



UNIVERSITATEA POLITEHNICA DIN BUCUREȘTI

Școala Doctorală de Inginerie Electrică



Rezumat

Teză de doctorat

Interferențe electromagnetice în sistemele
electrice ale autovehiculelor

Electromagnetic Interferences in the electric
systems of vehicles

Autor: Ing. Violeta-Maria Ionescu

Conducător științific: Prof. Dr. Ing. Mihai Octavian Popescu

Cuprins

Capitolul 1: Concepte Fundamentale		4
1.1.	<i>Introducere</i>	4
1.2.	<i>Obiectivele temei propuse</i>	5
1.3.	<i>Noțiuni introductive despre compatibilitatea electromagnetică</i>	6
1.4.	<i>Scurt istoric al autovehiculelor electrice</i>	7
1.5.	<i>Testarea vehiculelor electrice din punctul de vedere al compatibilității electromagnetice</i>	7
Capitolul 2: Structuri constructive de vehicule electrice		8
2.1.	<i>Vehiculul cu baterie electrică (BEV)</i>	8
2.2.	<i>Vehiculul electric hibrid (HEV)</i>	8
2.3.	<i>Vehiculul hibrid plug-in (PHEV)</i>	9
2.4.	<i>Integrarea sistemului electric/electronic în vehiculele electrice</i>	9
Capitolul 3: Surse de câmp electromagnetic semnificative în vehicule electrice		11
3.1.	<i>Convertorul static</i>	11
3.2.	<i>Motorul electric</i>	11
3.3.	<i>Bateria de acumulator</i>	11
3.4.	<i>Cabluri ecranate și neecranate</i>	11
3.5.	<i>Mecanisme de cuplaj</i>	12
3.5.1.	<i>Cuplaj galvanic (conductiv)</i>	12
3.5.2.	<i>Cuplaj magnetic (inductiv)</i>	12
3.5.3.	<i>Cuplaj electric (capacitiv)</i>	12
3.5.4.	<i>Cuplaj prin radiație electromagnetică</i>	12
Capitolul 4: Reglementări și standarde de prevenire și expunere		13
4.1.	<i>Reglementări ICNIRP</i>	13
4.2.	<i>Reglementări privind expunerea la câmpul magnetic static</i>	13
4.3.	<i>Standardul de expunere IEEE</i>	14
4.4.	<i>Standarde de compatibilitate electromagnetică în industria auto</i>	14
4.5.	<i>Reglementarea UNECE 10</i>	17
4.6.	<i>Standardul CISPR 25</i>	17
4.6.1.	<i>Sistemele antenelor pentru CISPR 25</i>	17
4.6.2.	<i>Camera ecranată</i>	18
4.7.	<i>Standardul ISO 11452</i>	19
4.8.	<i>Posibile victime ale interferențelor electromagnetice</i>	19
Capitolul 5: Simularea câmpului magnetic în interiorul vehiculului electric		20

5.1.	<i>Mediul de simulare</i>	20
5.2.	<i>Geometria aleasă pentru simularea câmpului magnetic</i>	20
5.3.	<i>Traseu cablu cu întoarcere prin carcasă – construcție asimetrică</i>	21
5.4.	<i>Traseu cablu dus-întors – Construcție simetrică</i>	21
5.5.	<i>Traseu cablu cu întoarcere prin carcasă – construcție simetrică</i>	22
5.6.	<i>Traseu cablu cu întoarcere prin carcasă – construcție simetrică – 0 cm față de podea</i>	22
5.7.	<i>Traseu cablu cu întoarcere prin carcasă – construcție simetrică – 10 cm față de podea</i>	23
5.8.	<i>Traseu cablu cu întoarcere prin carcasă – construcție simetrică – 10 cm față de podea cu scaune</i>	24
5.9.	<i>Simulare câmp magnetic cablu coaxial – construcție asimetrică</i>	26
Capitolul 6: Studiul interacțiunii dintre mediul electromagnetic ambiant și vehiculul electric		27
6.1.	<i>Descrierea mediului electromagnetic ambiant</i>	27
6.2.	<i>Analiza și simularea mediului electromagnetic ambiant exterior vehiculului electric</i>	27
6.3.	<i>Simularea câmpului magnetic produs de o linie de transfer de energie de medie tensiune în prezența unei caroserii</i>	28
6.4.	<i>Analiza mediului electromagnetic ambiant interior habitaculului vehiculului electric</i>	29
6.5.	<i>Măsurarea câmpului electric și magnetic în timpul încărcării unui vehicul electric</i>	30
6.5.1	<i>Măsurarea câmpului electric și magnetic pentru încărcare lentă</i>	31
6.5.2	<i>Măsurarea câmpului electric și magnetic pentru încărcare rapidă</i>	33
Capitolul 7: Măsurări de câmp electromagnetic produs de cablurile de înaltă tensiune din interiorul caroseriei vehiculelor electrice		36
7.1.	<i>Instalația utilizată</i>	36
7.2.	<i>Cazul 1: Ambele cabluri sunt poziționate unul lângă altul în colțul din dreapta al caroseriei</i>	38
7.3.	<i>Cazul 2: Ambele cabluri sunt poziționate unul lângă altul pe centrul caