aceste elemente sunt prevăzute a se realiza din cupru și a se fixa prin brazare, conform normelor tehnice impuse de beneficiarul final al electromagneților.



a) Bobina superioară **b) Bobina inferioară**

Figura 19. Modelele 3D ale bobinelor electromagnetului steerer orizontal

Pe polii structurii mecanice se introduc o serie de plăci pentru rigidizarea bobinelor și izolarea acestora față de structura mecanică, precum și bobina corespunzătoare polului respectiv. Din această asamblare rezultă un ansamblu format din structura mecanică și subansamblul bobinaj, ansamblu al cărui model 3D este prezentat în **Fig. 20**.

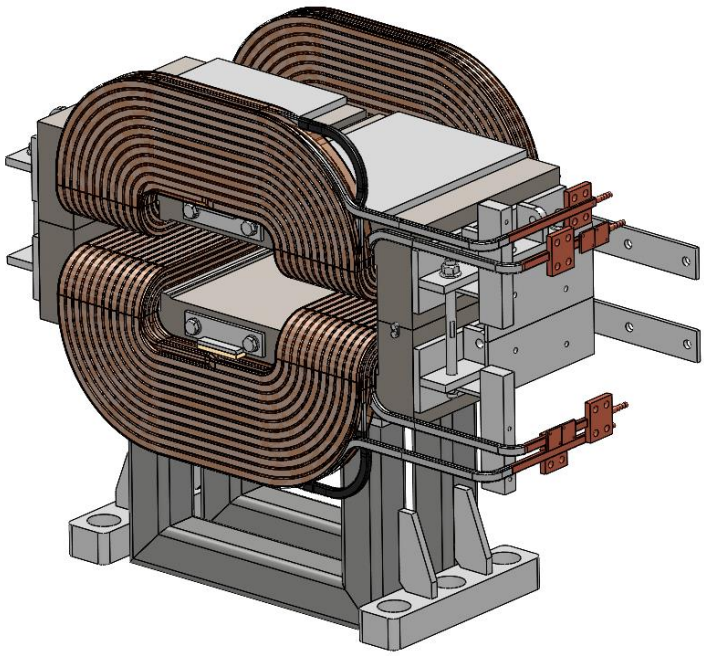


Figura 20. Modelul 3D al ansamblului format din structura mecanică și bobinajul electromagnetului steerer orizontal

Sistemul de conexiuni electrice al electromagnetului steerer orizontal constă, pe lângă subansamblul bobinaj, dintr-o serie de componente, multe dintre ele identice sau similare cu cele prevăzute în cazul electromagnetului sextupol. unele dintre achiziționate de la furnizori specializați, iar altele executate conform documentației de execuție ce urmează a fi elaborată.

Circuitul hidraulic al electromagnetului steerer orizontal este practic identic cu cel al electromagnetului sextupol, diferind doar subansamblul bobinaj.

Prin montarea pe ansamblul format din structura mecanică și bobinajul electromagnetului steerer orizontal a componentelor și subansamblurilor sistemelor de conexiuni electrice și hidraulice va rezulta ansamblul general al electromagnetului steerer orizontal, modelul 3D al acestuia fiind prezentat în **Fig. 21**.

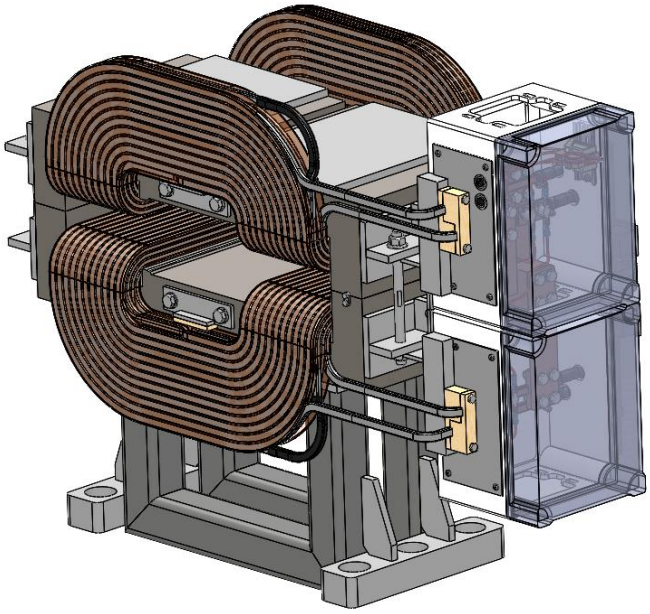


Figura 21. Modelul 3D al ansamblului general al electromagnetului steerer orizontal

<u>Pentru electromagnetul steerer vertical</u>, tola și pachetele de tole sunt identice cu cele utilizate în cazul electromagnetului steerer orizontal. Și aici, pe pachetele de tole se sudează o serie de plăci pentru rigidizare și pentru montarea ulterioară a elementelor de conexiuni electrice și hidraulice, rezultând jugul stânga al electromagnetului steerer vertical (**Fig. 22**) și jugul dreapta al electromagnetului steerer vertical (**Fig. 23**).

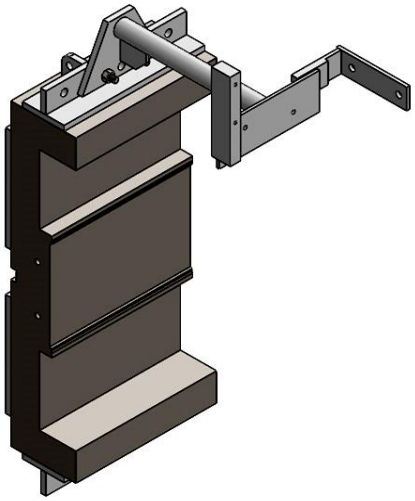


Figura 22. Modelul 3D al jugului din stânga al electromagnetului steerer vertical

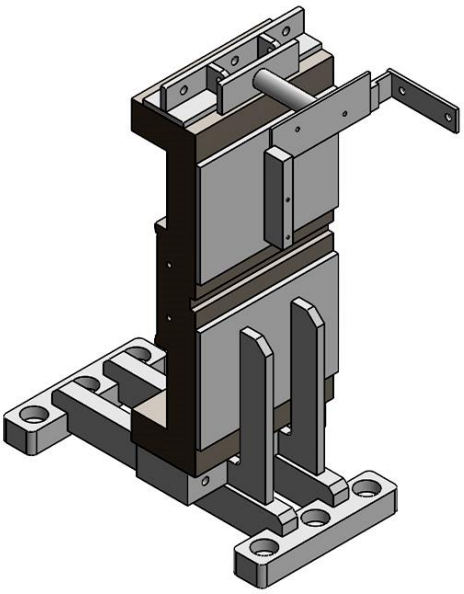


Figura 23. Modelul 3D al jugului din dreapta al electromagnetului steerer vertical

Prin asamblarea celor două juguri cu ajutorul unor tiranți și piulițe M12, rezultă ansamblul structurii mecanice a electromagnetului steerer vertical, modelul 3D al acestei structuri fiind prezentat în **Fig. 24**.

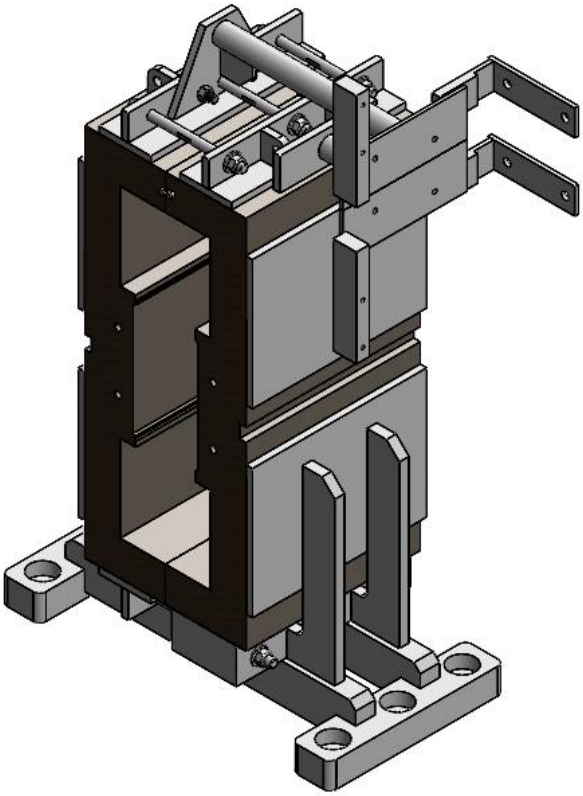
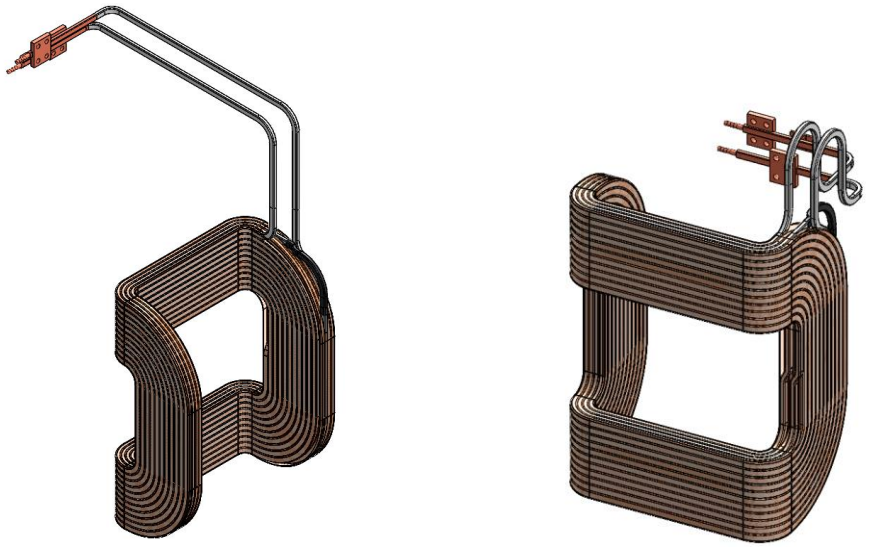


Figura 24. Modelul 3D al structurii mecanice a electromagnetului steerer vertical

Bobinajul electromagnetului steerer orizontal se compune tot din două bobine, pentru care s-a adoptat aceeași soluție constructivă aplicată în cazul electromagnetului steerer orizontal. Modelele 3D ale celor bobinelor electromagnetului steerer vertical sunt prezentate în **Fig. 25**.



a) Bobină stânga **b) Bobină dreapta**

Figura 25. Modelele 3D ale bobinelor electromagnetului steerer vertical

Pe polii structurii mecanice se introduc și aici o serie de plăci pentru rigidizarea bobinelor și izolarea acestora față de structura mecanică, precum și bobina corespunzătoare polului respectiv. Din această asamblare va rezulta un ansamblu format din structura mecanică și subansamblul bobinaj, ansamblu al cărui model 3D este prezentat în **Fig. 26**.

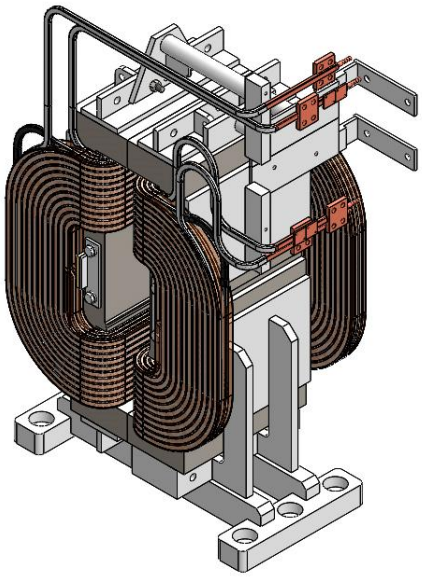


Figura 26. Modelul 3D al ansamblului format din structura mecanică și bobinajul electromagnetului steerer vertical

Sistemul de conexiuni electrice și circuitul hidraulic al electromagnetului steerer vertical sunt practic identice cu cele ale electromagnetului steerer orizontal.

Prin montarea pe ansamblul format din structura mecanică și bobinajul electromagnetului steerer vertical a componentelor și subansamblurilor sistemelor de conexiuni electrice și hidraulice va rezulta ansamblul general al electromagnetului steerer vertical, modelul 3D al acestuia fiind prezentat în **Fig. 27**.

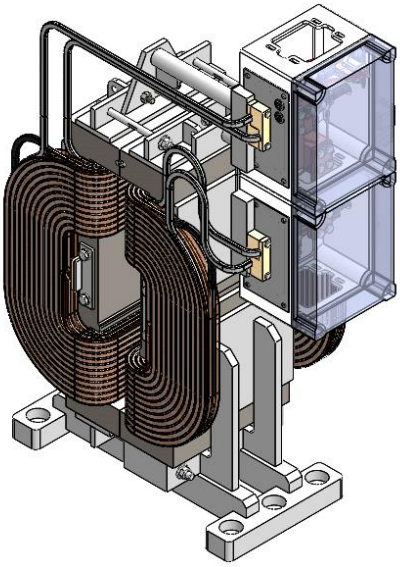


Figura 28. Modelul 3D al ansamblului general al electromagnetului steerer vertical

După cum s-a menționat la începutul capitolului, modelarea 3D a soluțiilor constructive adoptate pentru cele 3 tipuri de electromagneți care fac obiectul contractului in-kind a presupus elaborarea modelelor 3D pentru toate componentele care intră în alcătuirea produselor și menționate pe parcursul expunerii, incluzând reperele care se vor realiza prin procedee de prelucrare mecanică (plăci, bride, țevi, racorduri, tiranți etc.), elemente standardizate pentru asamblare (șuruburi, piulițe, șaibe), componente care se vor achiziționa de la producători specializați (cutii de conexiuni, mufe, termostate, furtune, coliere, cabluri, papuci cabluri etc.).

Trebuie menționat faptul că modelele 3D elaborate au fost transmise către responsabilul lucrărilor de realizare a HESR și coordonatorul tehnic al ICPE-CA, Forschungszentrum Jülich GmbH, acesta neavând nici un fel de observații privind conformitatea modelelor elaborate, fapt ce a permis trecerea la etapa următoare, cea de elaborare a documentației 2D, de execuție a seriei electromagneților care fac obiectul contractului.

O activitate deosebit de importantă pentru îndeplinirea cu succes a obligațiilor contractuale care revin ICPE-CA în cadrul contractului privind contributia in-kind la proiectul FAIR, a constituit-o elaborarea documentației de execuție a seriei electromagneților care fac obiectul contractului. Această documentație, prin informațiile pe care trebuie să le furnizeze personalului responsabil de execuția și testarea electromagneților, poate contribui, în mare măsură, la realizarea unor echipamente conforme cu specificațiile impuse de beneficiarul acestora și permite realizarea unei pregătiri de fabricație corespunzătoare.

Pe baza modelelor 3D elaborate pentru soluțiile constructive ale celor trei tipuri de electromagneți care fac obiectul contractului in-kind s-a procedat la elaborarea desenelor de execuție care să permită lansarea ulterioară în fabricație de serie a electromagneților. Documentațiile de execuție urmăresc structura adoptată și în cazul modelelor 3D și conțin desenele tuturor reperelor și subansamblelor care intră în componența electromagneților. În **Fig. 29** este prezentat desenul de execuție al ansamblului electromagnetului sextupol, în **Fig. 30** este prezentat desenul de execuție al ansamblului electromagnetului steerer orizontal, iar în **Fig. 31** este prezentat desenul de execuție al ansamblului electromagnetului steerer vertical.

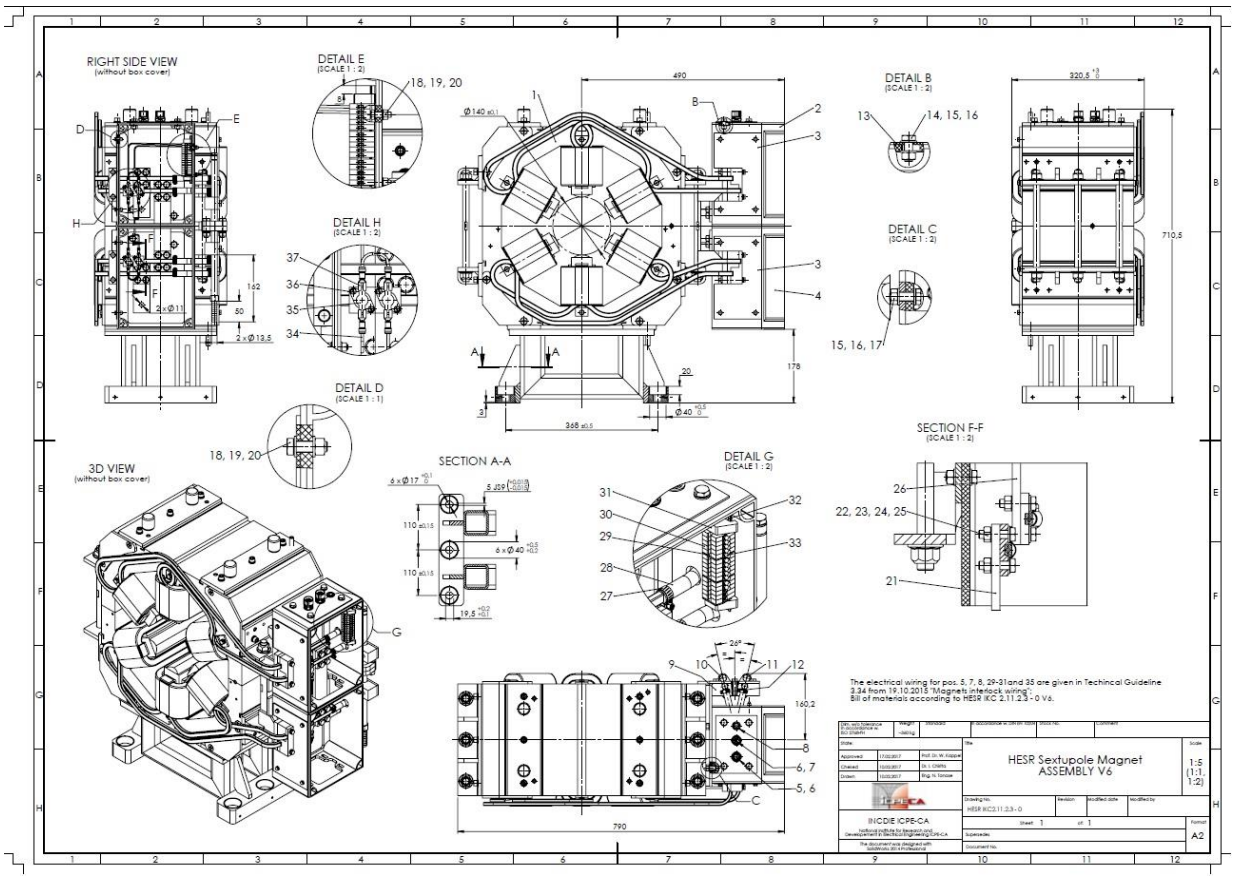


Figura 29. Desenul de execuție al ansamblului electromagnetului sextupol

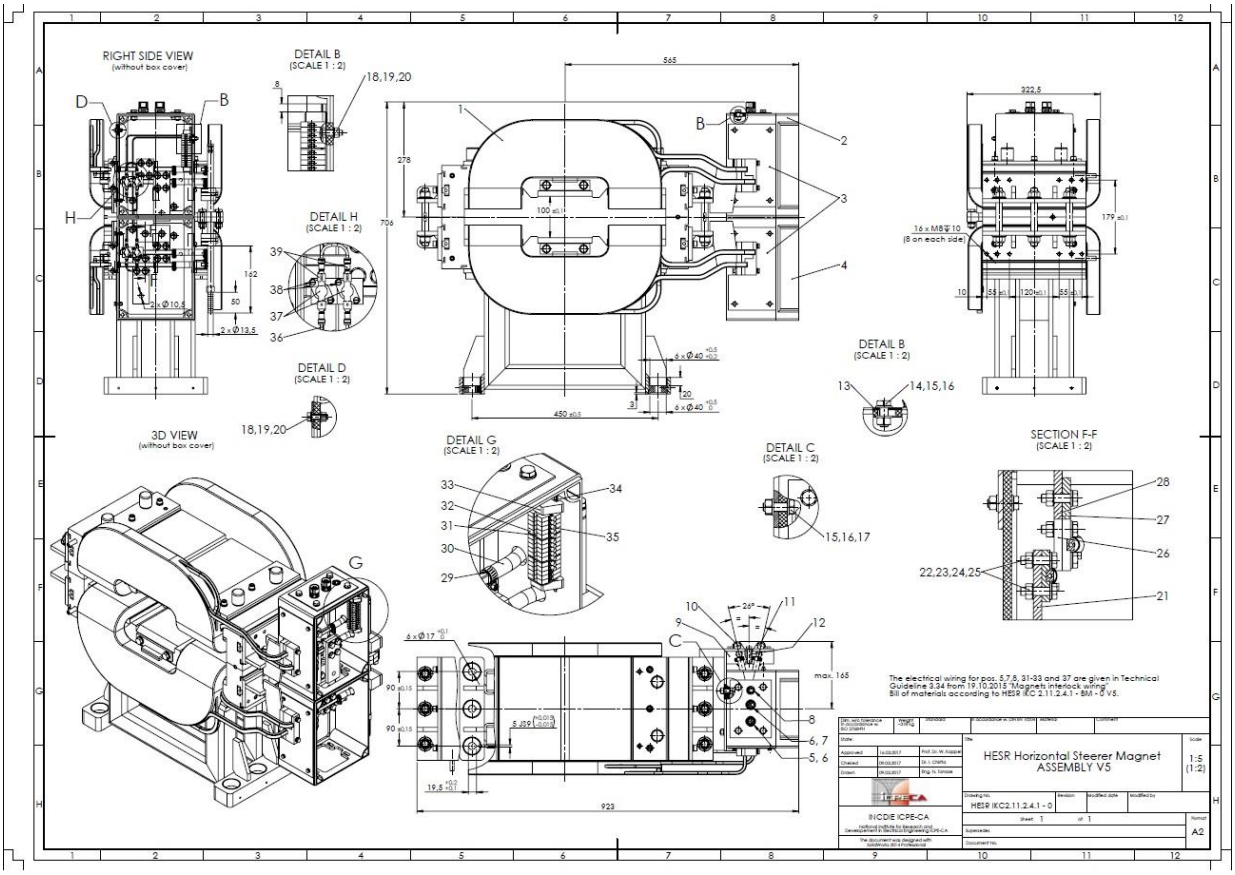


Figura 30. Desenul de execuție al ansamblului electromagnetului steerer orizontal

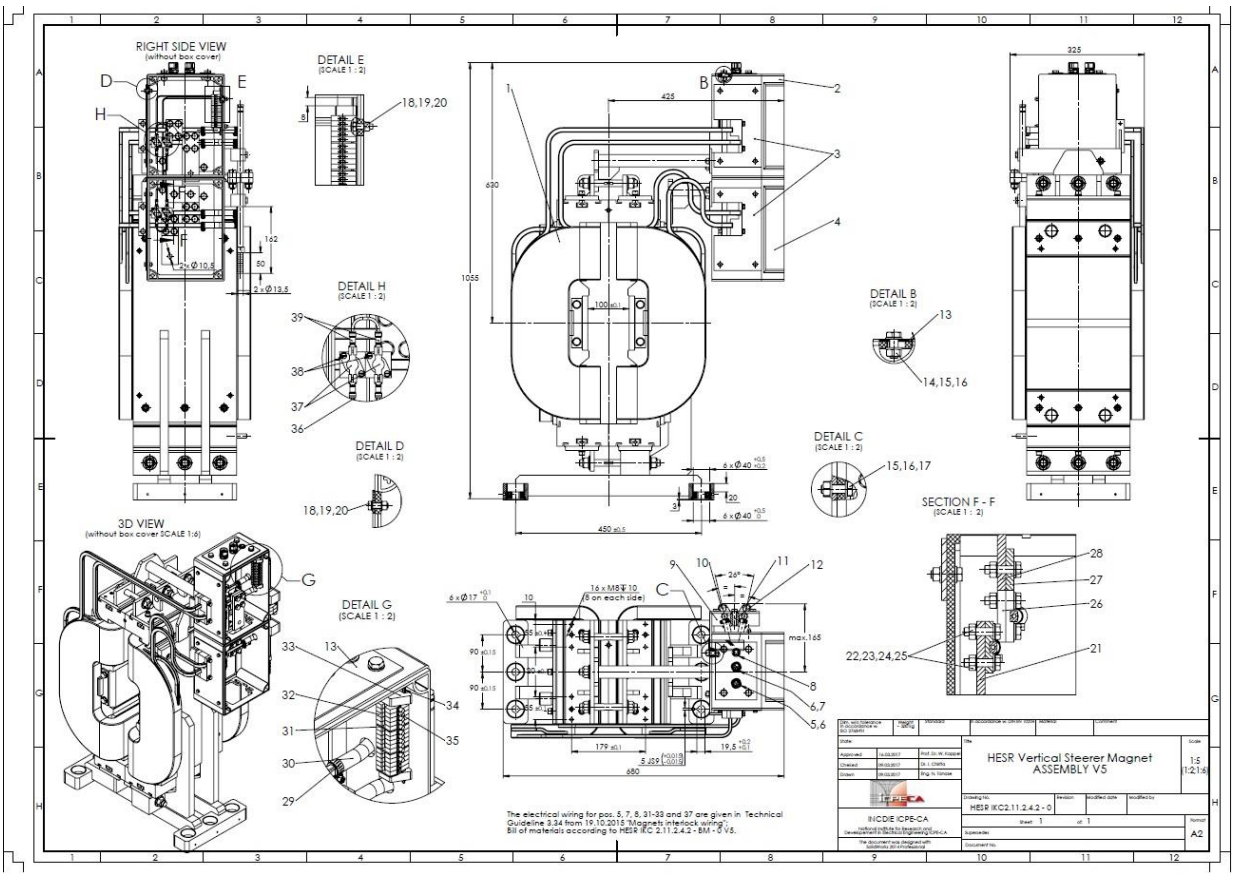


Figura 31. Desenul de execuție al ansamblului al electromagnetului steerer vertical

Au fost realizate desenele de execuție ale tuturor reperelor componente ale electromagneților, repere ce necesită realizarea integrală prin diverse procedee de prelucrare sau necesită efectuarea unor anumite operațiuni de prelucrare mecanică asupra unor semifabricate sau componente standardizate. Documentaţia de execuţie elaborată conţine toate informaţiile tehnice şi tehnologice necesare pentru ca electromagneții care fac obiectul contractului in-kind să fie realizați în conformitate cu cerințele impuse de beneficiar prin specificațiile detaliate ale echipamentelor. Aceste informații includ dimensiunile de gabarit și de montaj ale ansamblelor și subansamblelor electromagneților, toate cotele necesare pentru execuția reperelor componente, toleranţele dimensionale, de formă şi de poziţie, materialele care trebuie utilizate și calitatea suprafețelor reperelor componente. Informațiile din documentația de execuție sunt completate de cele furnizate de tabelele de componență ale desenelor de ansamblu general și de subansamblu, realizate, conform cerințelor contractuale, pe documente separate de desenele de execuție, în format .xls și care conțin informațiile necesare referitoare la reperele componente și anume:

- denumire și număr de desen;
- cantitățile necesare;
- elementele de asamblare şi componentele care trebuie achiziţionate de la producători specializați, cu indicarea tipului și a caracteristicilor acestora, standardul de execuție (unde este cazul), materialul, dimensiunile, producătorul, codul componentei etc.

Documentația de execuție a electromagneților a fost încărcată pe site-ul creat în cadrul serviciului EDMS al CERN pentru proiectul FAIR. Documentația de execuție este sub forma unei arhive cu titlul ”*IKC2.11.2.3: 3D and 2D Drawings for the HESR sextupole and steerer magnets*”, arhiva conținând atât modelele 3D, în format STEP, ale electromagneților, cât și desenele 2D, în format DXF și PDF, conform cerințelor contractuale. De asemenea, arhiva conține tabelele de componență ale documentației, în format XLS și PDF.

Colectivul de lucru creat în cadrul ICPE-CA pentru a desfășura activitățile necesare în vederea îndeplinirii cerințelor contractuale, a procedat la efectuarea unei analize detaliate a echipamentelor care fac obiectul contractului, analiză ce a vizat:

- tehnologia necesară pentru execuția, asamblarea și testarea echipamentelor, pentru a evidenția posibilitățile proprii ale institutului, necesitățile privind subcontractarea, S.D.V.-urile și aparatele de măsură necesare a fi achiziționate și dispozitivele de testare care trebuie proiectate și executate;
- materialele necesare pentru realizarea reperelor ce intră în alcătuirea echipamentelor și componentele standardizate sau fabricate de producători specializați: tipul și calitatea acestora, cantități necesare, potențiali furnizori, condiții de livrare și recepție, teste impuse de beneficiar etc.

Din punct de vedere al **tehnologiei de realizare** a electromagneților care fac obiectul contractului in-kind, au fost identificate următoarele tipuri de procese tehnologice necesare a fi aplicate pentru obținerea componentelor, subansamblelor și a ansamblelor generale:

- electroeroziune cu fir, pentru obținerea unor componente ale suporților electromagneților;
- împachetare tole și consolidare în incinte vidate și termostatate, pentru obținerea pachetelor de tole;
- sudare, pentru asamblarea jugurilor electromagneților și a subansamblelor țevilor de alimentare și evacuare;
- brazare, pentru înserierea bobinelor și pentru montarea pe acestea a plăcilor de conexiune, a plăcuțelor pentru termostate și a racordurilor de legătură cu sistemul de țevi pentru circulația lichidului de răcire;
- bobinare, pentru realizarea bobinelor din conductor de Cu tip țeavă rectangulară, inclusiv izolarea prin bandajare cu fibră de sticlă și prin înglobare în rășină epoxidică;
- diverse procedee de prelucrare mecanică (debitare, strunjire, frezare, găurire, filetare, rectificare etc.);
- lipire, pentru realizarea conexiunilor electrice dintre cablul MYF de 1,5 mm^2 și papucii de cablu și dintre cablul MYF de 1,5 mm^2 și mufele cu 3 și 5 pini;
- asamblare componente.

Analizând procedeele tehnologice menționate și ținând cont de capacitățile limitate ale ICPE-CA în ceea ce privește producția de serie, s-a decis ca subansamblele structurilor mecanice cu bobinaj ale celor trei electromagneți să fie realizate prin colaborare cu un producător cu experiență în domeniu, activitățile legate de realizarea acestor subansamble fiind subcontractate. În acest fel, se evită costurile foarte ridicate presupuse de realizarea unei pregătiri de fabricație care să permită realizarea integrală a tuturor operațiilor de execuție în cadrul institutului, precum și costurile legate de necesitatea angajării și susținerii personalului de producție corespunzător. După o analiză îndelungată, pentru realizarea subansamblelor menționate a fost aleasă ca unitate subcontractoare, SC Nuclear & Vacuum SA Măgurele (N&V), unitate ce deține capabilități de fabricație și expertiză în domeniul fabricației de componente și echipamente utilizate în alte facilități de cercetare din domeniul fizicii atomice și nucleare, precum JINR Dubna, Rusia.

Subansamblele structuri mecanice cu bobinaj sunt apoi preluate de către ICPE-CA, care realizează asamblarea finală a electromagneților și apoi testarea FAT - Factory Acceptance Test a acestora, din punct de vedere mecanic, hidraulic, electric și magnetic, în conformitate cu cerințele impuse de către beneficiarul echipamentelor. De asemenea, ICPE-CA asigură și livrarea, instalarea la locația FAIR și punerea în funcțiune a electromagneților.

Din punct de vedere al **materialelor și componentelor** necesare a fi achiziționate, analiza efectuată a ținut cont de deciziile privind subcontractarea activităților de execuție ale surselor de

alimentare și ale subansamblelor structurilor mecanice cu bobinaj ale electromagneților, urmând ca materialele și componentele necesare pentru realizarea subansamblelor subcontractate să fie achiziționate de către N&V. Totuși, datorită importanței foarte mari a materialelor utilizate la execuția tolelor (oțel electrotehnic cu conținut foarte scăzut de carbon) și la execuția bobinelor (conductor de Cu-OFE, în stare R200), acestea fiind principalele componente care influențează major performanțele finale ale electromagneților, s-a decis ca aceste materiale să fie achiziționate de către ICPE-CA și să fie puse la dispoziția subcontractorului care va executa subansamblele structurilor mecanice cu bobinaj. Ținând cont și de materialele și componentele prevăzute pentru realizarea de către ICPE-CA a ansamblelor generale ale electromagneților, necesarul identificat de materiale și componente este prezentat în **tabelul 2**.

Tabelul 2. Materiale și componente necesare pentru realizarea electromagneților

Nr. crt.	Material sau componentă	Producător recomandat	U.M.	Cantitate
1	Tablă Isovac 1300-100A	Voestalpine GmbH	t	~70
2	Conductor Cu-OFE EN1976, stare R200	Buntmetall Amstteten GmbH	m	13.780
3	Termostat cod R2803EN151033-70±3/60±4	Microtherm	buc.	500
4	Cutii CI23-150	Eaton (Moeller)	buc.	240
5	Priză SAK 4/35 KRG	Weidmuller	buc.	260
6	Clemă EW 35	Weidmuller	buc.	250
7	Capac AP 4-10	Weidmuller	buc.	140
8	Șină profil Ω - 35x7,5	OBO	m	9
9	Conductor cupru MYF - 1,5 mm^2	-	m	300
10	Papuc pentru cablu 1,5mm^2 Cod: 9200560000	Weidmuller	buc.	1.000
11	Papuc pentru cablu 1,5mm^2 Cod: 9019120000	Weidmuller	buc.	500
12	Mufă 5 pini, cod 09-316-30-05	Binder	buc.	125
13	Mufă 3 pini, cod 09-308-30-03	Binder	buc.	125
14	Colier furtun 10-16 W1: 4205	Erich Schlemper IDEAL	buc.	1.000
15	Furtun DESY/HERA 8/86 Ø Ø interior 6 mm, grosime 4mm Cauciuc EPDM cu inserție de Kevlar	J. Meinert GMBH	m	50
16	Țeavă Ø14x2 – oțel inox nemagnetic	furnizori interni	m	90
17	Bară pătrată 30 – oțel inox nemagnetic	furnizori interni	m	42
18	Bară Ø80 - oțel inox nemagnetic	furnizori interni	m	12
19	Bară Ø15 - oțel inox nemagnetic	furnizori interni	m	6
20	Bară Ø8 - oțel inox nemagnetic	furnizori interni	m	18
21	Bară hex. 17 - oțel inox nemagnetic	furnizori interni	m	18
22	Placă textolit gros. 2 mm	furnizori interni	m^2	66
23	Platbandă cupru gros.8mm, lat. 40 mm	furnizori interni	m	80
24	Șurub M5x16 ISO 4017 - oțel inox nemagnetic	furnizori interni	buc.	1.500

Tabelul 2 (continuare)

25	Piuliță M5 DIN 934 – oțel inox nemagnetic	furnizori interni	buc.	1.500
26	Șaibă plată A5 DIN 125 – oțel inox nemagnetic	furnizori interni	buc.	3.000
27	Șurub M8x25 ISO 4017 – oțel inox nemagnetic	furnizori interni	buc.	500
28	Șaibă plată A8 DIN 125 – oțel inox nemagnetic	furnizori interni	buc.	1.000
29	Piuliță M8 DIN 934 – oțel inox nemagnetic	furnizori interni	buc.	500
30	Șurub M8x1x30 ISO 8676 – alamă	furnizori interni	buc.	2.100
31	Piuliță M8x1 DIN ISO 8673 –alamă	furnizori interni	buc.	2.100
32	Șaibă dințată A8 DIN 6797 – alamă	furnizori interni	buc.	2.100
33	Șaibă plată A8 DIN 125 – alamă	furnizori interni	buc.	2.100
34	Șurub M3x6 ISO 1207 – alamă	furnizori interni	buc.	1.000
35	Șurub M8x35 ISO 4017 – oțel inox nemagnetic	furnizori interni	buc.	750
36	Șurub M8x16 ISO 4017 – oțel inox nemagnetic	furnizori interni	buc.	260
37	Șurub M10x40 ISO 4017 – oțel inox nemagnetic	furnizori interni	buc.	500
38	Piuliță M10 DIN 934 – oțel inox nemagnetic	furnizori interni	buc.	500
39	Șaibă plată A10 DIN 125 – oțel inox nemagnetic	furnizori interni	buc.	500
40	Șaibă Grower N10 DIN 127 - oțel inox nemagnetic	furnizori interni	buc.	500

Pentru toate materialele și componentele din **tabelul 2** au fost demarate și finalizate procedurile de achiziție. Pentru **tabla pentru execuția tolelor** au fost derulate numeroase etape de negocieri și discuții, incluzând vizite ale reprezentanților furnizorului la sediul ICPE-CA, dar și vizite ale personalului și conducerii ICPE-CA la sediul furnizorului, pentru a inspecta facilitățile de producție ale acestuia și pentru a corela condițiile deosebite de livrare cu tehnologia de lucru a furnizorului și au fost efectuate o serie de teste magnetice, electrice și privind comportamentul la lipirea tolelor. După clarificarea condițiilor tehnice și economice de execuție și de livrare, a fost întocmit și semnat contractul de furnizare dintre Voestalpine Steel Service Center Romania S.R.L. și INCDIE ICPE-CA.

Și pentru **conductorul de cupru pentru execuția bobinelor** au fost derulate numeroase etape de negocieri și discuții, incluzând vizite ale reprezentanților furnizorului din Austria la sediul ICPE-CA și au fost efectuate o serie de teste. După clarificarea condițiilor tehnice și economice de execuție și de livrare, a fost întocmit și semnat contractul de furnizare dintre Buntmetall Amstteten GmbH, Austria și INCDIE ICPE-CA, materialul fiind livrat la sediul N&V.

Toate celelalte materiale și componente de la poz. 3 – 40 din tabelul 2, au fost achiziționate de la producătorii recomandați de către beneficiarul german sau de la furnizori specializați (pentru elementele de asamblare și pentru materialele feroase și neferoase).

Din punct de vedere al **dispozitivelor și aparatelor necesare pentru execuția și testarea echipamentelor** care fac obiectul contribuției in-kind, analiza efectuată în cadrul ICPE-CA a relevat aspectele prezentate în continuare. În conformitate cu specificațiile tehnice impuse de beneficiarul echipamentelor, materialul din care se vor executa tolele electromagneților sextupol și steerer trebuie să fie supus următoarelor teste:

a) grosimea stratului izolator depus pe ambele fețe ale tablei (6±1 μm);
b) rezistența de izolație dintre două tole, înainte și după lipire, sub o presiune de 250 N/cm^2;
c) curba de magnetizare B = f(H), conform datelor din **Fig. 32**;

d) forța coercitivă la o excitație de 25 kA/m, care trebuie să fie de max. 70 A/m;
e) anizotropia inducției magnetice (max. 5%, în domeniul de peste 1 kA/m).

Dintre acestea, testele de la puctele a, c, d și e s-au putut efectua cu dotări existente în cadrul ICPE-CA, nefiind necesar să se execute sau achiziționeze alte dispozitive sau aparate.

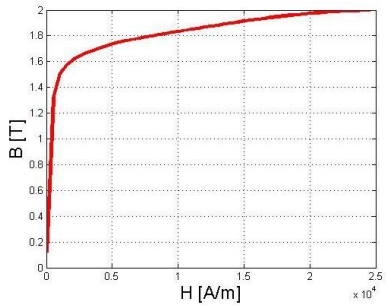
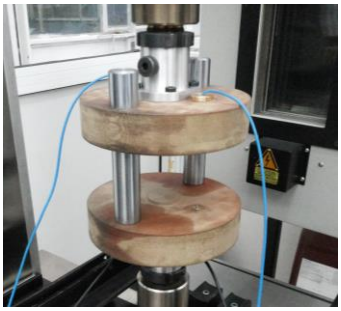
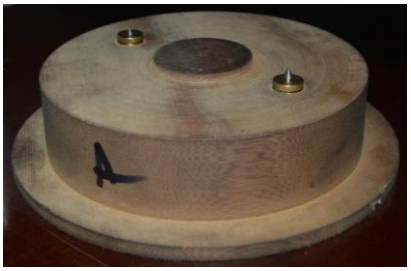


Figura 32. Curba de magnetizare impusă pentru materialul tolelor electromagneților

Pentru testul de la punctul b, **determinarea rezistenței de izolație dintre tole**, a fost necesar să se aplice metoda prevăzută de standardul ASTM A937/A937M - 12, Standard Test Method for Determining Interlaminar Resistance of Insulating Coatings Using Two Adjacent Test Surfaces. Aplicarea acestei metode a impus realizarea unui dispozitiv specific, funcționarea și structura acestuia fiind, de asemenea, specificate în standardul menționat. A fost realizată proiectarea dispozitivului, iar pe baza proiectului elaborat s-a trecut la execuția dispozitivului, toate elementele componente ale acestuia și ale schemei de măsurare (aparate de măsură, sursa de curent constant etc.) fiind realizate în cadrul ICPE-CA sau existând în dotarea institutului. În **Fig. 33,a** este prezentată vederea de ansamblu a dispozitivului, iar în **Fig. 33,b** este prezentat un detaliu cu sondele de contact de pe capul de presare inferior.





a) Vedere de ansamblu **b) Detaliu cu sondele de contact**

Figura 33. Dispozitivul pentru verificarea rezistenței de izolație dintre tole

Pentru aplicarea metodei de testare a fost creat un stand compus din:
- dispozitivul pentru aplicarea presiunii între probe (**Fig. 33**);
- un dispozitiv pentru lipirea probelor, conceput și realizat în cadrul ICPE-CA;
- o sursă programabilă, model Hameg HM8143, ca sursă de alimentare cu curent constant;
- un multimetru, model Tektronix DMM4050, ca voltmetru pentru măsurarea tensiunii între electrozii dispozitivului de aplicare a presiunii;
- un multimetru Fluke 8846A, ca ampermetru pentru măsurarea curentului aplicat;
- o cameră climatică, model VC4018, producător Votsch Industrietechnik, ca echipament pentru aplicarea temperaturii pentru lipirea probelor.

- o mașină de testat la tracțiune și compresiune, model CH-8224 Lohringen, tip LFM-30 kN, producător Walter + Bai AG, ca echipament pentru aplicarea presiunii impuse, înainte și după lipire;

Standul creat pentru determinarea rezistenței de izolație a materialului pentru tolele electromagneților este prezentat în **Fig. 34**.

Figura 34. Standul pentru determinarea rezistenței de izolație a materialului pentru tolele electromagneților

Pentru **măsuratorile magnetice de la punctele c, d și e**, au fost prelevate 14 toruri cu dimensiunile: D_{int}=32 mm, D_{ext}=40 mm și înălțime h=4 mm. Aceste probe au fost realizate prin debitare prin electroroziune cu fir din fiecare tablă debitată de către VOESTALPINE Steel Service Center România. Pentru a simula tensiunile intoduse de roluirea tablei, pentru jumatate dintre probe s-a procedat la roluirea și apoi la îndreptarea lor. Măsuratorile magnetice au fost efectuate atât pe toruri folosind etajul PS1010-C produs de WALKER SCIENTIFIC, cât și pe tolă, utilizând un dispozitiv unitolă de la Brockaus Messtecnik. Torurile au fost utilizate pentru evaluarea primei curbe de magnetizare, iar dispozitivul unitolă a fost utilizat pentru evaluarea câmpului coercitiv și al anizotropiei. Media măsuratorilor a relevat o valoare a câmpului coercitiv de 69 A/m, iar anizotropia s-a ridicat la valoarea de 4,6%. Procedura pentru măsurarea proprietăților magnetice a eșantioanelor sub formă de toruri a fost următoarea:

- S-a măsurat cu șublerul diametrul exterior (D_e) și diametrul interior (D_i), s-a calculat diametrul mediu (D_m) si apoi lungimea medie $l_m=\pi D_m$.
- S-a măsurat grosimea tolelor, numărul de tole ales fiind la latitudinea experimentatorului; pentru ușurință se alege ca acesta să fie egal cu 4 buc.
- S-a măsurat înălțimea (h_{mas}) pachetului rezultat, aceasta s-a comparat cu înălțimea calculată (h_{calc}) (nr buc. * grosimea unei tole).
- S-a calculat aria magnetică măsurată (A_m), ca fiind egală cu $A_m=((D_e-D_i)/2)*h_{mas}$.
- S-a calculat aria magnetică reală (A_{mr}), ca fiind egală cu $A_{mr}=((D_e-D_i)/2)*h_{calc}$.
- S-a stabilit constanta de corecție a măsurătorilor (δ) ca find egala cu $\delta= A_m/ A_{mr}$.
- Astfel se obtin valorile $B_{real}= B_{mas}/ \delta.\delta$
- S-a stabilit valoarea maximă a lui B, în cazul nostru $B_{max}= 2*10^4$ Gs.
- S-a stabilit astfel fluxul maxim $\varphi_{max}=N_s*A_m*B_{max}$ (M_x*sp) unde N_s este numărul de spire din secundar (de regula 100).
- Din valoarea fluxului maxim s-a stabilit constanta de aparat k, respectiv factorul de multiplicare M, considerand ca φmax=k*M.
- S-a stabilit valoarea câmpului magnetic aplicat maxim H_{max}, în cazul nostru aceasta fiind de 25.000 A/m (=312,5 Oe).

- S-a stabilit numărul de spire din primar (N_p), utilizând relația: $H_{max}*l_m=N_p*I_{max}$ unde I_{max} este curentul maxim aplicat.
- S-au notat toate datele calculate.
- S-au introdus toate datele necesare: l_m, k, M.
- S-au făcut reglările de cală, nivel de control, reglarea la zero a tensiunii de echilibrare, confirmarea acesteia.
- S-au conectat firele de secundar la SEC.
- S-a reglat scala B a fluxmetrului.
- S-a reglat înregistratorul folosind reglarea la jumătate a lui B si H (500/1000) de pe decadele de măsură, daca bucla este centrată la zero B și H.
- S-a pus forma de undă (wave form) în poziția MAN.
- S-a rotit Manual Control până la capăt în sensul acelor de ceasormic.
- Cu butonul instrumentului în poziția H, s-a mărit nivelul de comandă (Drive Level) până când se obține valoarea maximă a lui H, notându-se această poziție.
- S-a pus WaveForm pe poziția OFF.
- S-a apasat butonul AC/DC în poziția neagră și s-a reglat controlul manual la indicația zero, reglaj ce se face cu mare atenție.
- S-a reglat controlul frecvenței la frecvența de demagnetizare dorită (5-20 Hz pentru ferite si plăci subțiri și valori mai mici pentru materiale magnetic foarte moi).
- S-a conectat butonul formei de undă pe poziția sinus sau triunghiular.
- S-a pus butonul AC/DC în poziția neagră.
- S-a rotit controlul nivelului de excitare DRIVE LEVEL până la maximum în sensul acelor de ceasornic, apoi încet s-a redus la zero.
- Cu controlul formei de undă în poziția off și AC/DC în poziția galben, s-a reglat controlul frecvenței la valoarea dorită (0,01 Hz la materialele magnetic foarte moi).
- S-a pus nivelul de comandă Drive Level la valoarea notată anterior (pozitia 10.22).
- S-a verificat și controlat abaterea fluxmetrului prin butoanele zero și Reset.
- S-a restabilit fluxmetrul prin Reset, apoi s-a așezat jos acul înregistratorului.
- S-a rotit butonul formei de undă sinusoidală sau triunghiulară după dorință și s-a înregistrat bucla B(H).

Pentru **determinarea scurtcircuitului între spirele bobinelor electromagneților**, test efectuat prin metoda transformatorului, la o tensiune aplicată pe spiră de min. 20 V_{eff}, a fost conceput și realizat un dispozitiv a cărui schemă este prezentată în **Fig. 35**. Conform acestei scheme, bobina de testat se montează în secundarul transformatorului. Dispozitivul de încercat este realizat astfel încât să se alimenteze în primar cu o tensiune care să asigure peste 20 V_{eff} pe spiră. Acestă caracteristică se reflectă asupra înfășurării secundare, oricare ar fi ea.

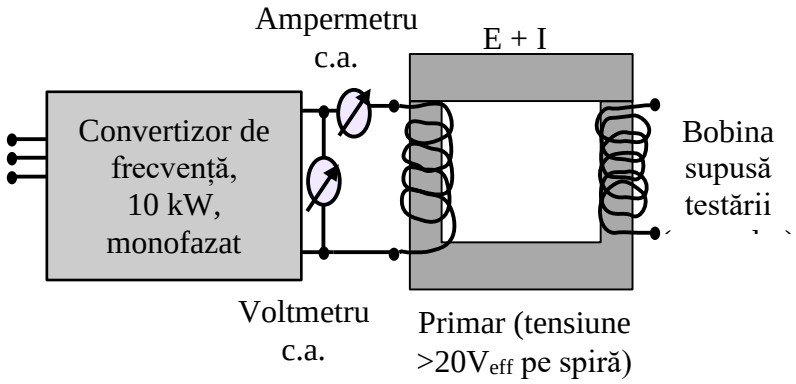


Figura 35. Schema de test pentru determinarea scurtcircuitului în bobine

Transformatorul este de tip uscat, cu miezul prins într-un jug cu partea superioară detașabilă (E+I), pentru a permite schimbarea bobinei de încercat. În circuitul primar se înseriază un ampermetru de c.a. pentru măsurarea curentului de mers în gol și un voltmetru de c.a pentru monitorizarea tensiunii. Încercarea se bazează pe faptul că acest curent de mers în gol este constant (cu o variație maximă de 2%). În mod normal, când în circuitul secundar este montată o înfășurare de încercat care are capetele în gol, curentul din circuitul primar nu variază semnificativ față de situația în care nu avem bobină în secundar. Dacă se determină o creștere a curentului cu peste 2% rezultă că bobina de incercat prezintă un scurtcircuit net sau un defect de izolație.

Miezul magnetic al transformatorului este în coloană, adaptat astfel încat să permită testarea ambelor tipuri de bobine, cea cu 15 spire care se montează pe electromagnetul de tip sextupol și cea cu 44 spire care se montează pe electromagnetul de tip steerer.

Principalii parametri ai transformatorului sunt:

- U_i = 23...230 V, sinusoidal;
- f = 30... 300 Hz,
- U_{sp} = 25 V/spiră;
- S = 8 kVA.

Pentru alimentarea la tensiune și frecvență variabilă s-a selectat un convertizor de frecvență cu următoarele caracteristici:

- convertizor reglabil în plaja 25-300 Hz;
- P = min. 10 kW;
- tensiune de alimentare: c.a. trifazat;
- tensiune de ieșire: c.a. monofazat (220 V_{ef}) reglabilă.

Dispozitivul a fost realizat în colaborare cu societatea SC ICPE SAERP SA, București, o imagine cu acest dispozitiv fiind prezentată în **Fig. 36**.

Figura 36. Dispozitivul pentru determinarea scurtcircuitului în bobine

Așa cum s-a menționat, bobinele electromagneților sunt realizate din țeavă de cupru cu secțiune rectangulară 10,6 x 7 mm și orificiu pentru curgerea lichidului de răcire cu diametrul de 4 mm, izolată cu bandă din fibră de sticlă (grosime strat 0,5 mm). După formarea bobinelor, acestea se înglobează într-o rășină epoxidică transparentă și rezistentă la radiații, grosimea stratului de rășină fiind de 1 mm față de întreg conturul exterior al bobinelor. **Verificarea bobinelor electromagneților din punct de vedere al rezistenței de izolație** se face, conform specificațiilor tehnice impuse de beneficiarul echipamentelor, în următoarele condiții de test:

- după imersare timp de 6 ore în apă, prin aplicarea unei tensiuni de 2 kV DC;
- după imersare timp de 6 ore în apă, prin aplicarea unei tensiuni de 7 kV AC.

În ambele situații rezistența de izolație trebuie să fie mai mare de 100 MΩ.

Pentru testare se utilizează o sursă de înaltă tensiune capabilă să aplice tensiunea continuă sau alternativă impusă. Pentru imersarea bobinelor în apă a fost concepută și realizată o cuvă adaptată geometriei bobinelor supuse testări, prezentată în **Fig. 37**.

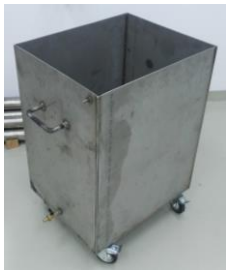


Figura 37. Cuva pentru imersarea bobinelor

Având în vedere precizia dimensională deosebit de ridicată care trebuie asigurată la execuția și asamblarea structurii mecanice a electromagneților care fac obiectul contractului in-kind, precum și complexitatea și diversitatea verificărilor de toleranțe dimensionale, de formă și de poziție care trebuie efectuate pentru a determina conformitatea echipamentelor cu specificațiile beneficiarului, pentru a elimina necesitatea achiziționării unui număr mare de mijloace de măsură și necesitatea conceperii și realizării unui număr mare de dispozitive specifice, s-a decis achiziția unei **mașini de măsurat în coordonate**, echipament capabil să efectueze, în condiții de precizie extrem de ridicată (de ordinul a 5 ... 10 μm), toate verificările prevăzute în documentația de execuție a electromagneților.

Un alt avantaj major al achiziționării unei astfel de mașini este reprezentat de faptul că este utilizată și în procesul de testare magnetică, procesul de aliniere al electromagneților cu dispozitivul de măsurare cu sondă Hall utilizat pentru caracterizarea câmpului magnetic creat în apertura electromagneților, efectuându-se, de asemenea, foarte precis, cu ajutorul acestei mașini.

Mașina de măsurat în coordonate este model WENZEL XOrbit 87, a fost achiziționată de la firma RO-MEGA TRADE S.R.L. și are următoarele caracteristici principale:

- domeniul de măsurare: 800 x 1.500 x 700 mm;
- masa maximă a piesei de măsurat: 800 kg;
- rezoluția: 0,1 μm;
- precizia de măsurare: 2,4 + L / 300 μm.

În **Fig. 38** este prezentată o poză a mașinii de măsurat în coordonate, după instalarea acesteia în spațiul special destinat și amenajat în acest scop.

Figura 38. Mașina de măsurat în coordonate XOrbit 87-1500 Next Generation

Având în vedere că cea mai importantă componentă a testării electromagneților o reprezintă testarea magnetică a acestora, a fost necesar să se conceapă și să se realizeze un stand de testare dedicat și să se stabilească și elaboreze procedurile de testare corespunzătoare cu specificațiile tehnice impuse electromagneților. Analiza acestor specificații a condus la necesitatea ca testarea magnetică a electromagneților să se realizeze prin efectuarea de măsurători ale inducției magnetice în numeroase puncte aflate în diverse poziții din interiorul aperturii electromagneților și apoi prelucrarea acestor măsurători pentru a putea obține parametri și curbe care să caracterizeze complet comportamentul fasciculului de particule în funcționarea reală. De aceea, pentru efectuarea măsurătorilor a fost conceput un stand care să permită poziționarea controlată a unei sonde Hall 3D în interiorul aperturii electromagneților, precum și achiziția datelor măsurate și apoi prelucrarea acestora.

Standul de testare este compus din următoarele echipamente principale:

- electromagnetul propriu-zis;
- sursa de alimentare a electromagnetului;
- gaussmetru cu sondă Hall 3D;
- dispozitivul de poziționare a sondei;
- multimetru digital pentru măsurarea curentului;
- interfața pentru comunicarea între gaussmetru și sistemul de comandă și achiziție de date;
- sistem de calcul pentru introducerea comenzilor și salvarea datelor măsurate.

Sursa de alimentare a electromagnetului are urmatoarele caracteristici:

- alimentare: 400 V, trifazat, 50 Hz;
- tensiune ieșire: ±45 V;
- curent ieșire: ±350 A;
- panta curentului: ±20 A/s;
- stabilitatea, repetabilitatea și riplul max. de curent: 10^{-4} x curentul maxim.

Sistemul de măsurare, prezentat în **Fig. 39**, permite poziționarea unei sonde Hall în coordonate carteziene XYZ, rotația sondei în jurul axei sale, măsurarea componentelor B_x, B_y și B_z ale câmpului magnetic în punctele în care sonda este poziționată, achiziția datelor măsurate și prelucrarea acestora. Poziționarea sondei se realizează cu ajutorul a trei actuatori liniari, prevăzuți cu mecanism șurub/piuliță cu bile și având repetabilitatea de poziționare de ±0,02 mm.

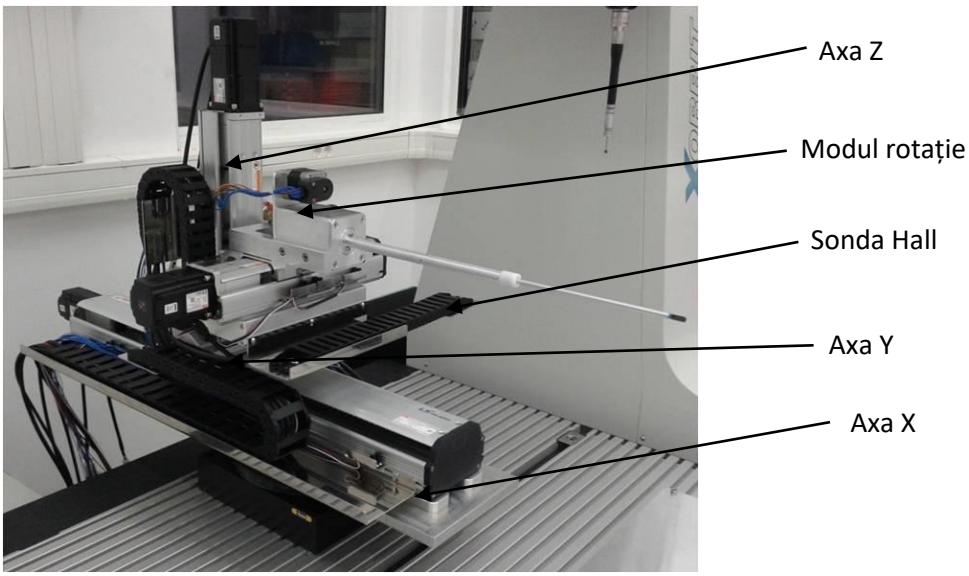


Figura 39. Sistemul de măsurare cu sondă Hall

Pentru axa X se utilizează un actuator liniar seria MS126, lungime cursă 600 mm, sarcina maximă pe orizontală 50 kgf. Acționarea se face cu un servomotor 200 W / 3000 rpm / 0,64 Nm, echipat cu un encoder paralel 2500 pps. Pentru axa Y se utilizează un actuator liniar seria MS092, lungime cursă 100 mm, sarcina maximă pe orizontală 23 kgf. Acționarea se face cu un servomotor 100 W / 3000 rpm / 0,32 Nm, echipat cu un encoder paralel 2500 pps. Pentru axa Z se utilizează un actuator liniar seria MS092, lungime cursă 100 mm, sarcina maximă pe verticală7 kgf. Acționarea se face cu un servomotor 100 W / 3000 rpm / 0,32 Nm, echipat cu un encoder paralel 2500 pps și frână. Rotația sondei se realizează cu ajutorul unui motor electric pas cu pas HT17-275 și a unui mecanism de transmisie cu curea dințată, unghiul de rotație fiind de ±180°.

Sonda Hall utilizată pentru culegerea valorilor de câmp magnetic din spațiul investigat este o sondă Lake Shore cu 3 axe, cu lungimea de 460 mm, prezentată în **Fig. 40**.

Figura 40. Sonda Hall 3D utilizată pentru testarea magnetică

Pentru măsurarea inducției magnetice din întrefierul electromagnetului supus testării se utilizează un aparat de tip Gaussmetru cu 3 canale, model Lakeshore 460, prezentat în **Fig. 41**, care permite măsurarea simultană pe 3 axe a inducției magnetice și afișarea atât a valorilor pe cele 3 axe, cât și a modulului vectorului inducție magnetică totală. Domeniul de măsurare este cuprins între 300 mGs și 300 kGs. Rezoluția de măsurare este de 0,01 mGs, iar precizia de până la 0,1% din valoarea masurată.

Figura 41. Gaussmetru LakeShore 460

Pentru controlul și comanda sistemului și pentru stocarea valorilor măsurate se folosește un sistem de calcul G771 produs de Asus, cu sistem de operare Microsoft Windows 7 Professional SP1 64 bit. Comunicarea cu gaussmetrul se realizează prin intermediul controlerului GPIB NI GPIB-USB-HS+, cu software NI-488.2. Pentru transmiterea și achiziția semnalelor analogige și digitale se utilizează o placă de achiziție NI USB-6281, cu 16SE/8DI intrări analogice – 18 bits rezoluție și 625kS/s rată de achiziție, 2 ieșiri analogice cu 16 bits rezoluție și 24 intrări/iesiri digitale. Pachetul software este programat folosind mediul de programare specializat pentru achiziție de date LabWindows/CVI 2010.

În **Fig. 42** este prezentat sistemul de măsurare instalat, împreună cu un electromagnet de tip sextupol, pe masa mașinii de măsurat în coordonate.

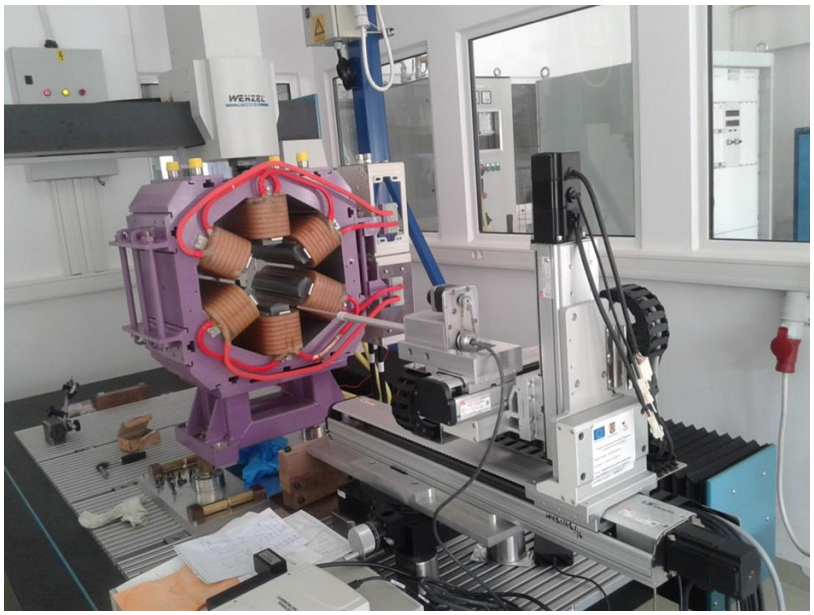


Figura 42. Testare magnetică electromagnet sextupol

Pe baza documentației de execuție elaborată de ICPE-CA și transmisă către N&V a trecut la **concepția și execuția ștanțelor necesare pentru execuția tolelor electromagneților sextupol și steerer**. După execuția ștanțelor și a unor tole (prezentate în **Fig. 43** pentru electromagnetul sextupol și în **Fig. 44** pentru electromagneții steerer), au fost efectuate măsurători complexe, atât de către N&V (prin firma Omedec, Franta), cât și FZJ (prin firma Zeiss Calypso) și de către ICPE-CA. Rezultatele măsurătorilor sunt prezentate în **Fig. 45** pentru firma Omedec, în **Fig. 46** pentru firma Zeiss Calypso și în **Fig. 47** pentru ICPE-CA și au atestat conformitatea execuției tolelor.

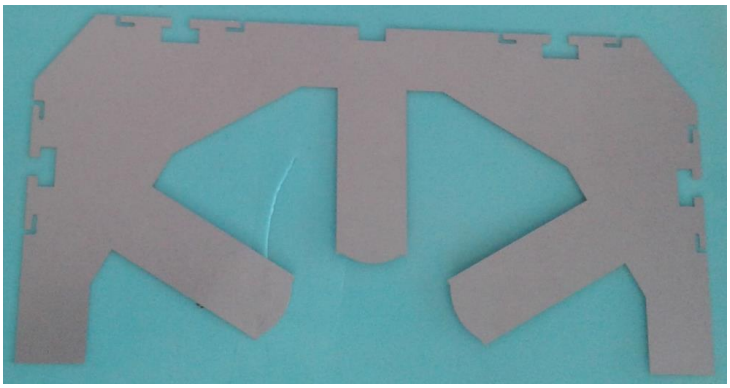


Figura 43. Tolă ștanțată electromagnet sextupol

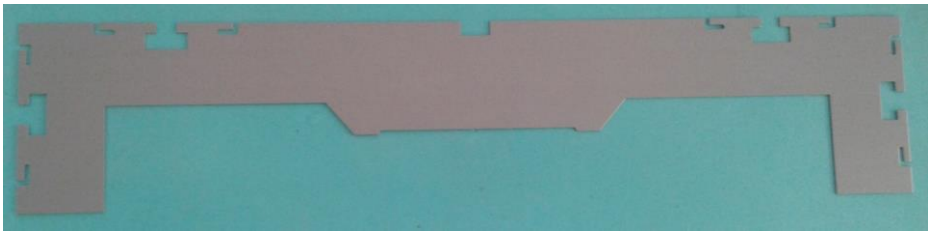


Figura 44. Tolă ștanțată electromagnet steerer

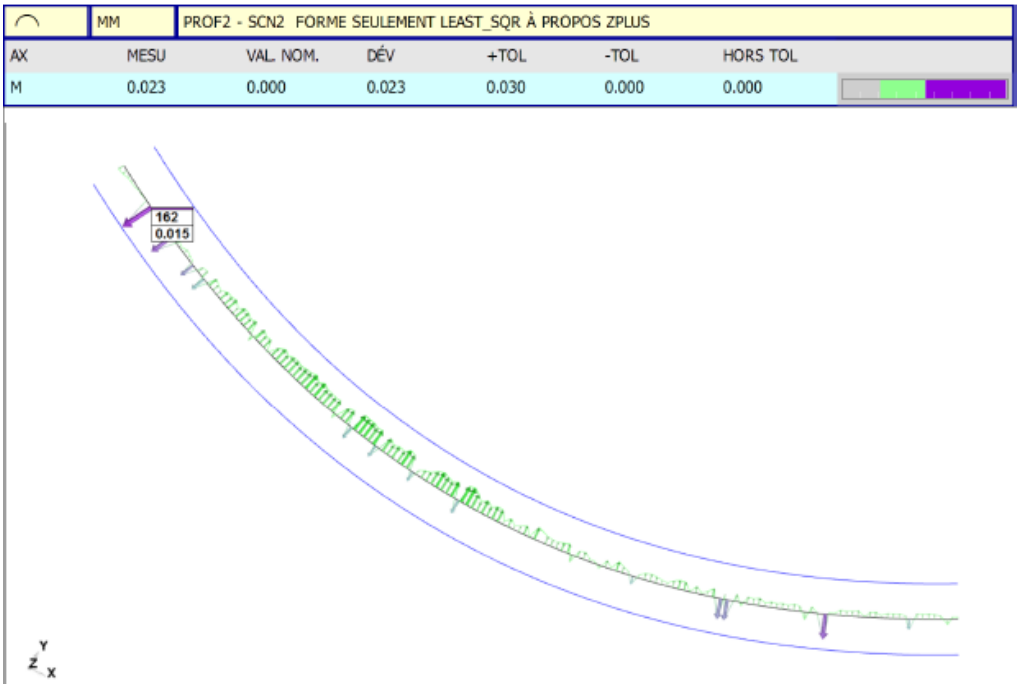


Figura 45. Măsurători tolă efectuate de Omedec Decoupage, Franța

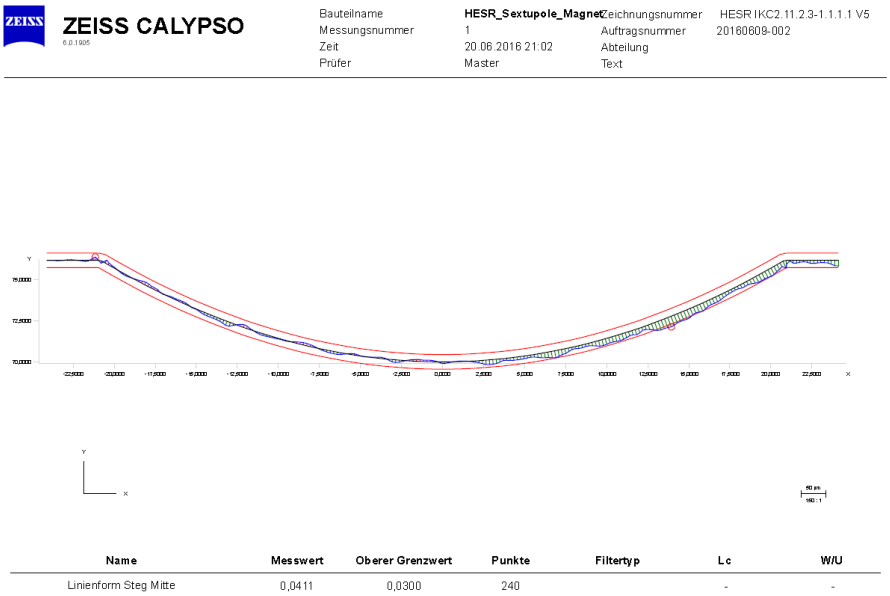


Figura 46. Măsurători tolă efectuate de Zeiss Caypso, Germania

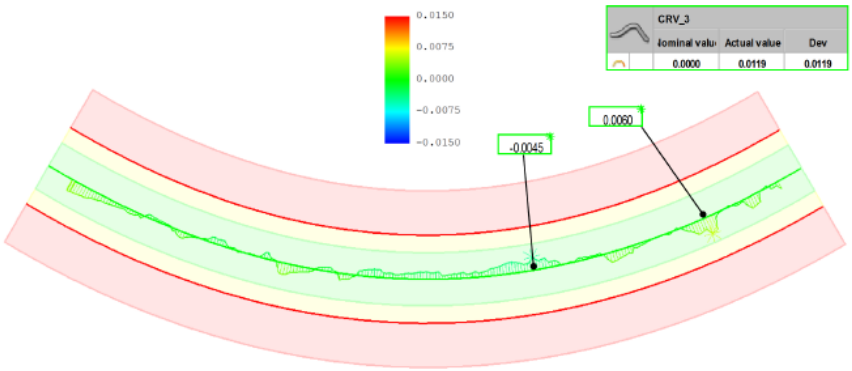


Figura 47. Măsurători tolă efectuate de ICPE-CA

S-a procedat apoi la realizarea unor pachete de tole, precum cel prezentat în figura 6, operație ce a necesitat conceperea și realizarea unor **dispozitive de împachetare** adecvate. Pachetele de tole realizate (**Fig. 48** și **Fig. 49**) au fost și ele supuse unui program extins de măsurători mecanice.

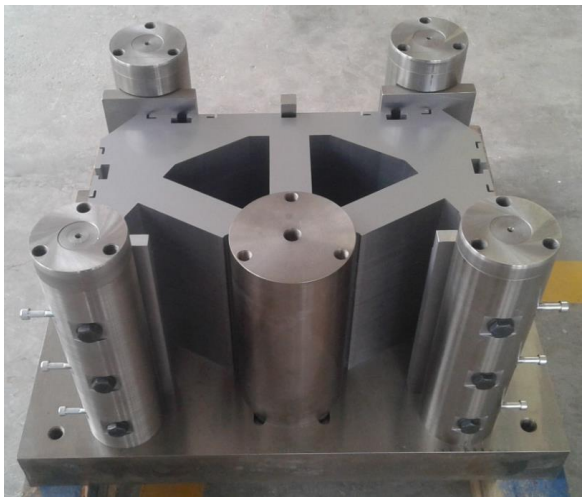


Figura 48. Pachet tole electromagnet sextupol cu dispozitiv de împachetare

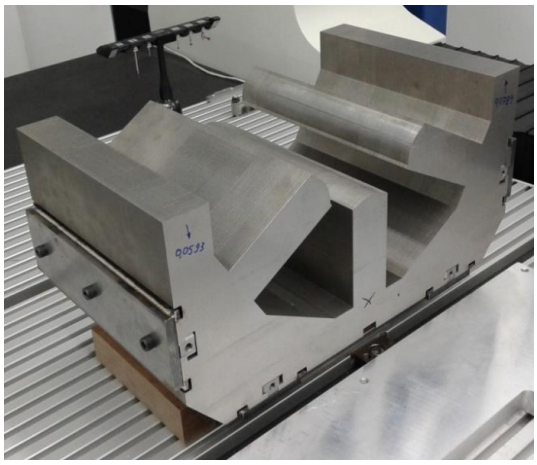


Figura 49. Pachet tole electromagnet sextupol pe masa mașinii de măsurat în coordonate

Pentru a putea clarifica toate aspectele legate de activitățile care trebuie desfășurate în cadrul contractului referitor la contribuția in-kind la proiectul FAIR, asigurând astfel o pregătire completă a fabricației echipamentelor care fac obiectul contractului, a fost necesar, ca pe lângă documentația de execuție a produselor și a S.D.V.-urilor identificate ca fiind necesare pentru execuție, asamblare și testare, să se conceapă și eleboreze și procedurile de lucru pentru execuția, asamblarea și testarea echipamentelor. Aceste proceduri conțin informații referitoare la:

- domeniul de aplicare;
- documentele de referință care reglementează aplicarea procedurii;
- resposabilitățile personalului implicat în aplicarea procedurii;
- lista echipamentelor necesare (scule, dispozitive, utilaje, aparate de măsură etc.);
- modul efectiv de lucru;
- înregistrările de calitate care atestă conformitatea produselor (fișele de măsurători, în cazul procedurilor de testare).

Pe baza documentației de execuție și a specificațiilor tehnice referitoare la condițiile impuse pentru realizarea și testarea electromagneților, au fost elaborate următoarele proceduri:

1. Procedură pentru determinarea proprietăților magnetice ale tolelor din oțel pentru construcția electromagneților FAIR, utilizând dispozitivul unitolă.
2. Procedură pentru determinarea proprietăților magnetice ale tolelor din oțel pentru construcția electromagneților FAIR, utilizând metoda torului.
3. Procedură pentru determinarea rezistenței interlaminare de izolație folosind două suprafețe adiacente de testare.
4. Procedură pentru măsurarea dimensiunilor HESR Sextupole Magnet Assembly.
5. Procedură pentru măsurarea dimensiunilor HESR Sextupole Magnet Mechanical Structure with Windings.
6. Procedură pentru măsurarea dimensiunilor HESR Sextupole Magnet Mechanical Structure.
7. Procedură pentru măsurarea dimensiunilor HESR Sextupole Magnet Lower Yoke.
8. Procedură pentru măsurarea dimensiunilor HESR Sextupole Magnet Upper Yoke.
9. Procedură pentru măsurarea dimensiunilor HESR Sextupole Magnet Coil no. 1.
10. Procedură pentru măsurarea dimensiunilor HESR Sextupole Magnet Coil no. 2.
11. Procedură pentru măsurarea dimensiunilor HESR Sextupole Magnet Coil no. 3.
12. Procedură pentru măsurarea dimensiunilor HESR Sextupole Magnet Coil no. 4.
13. Procedură pentru măsurarea dimensiunilor HESR Sextupole Magnet Coil no. 5.
14. Procedură pentru măsurarea dimensiunilor HESR Sextupole Magnet Coil no. 6.
15. Procedură pentru măsurarea dimensiunilor HESR Sextupole Magnet Pipe for Water Outlet Subassembly.
16. Procedură pentru măsurarea dimensiunilor HESR Sextupole Magnet Pipe for Water Inlet Subassembly.
17. Procedură pentru realizarea HESR Sextupole Magnet Assembly.
18. Procedură pentru realizarea HESR Sextupole Magnet Mechanical Structure with Windings.
19. Procedură pentru realizarea HESR Sextupole Magnet Mechanical Structure.
20. Procedură pentru realizarea HESR Sextupole Magnet Lower Yoke.
21. Procedură pentru realizarea HESR Sextupole Magnet Upper Yoke.
22. Procedură pentru realizarea HESR Sextupole Magnet Coil no. 1.
23. Procedură pentru realizarea HESR Sextupole Magnet Coil no. 2.
24. Procedură pentru realizarea HESR Sextupole Magnet Coil no. 3.
25. Procedură pentru realizarea HESR Sextupole Magnet Coil no. 4.
26. Procedură pentru realizarea HESR Sextupole Magnet Coil no. 5.
27. Procedură pentru realizarea HESR Sextupole Magnet Coil no. 6.
28. Procedură pentru realizarea HESR Sextupole Magnet Pipe for Water Outlet Subassembly.
29. Procedură pentru realizarea HESR Sextupole Magnet Pipe for Water Inlet Subassembly.
30. Procedură pentru măsurarea dimensiunilor HESR Horizontal Steerer Magnet Assembly.
31. Procedură pentru măsurarea dimensiunilor HESR Horizontal Steerer Magnet Mechanical Structure with Windings.
32. Procedură pentru măsurarea dimensiunilor HESR Horizontal Steerer Magnet Mechanical Structure.
33. Procedură pentru măsurarea dimensiunilor HESR Horizontal Steerer Magnet Lower Yoke.
34. Procedură pentru măsurarea dimensiunilor HESR Horizontal Steerer Magnet Upper Yoke.
35. Procedură pentru măsurarea dimensiunilor HESR Horizontal Steerer Magnet Lower Coil.

36. Procedură pentru măsurarea dimensiunilor HESR Horizontal Steerer Magnet Upper Coil.
37. Procedură pentru realizarea HESR Horizontal Steerer Magnet Assembly.
38. Procedură pentru realizarea HESR Horizontal Steerer Magnet Mechanical Structure with Windings.
39. Procedură pentru realizarea HESR Horizontal Steerer Magnet Mechanical Structure.
40. Procedură pentru realizarea HESR Horizontal Steerer Magnet Lower Yoke.
41. Procedură pentru realizarea HESR Horizontal Steerer Magnet Upper Yoke.
42. Procedură pentru realizarea HESR Horizontal Steerer Magnet Lower Coil.
43. Procedură pentru realizarea HESR Horizontal Steerer Magnet Upper Coil.
44. Procedură pentru măsurarea dimensiunilor HESR Vertical Steerer Magnet Assembly.
45. Procedură pentru măsurarea dimensiunilor HESR Vertical Steerer Magnet Mechanical Structure with Windings.
46. Procedură pentru măsurarea dimensiunilor HESR Vertical Steerer Magnet Mechanical Structure.
47. Procedură pentru măsurarea dimensiunilor HESR Vertical Steerer Magnet Left Yoke.
48. Procedură pentru măsurarea dimensiunilor HESR Vertical Steerer Magnet Right Yoke.
49. Procedură pentru măsurarea dimensiunilor HESR Vertical Steerer Magnet Left Coil.
50. Procedură pentru măsurarea dimensiunilor HESR Vertical Steerer Magnet Right Coil.
51. Procedură pentru realizarea HESR Vertical Steerer Magnet Assembly.
52. Procedură pentru realizarea HESR Vertical Steerer Magnet Mechanical Structure with Windings.
53. Procedură pentru realizarea HESR Vertical Steerer Magnet Mechanical Structure.
54. Procedură pentru realizarea HESR Vertical Steerer Magnet Left Yoke.
55. Procedură pentru realizarea HESR Vertical Steerer Magnet Right Yoke.
56. Procedură pentru realizarea HESR Vertical Steerer Magnet Left Coil.
57. Procedură pentru realizarea HESR Vertical Steerer Magnet Right Coil.
58. Procedură pentru determinarea rezistenței electrice a bobinelor electromagnetului sextupol.
59. Procedură pentru determinarea rezistenței electrice a bobinelor electromagneților steerer orizontal și steerer vertical.
60. Procedură pentru determinarea inductivității bobinelor electromagneților sextupol, steerer orizontal și steerer vertical.
61. Procedură pentru determinarea rezistenței de izolație a bobinelor electromagneților sextupol, steerer orizontal și steerer vertical, imersate în apă.
62. Procedură pentru determinarea rezistenței electrice a bobinajului electromagnetului sextupol.
63. Procedură pentru determinarea rezistenței electrice a bobinajului electromagneților steerer orizontal și steerer vertical.
64. Procedură pentru testarea rigidității dielectrice a bobinajului electromagneților sextupol, steerer orizontal și steerer vertical, cu jugul montat.
65. Procedură pentru testarea magnetică a electromagnetului sextupol.
66. Procedură pentru testarea magnetică a electromagnetului steerer orizontal.
67. Procedură pentru testarea magnetică a electromagnetului steerer vertical.

Având în vedere performanțele deosebite pe care electromagneții trebuie să le îndeplinească, precum și condițiile foarte riguroase în care trebuie să se efectueze testarea acestor echipamente, inclusiv din punct de vedere al aparatelor și instalațiilor folosite la testare, a fost necesar să se amenajeze un spațiu special destinat operațiilor de asamblare finală și testare mecanică, electrică și magnetică a electromagneților. Analizând operațiile care trebuie efectuate în acest spațiu, precum și dotările și utilitățile necesare pentru efectuarea operațiilor respective s-a ajuns la concluzia că spațiul alocat va trebui să îndeplinească următoarele cerințe:

- să aibă o suprafață minimă de 70 m^2;
- să permită un acces facil către exterior, pentru introducerea subansamblelor pentru asamblarea finală și evacuarea produselor testate și pregătite pentru livrare;
- să aibă acces la rețeaua de energie electrică, curent monofazat și trifazat, pentru conectarea sursei de alimentare a electromagneților, a echipamentelor care asigură funcționarea sistemului de răcire cu apă, a instalațiilor, aparatelor și echipamentelor electrice utilizate la asamblarea și testarea electromagneților;
- să aibă acces la rețeaua de aer comprimat;
- să fie dotat cu facilități pentru manipularea electromagneților (cu mase ce pot ajunge la ~500 kg), în vederea asamblării elementelor componente ale sistemelor de conexiuni electrice și hidraulice, pentru deplasarea din zona asamblării în zona de testare și pentru introducerea si scoaterea echipamentelor;
- să permită alimentarea electromagneților, pe durata testării, cu lichid de răcire la o presiune de 15 bar;
- să fie dotat cu standuri corespunzător amplasate și dotate cu S.D.V.-uri pentru operațiile necesare a fi efectuate în vederea asamblării finale și testării electromagnetilor si anume: sudarea elementelor componente ale sistemului de conexiuni hidraulice; montajul elementelor componente ale sistemului de conexiuni electrice; montajul elementelor componente ale sistemului de conexiuni hidraulice ; efectuarea testelor mecanice, hidraulice, electrice și magnetice;

A fost conceput și elaborat planul de amplasament prezentat în **Fig. 50**.

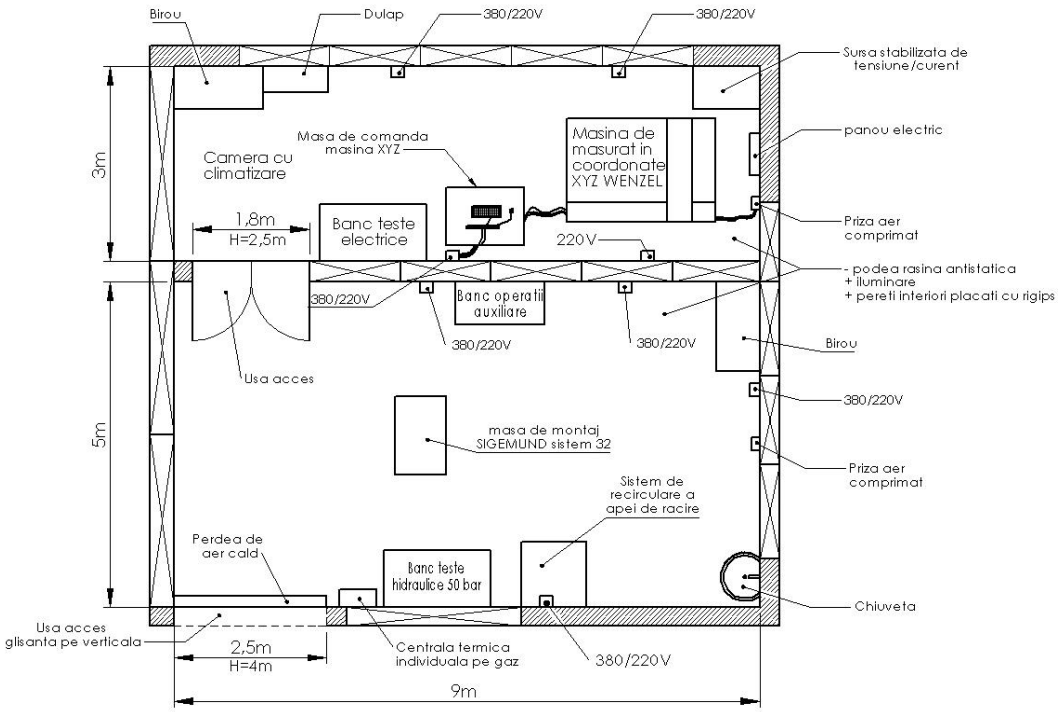


Figura 50. Planul spațiului pentru asamblarea și testarea electromagneților

Pe baza planului elaborat s-a amenajat un spațiu cu suprafața de 72 m^2, la parterul clădirii în care se află sediul principal al institutului. Pentru aceasta au fost desfășurate următoarele activități:

- eliberarea spațiului de instalațiile, echipamentele și dotările existente;
- realizarea unui perete despărțitor între spațiul destinat asamblării și testării echipamentelor care fac obiectul contractului in-kind și hala existentă;
- mutarea peretelui despărțitor interior, astfel încât spațiul destinat montajului să se reducă de la 9 x 6 = 54 m^2, la 9 x 5 = 45 m^2, obținând astfel un spațiu mai adecvat destinat testării echipamentelor, de 9 x 3 = 27 m^2;
- realizarea unei uși de comunicare între compartimentele spațiului, ușă dublă cu deschiderea de 1,8 m și înălțimea de 2,5 m;
- efectuarea racordurilor la energie electrică, printr-un tablou electric propriu;
- efectuarea racordurilor la aer comprimat în ambele compartimente ale spațiului;
- refacerea iluminatului;
- refacerea racordurilor la apă curentă;
- montajul unei instalații de climatizare prevăzută cu centrală termică proprie, necesară pentru efectuarea măsurătorilor în condiții controlate de temperatură și umiditate, impuse atât de testarea echipamentelor, cât și de funcționarea corespunzătoare a mașinii de măsurat în coordonate și a celorlalte dispozitive și aparate de măsură utilizate în procesul de testare;
- refacerea podelei și protejarea acesteia cu rășină antistatică;
- igienizarea și zugrăvirea pereților și a tavanului;
- conceperea sistemului de alimentare a bobinelor electromagneților cu apă la presiunea de 15 bar și temperatura de 25±2˚C, achiziția elementelor componente, execuția și punerea în funcțiune a sistemului, acesta fiind prezentat în **Fig 51**;
- achiziția și instalarea unei perdele de aer, necesară pentru menținerea condițiilor speciale din spațiul de montaj pe durata deschiderii ușii de acces către exterior, pentru introducerea sau evacuarea echipamentelor;
- achiziția unei mese speciale pentru operațiile de sudare și de asamblare, prezentată în **Fig 52**, cu următoarele caracteristici:
    - denumire: Professional 1200x800x200 mm;
    - producător: Bernd Siegmund GmbH, Germania;
    - lungime: 1200 mm;
    - lăţime: 800 mm;
    - înălţime blat: 200 mm;
    - diametru găuri blat: 28 mm;
    - înălţime masă: 850 mm;
    - masa: 345 kg;
    - material blat: oţel EN S355J2;
    - tratament blat: plasmanitrare;
- achiziția și instalarea mașinii de măsurat în coordonate XOrbit 87-1500.

Figura 51. Sistemul de alimentare cu apă

Figura 52. Masa pentru sudare și asamblare

Lucrările efectuate pentru amenajarea spațiului destinat asamblării și testării echipamentelor destinate proiectului FAIR au fost realizate de către personalul ICPE-CA, cu excepția podelei antistatice, realizată de către o firmă specializată. În **Fig. 53** sunt prezentate imagini ale spațiului amenajat pentru asamblarea și testarea electromagneților.

Figura 53. Spațiul destinat asamblării (dreapta) și testării (stânga) electromagneților

După cum s-a menționat și anterior, pentru a evita costurile ridicate presupuse de realizarea de către ICPE-CA a unei pregătiri de fabricație care să permită realizarea integrală a tuturor operațiilor de execuție în cadrul institutului, precum și costurile cu personalul aferent, s-a decis ca lucrările de execuție ale principalelor subansamble ale electromagneților să fie realizate în colaborare cu societăți specializate.

Colaborări cu potențiali executanți ai subansamblelor pentru electromagneți au fost demarate încă din anul 2009, dar, datorită preciziei dimensionale foarte mari și condițiilor deosebite pe care trebuie să le îndeplinească aceste echipamente, s-a reușit identificarea doar a unui singur executant, SC Electromagnetica SA București, împreună cu care au fost realizate prototipurile electromagneților sextupol și steerer vertical. Deoarece, atât pe parcursul execuției prototipurilor, cât și la testarea acestora, inclusiv de către partenerii de la Forschungszentrum Jülich GmbH - Germania, au fost constatate neconformități pentru a căror rezolvare SC Electromagnetica SA și-a declinat competențele, a fost necesar să se încerce găsirea unui alt subcontractor. Au fost demarate discuții detaliate cu SC Automatica SA București, abandonate însă, datorită intrării acestei societăți în procedură de insolvență.

S-au reluat căutările, identificându-se în final societatea **SC Nulear & Vacuum SA**, cu sediul în Măgurele, societate care s-a constatat că deține experiența și dotările necesare pentru realizarea de electromagneți pentru acceleratoare de particule, fiind un furnizor de astfel de produse pentru JINR Dubna. Discuțiile și negocierile detaliate purtate cu reprezentanții acestei societăți au permis clarificarea aspectelor tehnice legate de realizarea subansamblelor structură mecanică cu bobinaj solicitate de către ICPE-CA, conducând în final la încheierea unui contract de subcontractare, semnat și lansat în noiembrie 2013.

După cum s-a menționat anterior, pe baza documentației de execuție pusă la dispoziție de către ICPE-CA, N&V a demarat propria sa pregătire de fabricație, care a constat în realizarea unor dispozitive necesare pentru:

- ștanțele pentru execuția tolelor electromagneților;
- dispozitivele de împachetare pentru realizarea pachetelor de tole;
- incintă vidată și termostatată pentru consolidarea pachetelor de tole;
- dispozitive pentru formarea bobinelor electromagneților;
- matrițe pentru înglobarea în rășină a bobinelor
- incintă vidată și termostatată pentru consolidarea bobinelor.

După ce, în cursul anului 2016 și începutul anului 2017, au fost clarificate toate aspectele tehnice legate de realizarea și testarea electromagneților, în a doua jumătate a anului 2017 a fost realizată seria zero a electromagneților. După testarea detaliată a acesteia, testare efectuată în special la sediul ICPE-CA, în prezența reprezentanților FZJ, dar și la sediul FZJ (electromagnetul de tip sextupol), FAIR GmbH a constatat că toate echipamentele din seria zero corespund specificațiilor contractuale și a transmis, în data de 21.11.2017, **avizul privind trecerea la fabricația de serie** a electromagneților.

Realizarea electromagneților a presupus următoarele activități principale:

- execuția de către Nuclear & Vacuum a structurii mecanice a electromagneților (jug magnetic format din două pachete de tole și suport, prezentată în **Fig. 54** pentru electromagnetul sextupol și în **Fig. 55** pentru electromagnetul steerer orizontal) și vopsirea acesteia;

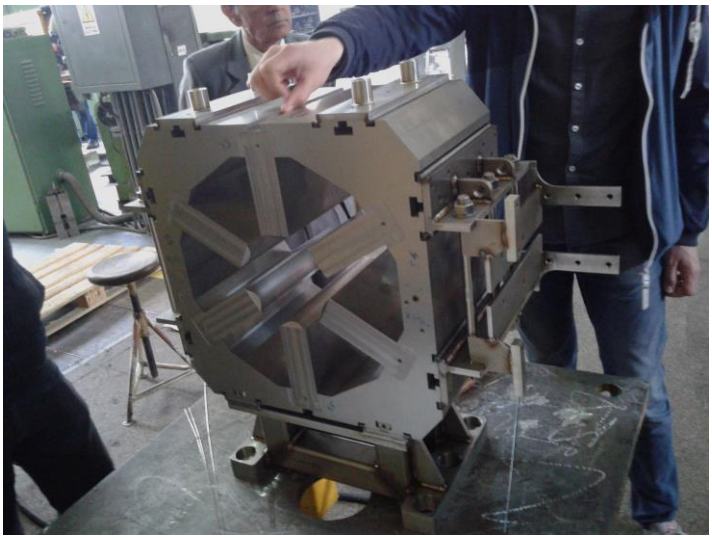


Figura 54. Structura mecanică a electromagnetului sextupol

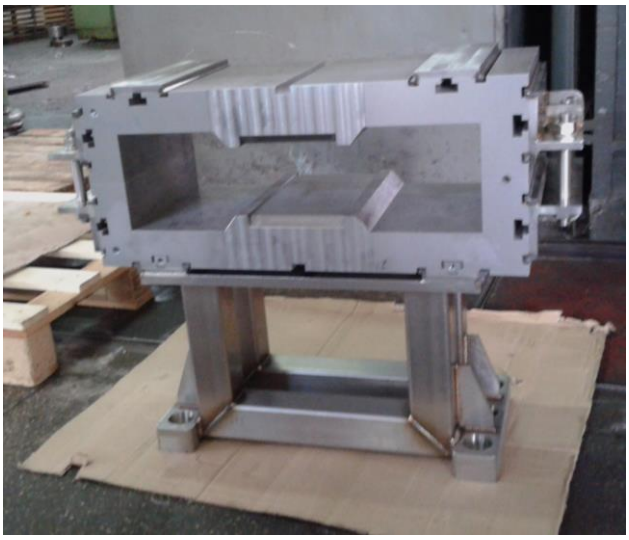


Figura. 55. Structura mecanică a electromagnetului steerer

- execuția de către Nuclear & Vacuum a bobinelor electromagneților, prezentate în **Fig. 56** pentru electromagnetul sextupol și în **Fig. 57** pentru electromagnetul steerer;

Figura 56. Bobinele electromagnetului sextupol

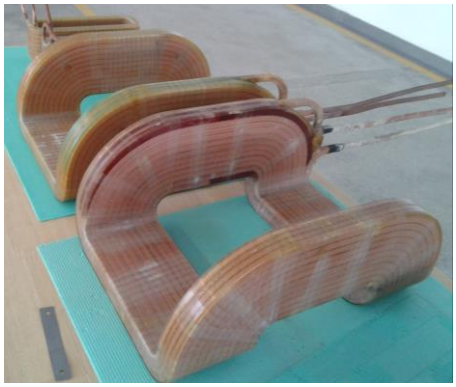


Figura. 57. Bobinele electromagneților steerer

- realizarea de către Nuclear & Vacuum a subansamblului structură mecanică cu bobine, prin montarea bobinelor și realizarea conexiunilor dintre acestea, prezentat în **Fig. 58** pentru electromagnetul sextupol;

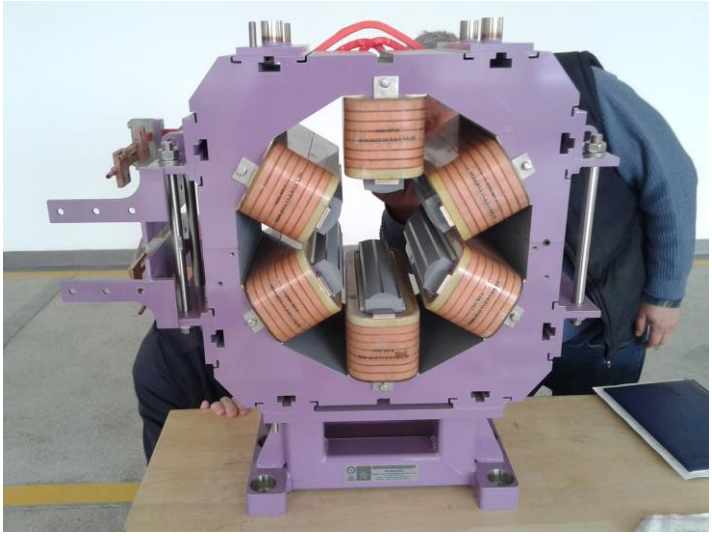


Figura 58. Subansamblul structura mecanică cu bobine pentru electromagnetul sextupol

- realizarea de către ICPE-CA a ansamblului general al electromagneților, prin montarea sistemelor de conexiuni electrice și a sistemului de răcire, forma finală a acestora fiind prezentată în **Fig. 59** pentru electromagnetul sextupol, în **Fig. 60** pentru electromagnetul steerer orizontal și în **Fig. 61** pentru electromagnetul steerer vertical.

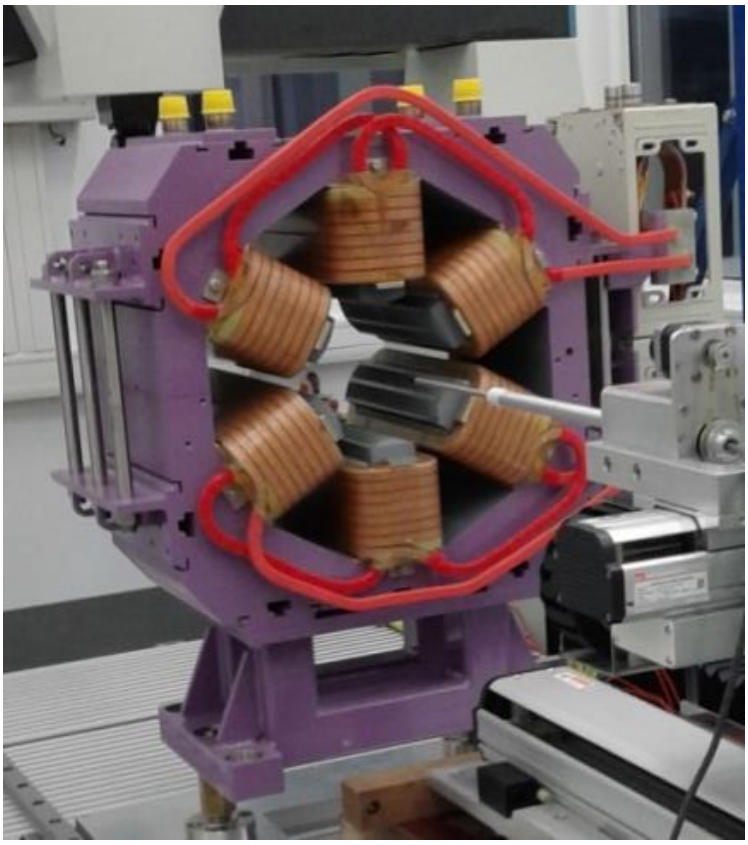


Figura 59. Ansamblul general electromagnet sextupol

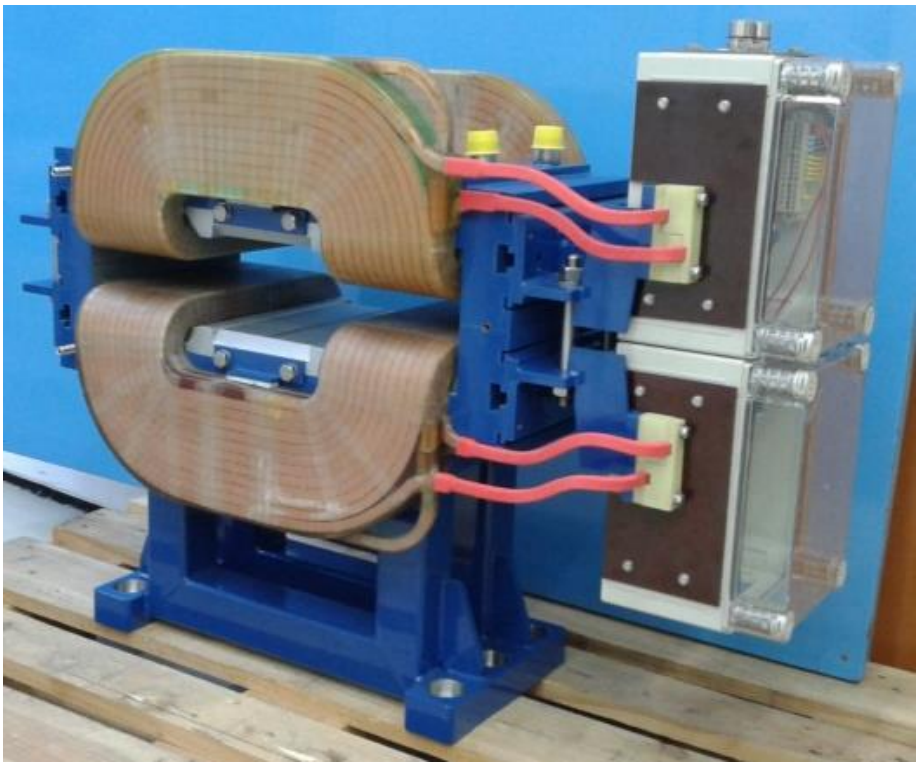


Figura 60. Ansamblul general electromagnet steerer orizontal

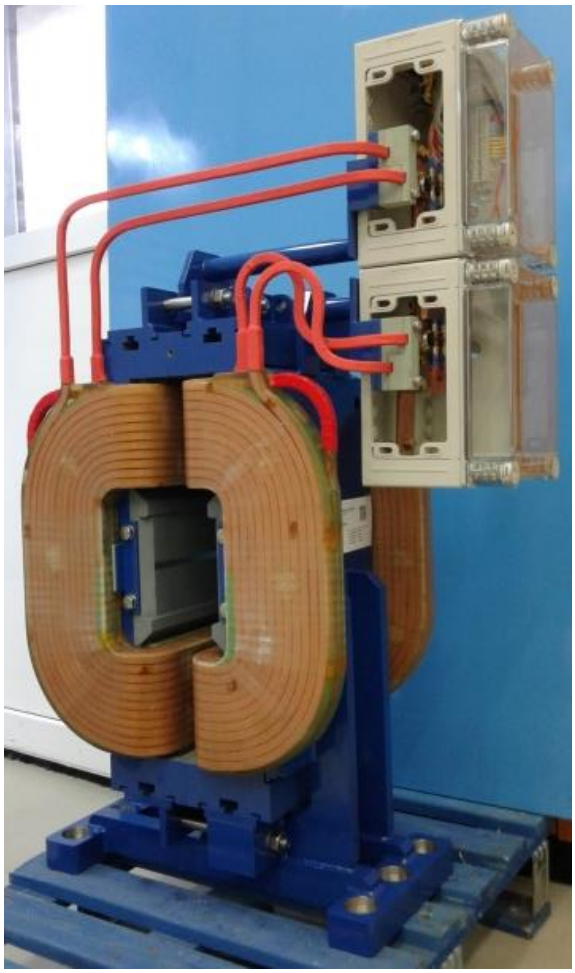


Figura 61. Ansamblul general electromagnet steerer vertical

Cea mai importantă activitate derulată în cadrul contractului, cea care permite atestarea conformității produselor concepute și realizate în cadrul contractului, este cea de testare a electromagneților, activitate care vizează următoarele aspecte:

a) **<u>testarea electrică</u>**:
   - măsurarea rezistenței electrice a fiecărei bobine și a sistemului de bobine, realizată de către ICPE- CA;
   - măsurarea inductanței fiecărei bobine și a sistemului de bobine, realizată de către ICPE- CA;
   - rezistența de izolație a fiecărei bobine, la o tensiune de 5 kV c.a., după menținerea bobinei în apă timp de 6 ore, test efectuat de Nucler & Vacuum;
   - verificarea la scurtcircuit a fiecărei bobine (20 V/spiră), test efectuat de ICPE-CA;
   - rigiditatea dielectrică a sistemului de bobine montat pe jug, la 2 KV c.c., test efectuat de ICPE-CA;
   - continuitatea termostatelor, test efectuat de ICPE-CA;

b) **<u>testarea hidraulică</u>**:
   - se verifică etanșeitatea sistemului de răcire, prin introducerea de azot în sistem și menținerea timp de minimum 12 ore a unei presiuni de 50 bar; testul se efectuează de către ICPE-CA, în **Fig. 62,a** fiind prezentat standul de testare, iar în **Fig. 62,b** fiind prezentat un exemplu cu citirile făcute înainte și după efectuarea testului;

a) Stand testare hidraulică **b) Citiri presiune azot la începutul și sfârșitul testării**

Figura 62. Testarea hidraulică a electromagneților

c) **<u>testarea mecanică</u>**:

- verificarea principalelor dimensiuni și abateri de formă și poziție ale celor două semijuguri care alcătuiesc jugul fiecărui electromagnet, măsurători efectuate de către Nuclear & Vacuum;
- verificarea principalelor dimensiuni și abateri de formă și poziție ale ansamblului fiecărui electromagnet (diametrul și lungimea aperturii, dimensiunile polilor, simetria polilor și a aperturii, etc.), măsurători efectuate de către ICPE-CA cu ajutorul mașinii de măsurat în coordonate WENZEL XOrbit 87 (**Fig. 63**);
- determinarea poziției geometrice a punctelor de referință (centrele unor sfere cu diametrul de 1,5 inch) care vor fi utilizate pentru alinierea electromagneților în inelul acceleratorului; măsurătorile sunt efectuate de către ICPE-CA, tot cu ajutorul mașinii de măsurat în coordonate (**Fig. 64**);

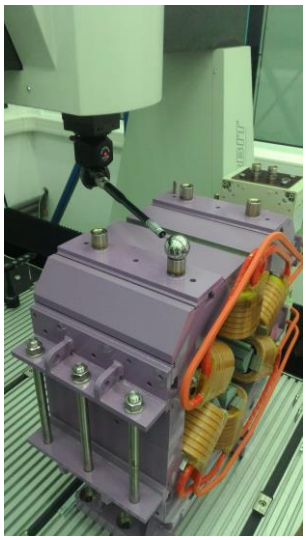


Figura 63. Testarea mecanică a electromagneților

Figura 64. Determinarea poziției sferelor

d) **<u>testarea magnetică</u>**:
- a fost efectuată integral de către ICPE-CA cu ajutorul sistemului de măsurare cu sondă Hall special conceput și dezvoltat, prezentat în **Fig. 39**;
- testarea a fost efectuată doar pentru electromagneții steerer, FZJ solicitând ca testarea magnetică a electromagneților sextupol să fie efectuată de ei printr-o altă metodă decât cea cu sondă Hall, prevăzută în specificațiile contractuale;

În continuare sunt prezentate rezultatele măsurătorilor magnetice efectuate pe unul dintre electromagneții de tip steerer orizontal, aceste măsurători vizând următoarele aspecte:

1. **Excitația locală**
   - S-a măsurat: B_0 = By pentru x = 0 m, y = 0 m, z = 0 m și I = ± (15.5 / 31 / 46.5 / 62 / 77.5 / 108.5 / 139.5 / 155 / 186 / 217 / 232.5 / 248 / 263.5 / 279 / 310) A;
   - S-a calculat: B_0/I pentru fiecare I;
   - S-au trasat următoarele curbe: B_0 = f(I) (**Fig. 65**) și B_0/I = f(I) (**Fig. 66**).

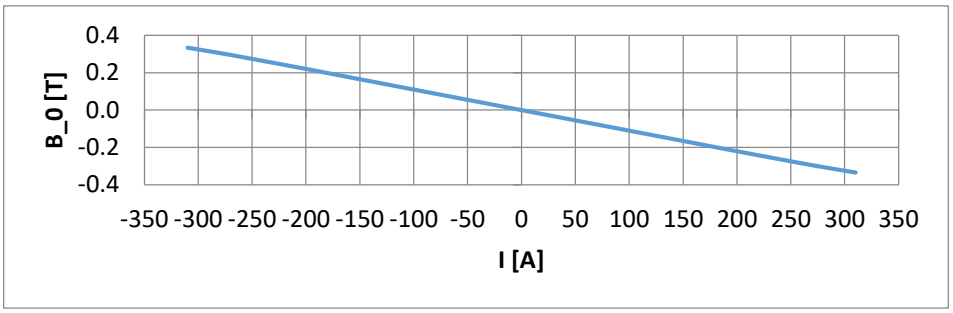


Figura 65. B_0 = f(I)

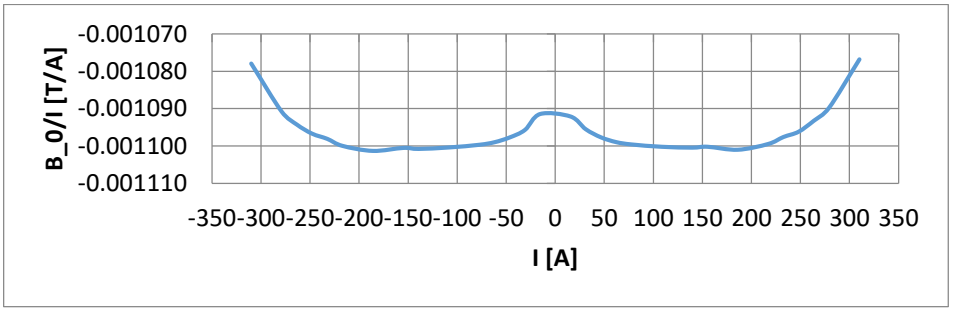


Figura 66. B_0/I = f(I)

2. **Excitația integrală**
   - S-a măsurat: By pentru x = 0 m, y = 0 m, z = (-0.24 … +0.24) m, cu Δz = 0.04 m și I = ± (15.5 / 31 / 46.5 / 62 / 77.5 / 108.5 / 139.5 / 155 / 186 / 217 / 232.5 / 248 / 263.5 / 279 / 310) A;
   - S-a calculat: BL = By_{med} * (z_{max} - z_{min}) pentru fiecare I și BL/I pentru fiecare I;
   - S-au trasat următoarele curbe: By = f(z) pentru fiecare I (**Fig. 67**), BL/I = f(I-) (**Fig. 68**) și BL/I = f(I+) (**Fig. 69**).

3. **Lungimea efectiva**
   - S-a măsurat: By pentru x = 0 m, y = 0 m, z = (-0.24 … +0.24) m, cu Δz = 0.04 m și I = ± (15.5 / 31 / 46.5 / 62 / 77.5 / 108.5 / 139.5 / 155 / 186 / 217 / 232.5 / 248 / 263.5 / 279 / 310) A;

- S-a calculat: BL = By_{med} * (z_{max} - z_{min}) pentru fiecare I și L_{eff} = BL/(By pentru z = 0) pentru fiecare I;
- S-au trasat următoarele curbe: By = f(z) pentru fiecare I (**Fig. 67**), L_{eff} = f(I_-) (**Fig. 70**) și L_{eff} = f(I_+) (**Fig. 71**).

4. Omogenitatea locală

- S-a măsurat: By pentru x = (-0.036 … +0.036) m, cu Δx = 0.004 m, y = -0.035 / 0 / +0.035 m, z = 0 m și I = ± (31 / 155 / 310) A;
- S-a calculat: ΔB/B_0 = ($By_{x=0}$ - By)/$By_{x=0}$ pentru fiecare y și I;
- S-au trasat următoarele curbe: ΔB/B_0 = f(x) pentru fiecare I (**Fig. 72 - 77**).

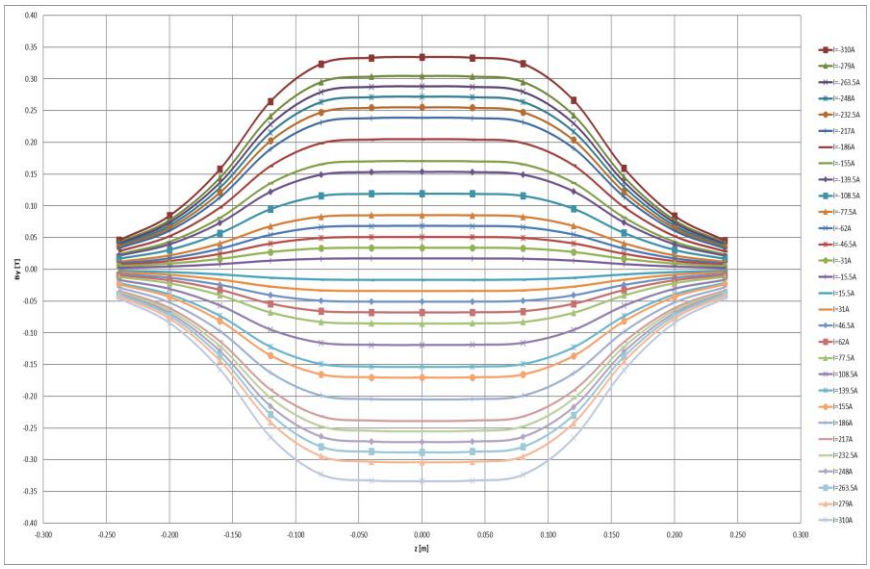


Figura 67. By = f(z) pentru fiecare I

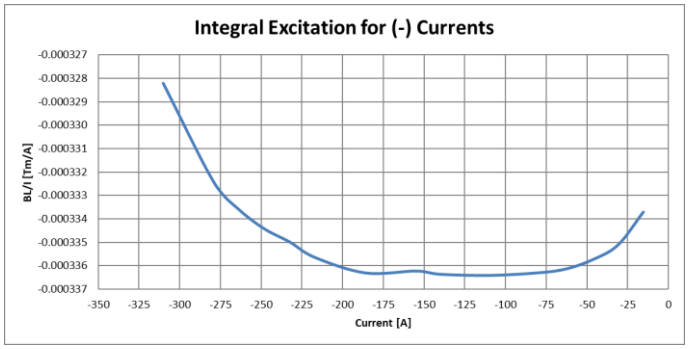


Figura 68. BL/I = f(I-)

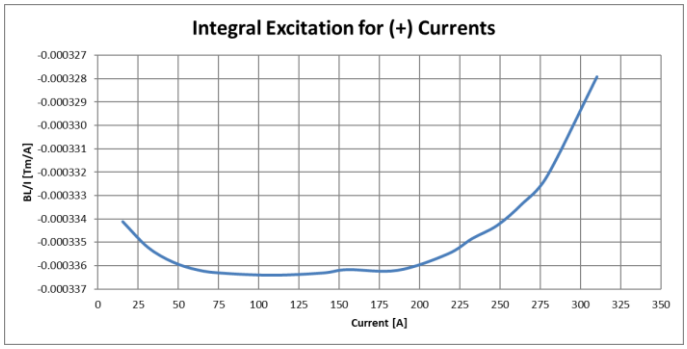


Figura 69. BL/I = f(I+)

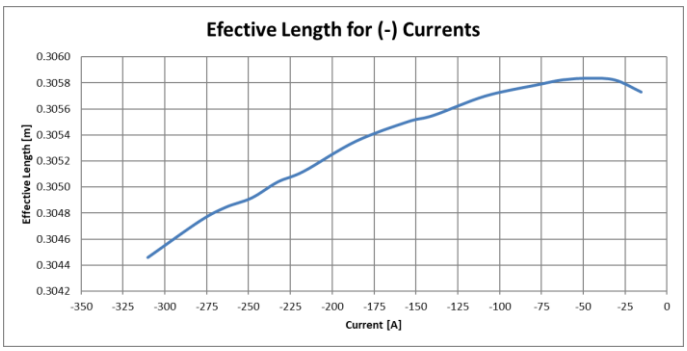


Figura 70. $L_{eff} = f(I_-)$

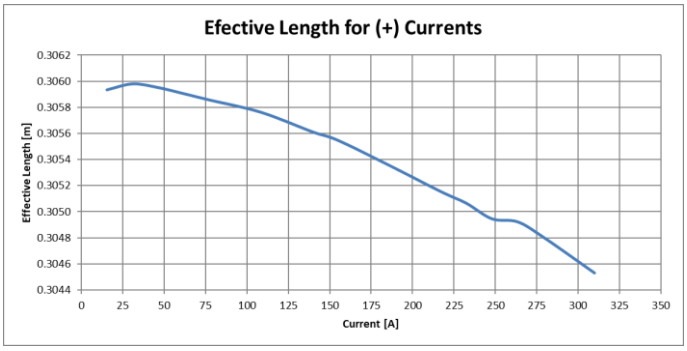


Figura 71. $L_{eff} = f(I_+)$

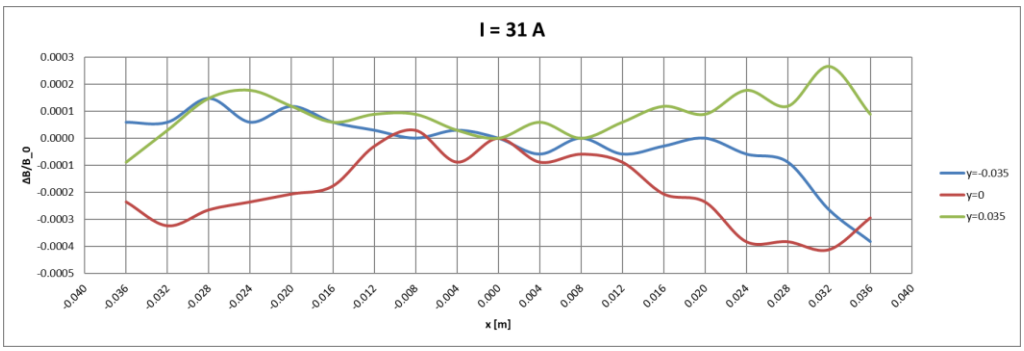


Figura 72. ΔB/B_0 = f(x) pentru I = 31 A

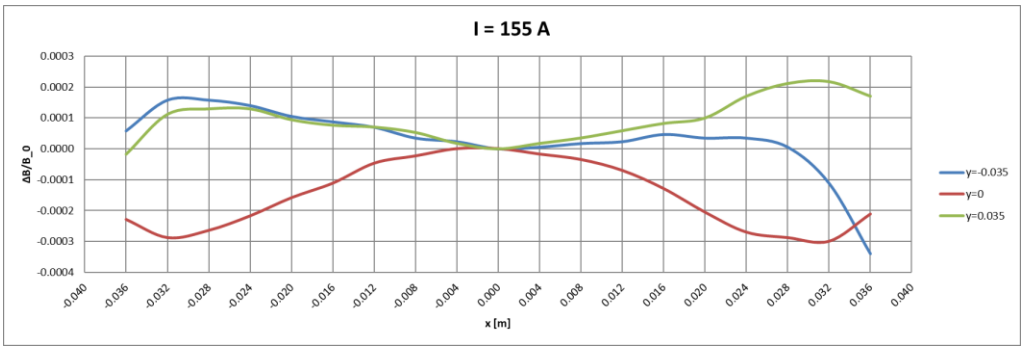


Figura 73. ΔB/B_0 = f(x) pentru I = 155 A

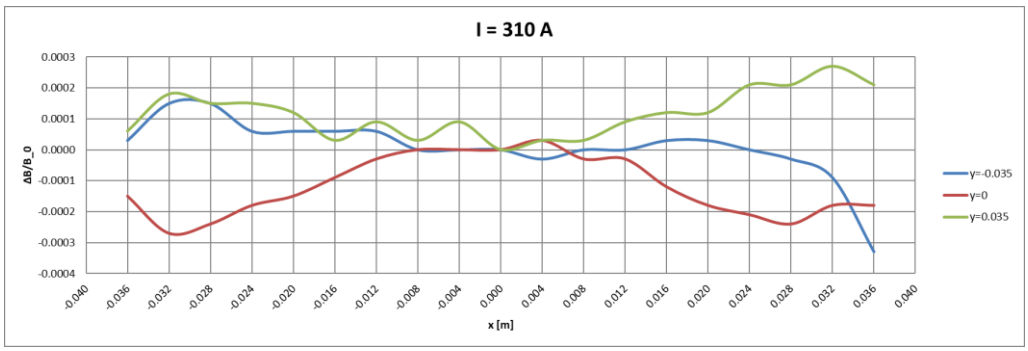


Figura 74. ΔB/B_0 = f(x) pentru I = 310 A

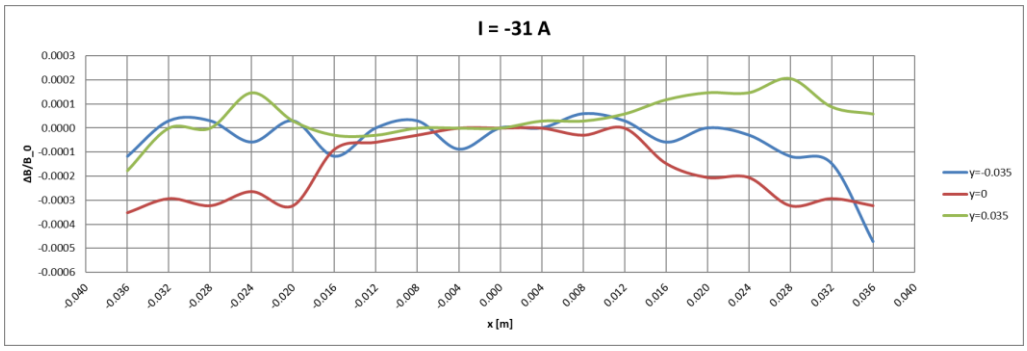


Figura 75. ΔB/B_0 = f(x) pentru I = -31 A

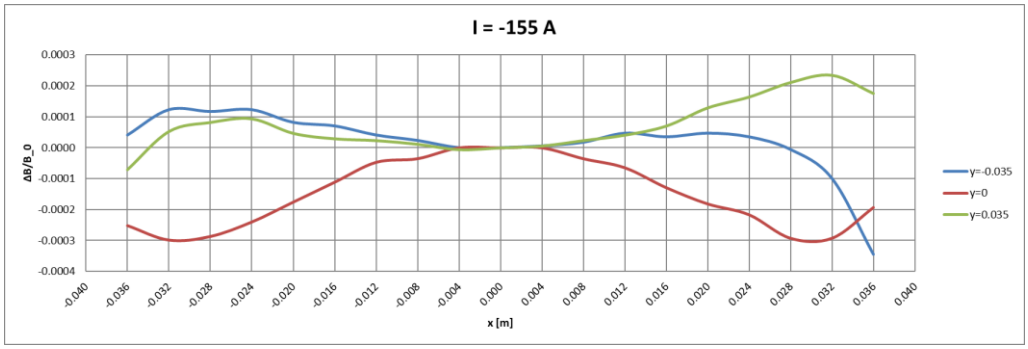


Figura 76. ΔB/B_0 = f(x) pentru I = -155 A

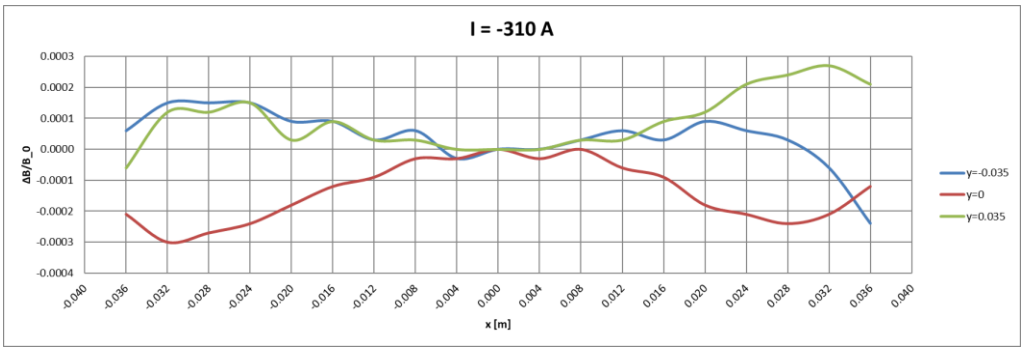


Figura 77. ΔB/B_0 = f(x) pentru I = -310 A

5. Omogenitatea integrală

- S-a măsurat: By pentru x = (-0.036 … +0.036) m, cu Δx = 0.004 m, y = -0.035 / 0 / +0.035 m, z = (-0.24 ... +0.24) m, cu Δz = 0.04 m și I = ± (31 / 155 / 310) A;
- S-a calculat: BL = (By_{med}) * (z_{max} - z_{min}) pentru fiecare y și I, BL/I pentru fiecare y și I și ΔBL/BL_0 = ($BL_{x=0}$ - BL)/$BL_{x=0}$ pentru fiecare y și I;
- S-au trasat următoarele curbe: ΔBL/BL_0 = f(x) pentru fiecare I (**Fig. 78 - 83**).

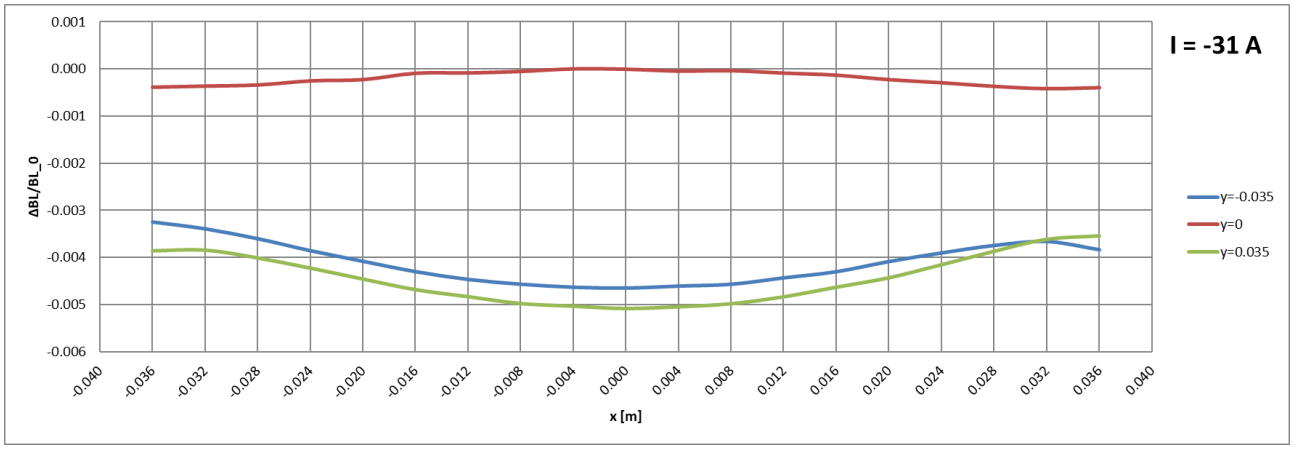


Figura 78. ΔBL/BL_0 = f(x) pentru I = -31 A

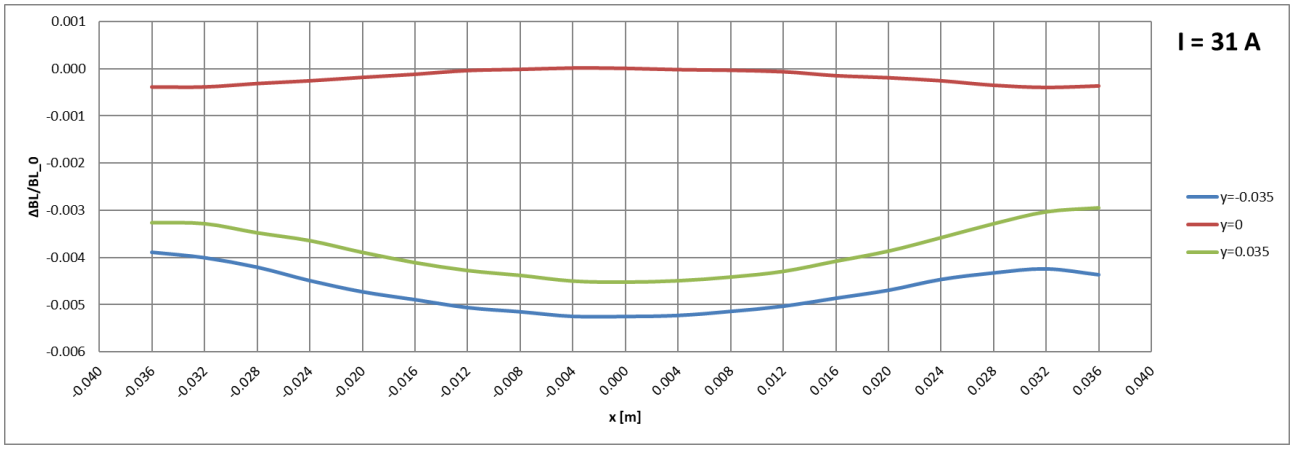


Figura 79. ΔBL/BL_0 = f(x) pentru I = 31 A

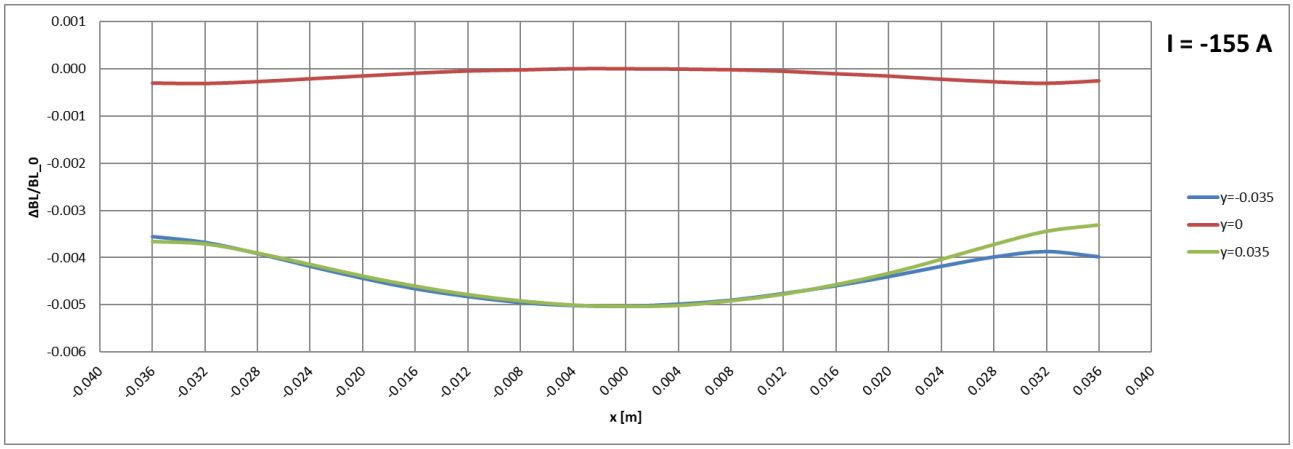


Figura 80. ΔBL/BL_0 = f(x) pentru I = -155 A

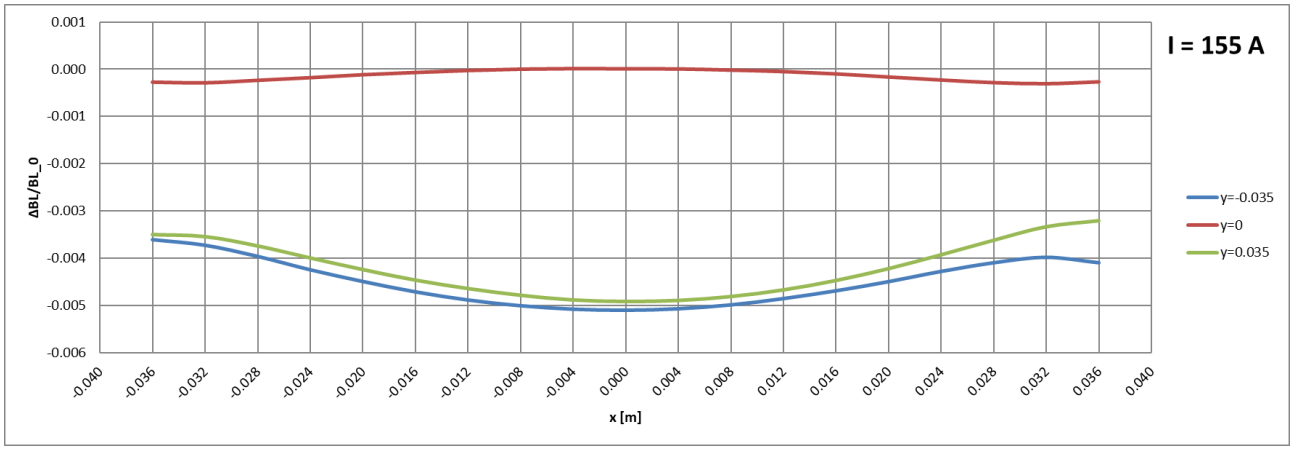


Figura 81. ΔBL/BL_0 = f(x) pentru I = 155 A

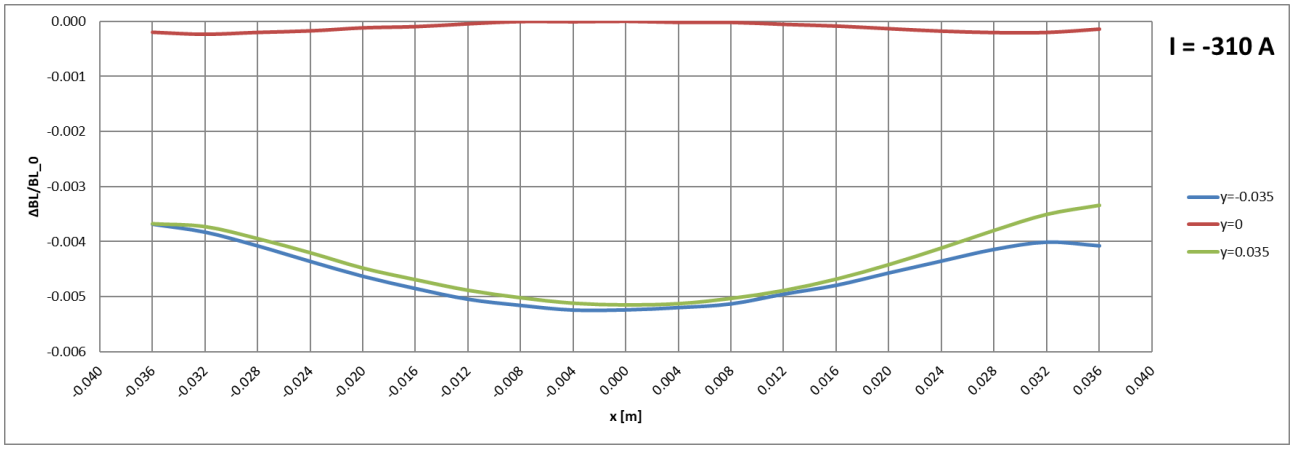


Figura 82. ΔBL/BL_0 = f(x) pentru I = -310 A

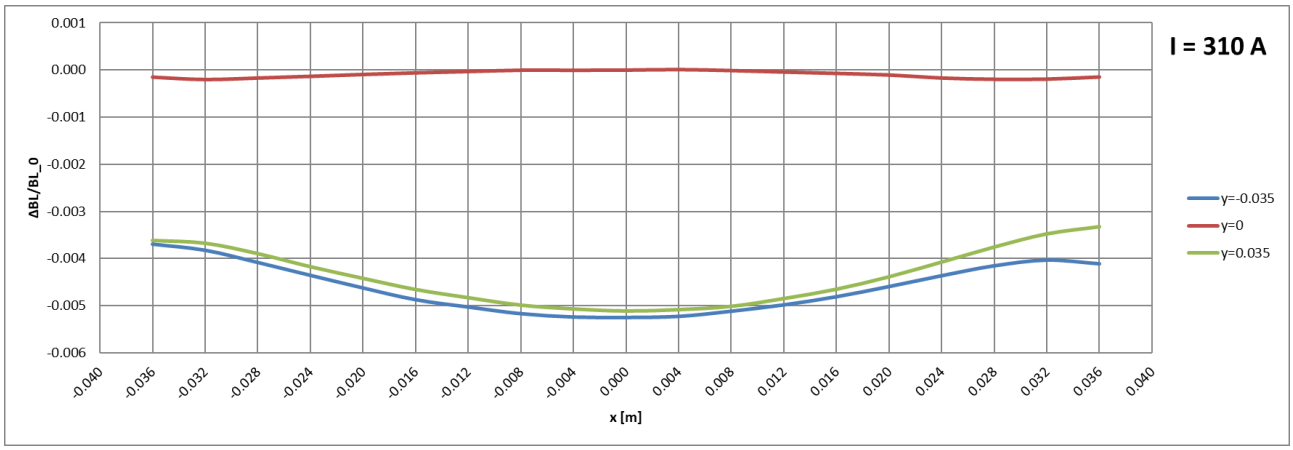


Figura 83. ΔBL/BL_0 = f(x) pentru I = 310 A

6. Poziția capetelor lungimii magnetice

- Se determină coordonatele x, y, z ale capetelor liniei ce formează lungimea efectivă a electromagnetului, astfel încât să fie posibilă corelarea poziției acestor capete cu poziția geometrică a punctelor de referință utilizate pentru alinierea electromagneților în inelul acceleratorului și care au fost determinate prin măsurătorile mecanice.

ICPE-CA a realizat până la sfârșitul anului 2021 toți cei 119 electromagneți care au făcut obiectul contribuției in-kind a României la proiectul FAIR. Pentru toți electromagneții a fost efectuată testarea FAT – Factory Acceptance Test, apoi cei 119 electromagneți au fost livrați către FZJ. Pe baza rapoartelor de testare elaborate de ICPE-CA, precum și pe baza testării SAT – Site Acceptance Test efectuată de către FZJ, **toți electromagneți livrați au fost declarați ca fiind în conformitate cu specificațiile contractuale, fiind acceptați de către FAIR**.

Pentru toți electromagneții livrați au fost încheiate protocoale de recepție care atestă acceptarea lor, în **Fig. 84** fiind prezentat protocolul încheiat pentru primii 20 electromagneți.

NR. INTRARE 09
DATA 19.04.2018

PROTOCOL,

INCDIE ICPE - CA
INTRARE / IEȘIRE Nr. 366
Ziua 12 Luna 04 Anul 2018

Concluded in Bucharest, on 12th April 2018, in three originals, between:

INCDIE ICPE-CA (ICPE-CA), with headquarters in Splaiul Unirii, no. 313, sector 3, 030138 Bucharest Romania, represented by General Director, Sergiu NICOLAIE and Project Responsible, Ionel CHIRIȚĂ,

SC NUCLEAR & VACUUM SA (N&V), with headquarters in Atomiștilor street, no. 409, 077125 Măgurele, Ilfov County, Romania, represented by General Director, Crina IACOB - NATUREL and Technical Director, Cicerone APRODU and

FORSCHUNGSZENTRUM JÜLICH (FZJ), with headquarters in Wilhelm-Johnen-Straße, 52428 Jülich, Germany, represented by Subproject Leader HESR, Dieter PRASUHN and Project Responsible, Jürgen BÖKER,

regarding the manufacturing and reception of the following magnets subject to the contract no. 4271/2013 between ICPE-CA and N&V and to the contract no. IKC2.11.2.3 between ICPE-CA, FAIR GmbH and the Romanian Ministry of Research and Innovation:

1. Sextupole Magnet SN: 18-000054-01-5 (zero series);
2. Sextupole Magnet SN: 18-000054-02-2;
3. Sextupole Magnet SN: 18-000054-03-9;
4. Sextupole Magnet SN: 18-000054-04-6;
5. Sextupole Magnet SN: 18-000054-05-3;
6. Sextupole Magnet SN: 18-000054-06-0;
7. Sextupole Magnet SN: 18-000054-07-7;
8. Sextupole Magnet SN: 18-000054-08-4;
9. Sextupole Magnet SN: 18-000054-09-1;
10. Sextupole Magnet SN: 18-000054-10-7;
11. Horizontal Steerer Magnet SN: 18-000055-01-2 (zero series);
12. Horizontal Steerer Magnet SN: 18-000055-02-9;
13. Horizontal Steerer Magnet SN: 18-000055-03-6;
14. Horizontal Steerer Magnet SN: 18-000055-04-3;
15. Horizontal Steerer Magnet SN: 18-000055-05-0.
16. Vertical Steerer Magnet SN: 18-000056-01-9 (zero series);
17. Vertical Steerer Magnet SN: 18-000056-02-6;
18. Vertical Steerer Magnet SN: 18-000056-03-3;
19. Vertical Steerer Magnet SN: 18-000056-04-0;
20. Vertical Steerer Magnet SN: 18-000056-05-7.

Based on FAT tests performed at ICPE-CA and N&V headquarters as well as SAT tests performed at the FZJ headquarters, tests that showed the compliance of the above mentioned magnets with the contractual specifications and whose results are recorded in the following test reports prepared by ICPE-CA:

1. SxM_01 measurement report;
2. SxM_02 measurement report;
3. SxM_03 measurement report;
4. SxM_04 measurement report;

5. SxM_05 measurement report;
6. SxM_06 measurement report;
7. SxM_07 measurement report;
8. SxM_08 measurement report;
9. SxM_09 measurement report;
10. SxM_10 measurement report;
11. HStM_01 measurement report;
12. HStM_02 measurement report;
13. HStM_03measurement report;
14. HStM_04 measurement report;
15. HStM_05 measurement report;
16. VStM_01 measurement report;
17. VStM_02 measurement report;
18. VStM_03 measurement report;
19. VStM_04 measurement report;
20. VStM_05 measurement report;

it can be considered that all the above mentioned magnets are accepted and ICPE-CA and N&V can procede with the series production of sextupole and steerer magnets.

For ICPE-CA,

Sergiu NICOLAIE, ICPE-CA General Director .....

Ionel CHIRIȚĂ, ICPE-CA Project Responsible .....

For N&V,

Crina IACOB - NATUREL, N&V General Director .....

Cicerone APRODU, N&V Technical Director .....

For FZJ,

Dieter PRASUHN, FZJ Subproject Leader HESR .....

Jürgen BÖKER, FZJ Project Responsible .....

Figura 84. Protocol de recepție electromagneți

În ceea ce privește **sursele de alimentare**, acestea sunt surse bipolare trifazate, cu următoarele caracteristici principale:

- Alimentare: 400 V, 3 faze, 50 Hz;
- Tensiune ieșire: +/-45 V;
- Curent ieșire: 0...350 A;
- Panta de creștere a curentului: 20 A/s;
- Stabilitate: 10^{-4} din curentul maxim;
- Reproductibilitate: 10^{-4} din curentul maxim;
- Riplu admis de curent: 10^{-4} din curentul maxim.

Ca și în cazul electromagneților, după semnarea și lansarea, în noiembrie 2013, a contractului, au fost demarate lucrările referitoare la pregătirea de fabricație, derulându-se activități similare cu cele derulate în cazul electromagneților și anume:

- stabilirea soluțiilor constructive, tehnice și tehnologice ale celor două tipuri de surse de alimentare; specificațiile celor două tipuri de surse fiind practic identice, s-a adoptat aceeași soluție constructivă pentru ambele tipuri de surse, păstrându-se codificarea diferită existentă deja atât în documentația contractuală, cât și în documentele generale ale proiectului FAIR;
- elaborarea documentației de execuție a surselor de alimentare;
- analiza surselor de alimentare din punct de vedere al performanțelor impuse, al structurii necesare, precum și al amplasării optime a componentelor;
- achiziția de materiale și componente utilizate pentru realizarea surselor de alimentare, în conformitate cu specificațiile contractuale și cu necesarul identificat;
- stabilirea și punerea la punct a procedurilor de execuție, montaj și testare FAT a surselor de alimentare;

Analizând și aici posibilitățile limitate ale ICPE-CA, ca și institut național de cercetare, în ceea ce privește fabricația de serie a unor echipamente, s-a decis, ca și în cazul electromagneților, să se subcontracteze realizarea surselor de alimentare către un producător specializat. A fost aleasă societatea SC AAGES SA Sângeorgiu de Mureș, unitate ce deține expertiză și capabilități deosebite de fabricație în domeniul surselor de alimentare ale unor echipamente și instalații utilizate în procese ce necesită un control foarte riguros al parametrilor. ICPE-CA a coordonat activitățile de pregătire a fabricației surselor de alimentare și a achiziționat principalele două componente ale acestora, dulapul tip EMC și transformatorul de alimentare.

După efectuarea pregătirii de fabricație s-a procedat, în strânsă colaborare cu reprezentanții FZJ, la realizarea unor prototipuri de surse de alimentare, acestea urmând un program complex de testare, atât la sediul AAGES, cât și la sediul FZJ și fiind supuse unor modificări succesive semnificative. Primul prototip realizat este prezentat în **Fig. 85**.

Figura 85. Prototipul surselor de alimentare

Testele efectuate pe prototipurile realizate au condus la realizarea, în anul 2015, a două surse de alimentare constituind seria zero. Cele două surse, al căror ansamblu general este prezentat în **Fig. 86**, au fost realizate în conformitate cu specificațiile tehnice în vigoare la acea dată și cu modificările operate pe durata execuției și testării prototipurilor realizate în perioada pregătirii de fabricație.

Figura 86. Sursa de alimentare din seria zero realizată în conformitate cu specificațiile inițiale

Seria zero realizată a fost supusă testării FAT, în mai 2015, la sediul AAGES și în prezența reprezentanților ICPE-CA și a reprezentantului FZJ desemnat prin contract ca persoană responsabilă pentru recepția și avizarea surselor de alimentare. Conform procesului verbal de validare a seriei zero încheiat cu această ocazie și semnat de reprezentanții AAGES, ICPE-CA și FZJ, seria zero a surselor de alimentare a fost declarată ca fiind în conformitate cu specificațiile contractuale și a fost avizată trecerea la fabricația de serie.

Pe baza avizului primit la validarea seriei zero, ICPE-CA și AAGES au procedat la realizarea a încă 10 surse de alimentare. Una dintre sursele care au constituit seria zero a fost livrată către ICPE-CA pentru a fi utilizată la testarea electromagneților care fac obiectul contribuției in-kind, iar cea de-a doua a fost livrată către FZJ. Echipamentul livrat la FZJ a fost supusă de către reprezentanții FZJ și FAIR testării SAT. Aceasta, pe de o parte, a pus în evidență neconformități în ceea ce privește comportamentul EMC al surselor de alimentare din seria zero realizată și avizată, iar, pe de alta parte, a condus la formularea de către reprezentanții FZJ și FAIR a unor cerințe constructive noi, nespecificate în documentele contractuale.

Analiza noilor cerințe formulate de FAIR și FZJ a relevat necesitatea efectuării unor modificări semnificative ale soluției constructive. Aceste modificări au fost transpuse într-un set nou de specificații tehnice, pe baza cărora s-a procedat la reproiectarea surselor, proiectul modificat fiind transmis către FZJ pentru verificare și avizare. În urma avizului pozitiv primit s-a procedat la realizarea a două noi surse de alimentare, reprezentând seria zero a sursei de alimentare modificate. Cele două surse, al căror ansamblu general este prezentat în **Fig. 87**, au fost supuse unui program intens de testare, derulat în perioada august 2016 – februarie 2018.

Testele efectuate au relevat, în final, că sursele de alimentare corespund noilor specificații contractuale și că așa-zisele neconformități relevate de testarea EMC provin de fapt de la modulul ACU – Adaptive Control Unit, componentă ce constituie contribuția FAIR la realizarea surselor.

Pe baza testelor efectuate și a rapoartelor de măsurare întocmite pentru cele două surse din noua serie zero, a fost încheiat cu FZJ și AAGES un protocol de recepție în care se atestă conformitatea seriei zero cu specificațiile tehnice modificate, se consideră că seria zero este

acceptată și se exprimă avizul privind trecerea la fabricația de serie. Protocolul de recepție a fost semnat de toate părțile implicate în realizarea, testarea și recepția surselor de alimentare și a fost prezentat ca document de raportare al etapei IV [4]. De asemenea, FAIR a transmis către minister, în aprilie 2018, o adresă oficială în care se menționează acceptul tehnic pentru seria zero a surselor de alimentare, precum și acceptul privind trecerea la fabricația de serie a surselor.

Figura 87. Sursa de alimentare din seria zero realizată în conformitate cu specificațiile modificate

Datorită modificărilor substanțiale necesare pentru realizarea surselor de alimentare în conformitate cu noile specificații, modificări care presupun cheltuieli materiale și de manoperă, de asemenea, substanțiale, legate de reproiectarea echipamentelor, de transportul și dezasamblarea celor 12 surse de alimentare din fabricația de serie realizate în conformitate cu specificațiile tehnice inițiale și mai ales de achiziția de componente conforme cu noile specificații, costurile de fabricație ale surselor au crescut semnificativ. Deoarece FAIR nu a acceptat creșterea valorii contribuției in-kind a României cu suma reprezentată de costurile suplimentare pentru realizarea surselor de alimentare, a fost necesar să se încheie o serie de amendamente la contractul inițial, amendamente care prevăd menținerea valorii contribuției in-kind la valoarea convenită prin contract, dar cu reducerea numărului de surse de la 82 buc., la 62 buc. Alte 10 surse de alimentare s-au prevăzut a fi realizate, dar acestea fac obiectul unei comenzi directe a FZJ către ICPE-CA, contravaloarea acestora fiind achitată, de asemenea, direct de către FZJ către ICPE-CA.

După primirea acceptului privind trecerea la fabricația de serie și în paralel cu negocierile purtate între FAIR, minister, FZJ, ICPE-CA și AAGES în vederea clarificării aspectelor legate de numărul de surse care vor fi realizate și cine suportă costurile suplimentare datorate noilor specificații impuse, ICPE-CA și AAGES au demarat fabricația de serie a surselor, au efectuat testarea FAT a acestora și le-au livrat către FZJ în vederea testării SAT. Pe baza rapoartelor de testare elaborate de ICPE-CA, precum și pe baza testării SAT, **toate cele 72 surse de alimentare livrate au fost acceptate**.

Pentru toate sursele de alimentare livrate au fost încheiate, ca și în cazul electromagneților, protocoale de recepție care atestă acceptarea lor, în **Fig. 88** fiind prezentat protocolul încheiat pentru cele 62 surse de alimentare realizate în cadrul contractului in-kind.

NATIONAL INSTITUTE FOR RESEARCH AND DEVELOPMENT
IN ELECTRICAL ENGINEERING ICPE-CA Bucharest

H.G. 1282/2004
Social assets: 381108 ROL
Trade register
J40/3800/2001
VAT No. RO 13827850

Bank account ROL
RO52RNCB0076029424690001
Bank account EUR
RO25RNCB0076029424690002
Bank account USD
RO95RNCB0076029424690003
BCR SMB

Email: office@icpe-ca.ro
www.icpe-ca.ro
Phone: +4021.346.7231
+4021.346.8297
Fax: +4021.346.8299
313 Splaiul Unirii, District 3
Bucharest, 030138, România

INCDIE ICPE-CA
INTRARE / IEŞIRE Nr. 1232
Ziua 13 Luna 08 Anul 2021

PROTOCOL,

Concluded in Bucharest, on 13th August 2021, in three originals, between:

INCDIE ICPE-CA (ICPE-CA), with headquarters in Splaiul Unirii, no. 313, sector 3, 030138 Bucharest Romania, represented by General Director, Sergiu **NICOLAIE** and Project Responsible, Ionel **CHIRIȚĂ**,

SC AAGES SA (AAGES), with headquarters in Agricultorilor street, no. 16, 547530 Sângeorgiu de Mureș, Mureș County, Romania, represented by General Director, Gábor **MOLNÁR** and Project Responsible, Simon **JÓZSEF** and

FORSCHUNGSZENTRUM JÜLICH (FZJ), with headquarters in Wilhelm-Johnen-Straße, 52428 Jülich, Germany, represented by Subproject Leader HESR, Dieter **PRASUHN** and Technical Responsible HESR, Raimund **TÖLLE**,

regarding the manufacturing, testing and acceptance of the power converters subject to the contract no. 4272/2013 between ICPE-CA and AAGES and to the contract no. IKC2.11.2.3 between ICPE-CA, FAIR GmbH and the Romanian Ministry of Research, Innovation and Digitization.

Based on FAT tests performed at AAGES headquarters as well as SAT tests performed at FZJ headquarters, the state of the power converters is as follows:

Serial number	CID power converter	FAT complete	SAT complete	Power conveter accepted	Remarks
HR.C1.01	03000010291	yes	yes	**yes**	no
HR.C1.02	03000010307	yes	yes	**yes**	no
HR.C1.03	03000010314	yes	yes	**yes**	no
HR.C1.04	03000010321	yes	yes	**yes**	no
HR.C1.05	03000010338	yes	yes	**yes**	no
HR.C1.06	03000010345	yes	yes	**yes**	no
HR.C1.07	03000010437	yes	yes	**yes**	no
HR.C1.08	03000010444	yes	yes	**yes**	EMC to be done by FZJ
HR.C1.09	03000010451	yes	yes	**yes**	no
HR.C1.10	03000010468	yes	yes	**yes**	EMC to be done by FZJ

Serial number	CID power converter	FAT complete	SAT complete	Power converter accepted	Remarks
HR.C1.11	03000010475	yes	yes	**yes**	EMC to be done by FZJ
HR.C1.12	03000010482	yes	yes	**yes**	EMC to be done by FZJ
HR.C1.13	03000010352	yes	yes	**yes**	EMC to be done by FZJ
HR.C1.14	03000010369	yes	yes	**yes**	no
HR.C1.15	03000010376	yes	yes	**yes**	EMC to be done by FZJ
HR.C1.16	03000010383	yes	yes	**yes**	no
HR.C1.17	03000010390	yes	yes	**yes**	no
HR.C1.18	03000010406	yes	yes	**yes**	no
HR.C1.19	03000010413	yes	yes	**yes**	EMC to be done by FZJ
HR.C1.20	03000010420	yes	yes	**yes**	no
HR.C1.21	03000010499	yes	yes	**yes**	no
HR.C1.22	03000010505	yes	yes	**yes**	no
HR.C1.23	03000010512	yes	yes	**yes**	no
HR.C1.24	03000010529	yes	yes	**yes**	no
HR.C1.25	03000010536	yes	yes	**yes**	no
HR.C1.26	03000010543	yes	yes	**yes**	EMC to be done by FZJ
HR.C1.27	03000010550	yes	yes	**yes**	no
HR.C1.28	03000010567	yes	yes	**yes**	no
HR.C1.29	03000010574	yes	yes	**yes**	no
HR.C1.30	03000010581	yes	yes	**yes**	no
HR.C1.31	03000010598	yes	yes	**yes**	no
HR.C1.32	03000010604	yes	yes	**yes**	no
HR.C1.33	03000010611	yes	yes	**yes**	EMC to be done by FZJ
HR.C1.34	03000010628	yes	yes	**yes**	EMC to be done by FZJ
HR.C1.35	03000010635	yes	yes	**yes**	EMC to be done by FZJ
HR.C1.36	03000010642	yes	yes	**yes**	EMC to be done by FZJ
HR.C1.37	03000010659	yes	yes	**yes**	EMC to be done by FZJ
HR.C1.38	03000010666	yes	yes	**yes**	no
HR.C1.39	03000010673	yes	yes	**yes**	no
HR.C1.40	03000010680	yes	yes	**yes**	EMC to be done by FZJ
HR.C1.41	03000010697	yes	yes	**yes**	no
HR.C1.42	03000010703	yes	yes	**yes**	EMC to be done by FZJ
HR.C1.43	03000010710	yes	yes	**yes**	no
HR.C1.44	03000010727	yes	yes	**yes**	no
HR.C1.45	03000010734	yes	yes	**yes**	EMC to be done by FZJ
HR.C1.46	03000010741	yes	yes	**yes**	EMC to be done by FZJ
HR.C1.47	03000010758	yes	yes	**yes**	EMC to be done by FZJ
HR.C1.48	03000010765	yes	yes	**yes**	EMC to be done by FZJ
HR.C1.49	03000010772	yes	yes	**yes**	EMC to be done by FZJ
HR.C1.50	03000010789	yes	yes	**yes**	EMC to be done by FZJ
HR.C1.51	03000010796	yes	yes	**yes**	EMC to be done by FZJ

Serial number	CID power converter	FAT complete	SAT complete	Power conveter accepted	Remarks
HR.C1.52	03000010802	yes	yes	**yes**	no
HR.C1.53	03000010819	yes	yes	**yes**	EMC to be done by FZJ
HR.C1.54	03000010826	yes	yes	**yes**	EMC to be done by FZJ
HR.C1.55	03000010833	yes	yes	**yes**	EMC to be done by FZJ
HR.C1.56	03000010840	yes	yes	**yes**	EMC to be done by FZJ
HR.C1.57	03000010857	yes	yes	**yes**	EMC to be done by FZJ
HR.C1.58	03000010864	yes	yes	**yes**	EMC to be done by FZJ
HR.C1.59	03000010871	yes	yes	**yes**	EMC to be done by FZJ
HR.C1.60	03000010888	yes	yes	**yes**	EMC to be done by FZJ
HR.C1.61	03000010895	yes	yes	**yes**	EMC to be done by FZJ
HR.C1.62	03000010901	yes	yes	**yes**	EMC to be done by FZJ

In conclusion, all 62 power converters that have been subject of the IKC2.11.2.3 main contract are declared "**accepted**".

For ICPE-CA,

Sergiu **NICOLAIE**, General Director .....

Ionel **CHIRIȚĂ**, Project Responsible .....

For AAGES,

Gábor **MOLNÁR**, General Director .....

Simon **JÓZSEF**, Project Responsible .....

For FZJ,

Dieter **PRASUHN**, Subproject Leader HESR .....

Raimund **TÖLLE**, Technical Responsible HESR .....

Figura 88. Protocol de recepție surse de alimentare

Pentru îndeplinirea tuturor obligațiilor contractuale care reveneau ICPE-CA și subcontractorului AAGES, a fost elaborată și transmisă beneficiarului german documentația finală a surselor de alimentare. Pe lângă proiectul de execuție, rapoartele de testare FAT și declarațiile de conformitate, a fost eleborat și un manual de utilizare a surselor de alimentare.

Rezultatele activităților derulate în cadrul contractului referitor la contribuția in-kind a României la proiectul FAIR, precum și competențele dobândite de specialiștii ICPE-CA pe parcursul derulării proiectului, permit noi direcții de implicare și participarea la proiecte similare. De asemenea, ICPE-CA, împreună cu partenerii industriali implicați în realizarea produselor de serie, poate deveni un potențial furnizor de echipamente pentru facilitățile de cercetare din domeniul fizicii nucleare, existente sau aflate in constructie, precum FAIR, ITER, CERN, JINR Dubna, ELI s.a. De asemenea, transferurile de tehnologie realizate către societățile N&V și AAGES pe durata derulării contractului, au permis ca aceste societăți să dobândească o expertiză deosebită în domeniul fabricației de echipamente de cel mai înalt nivel.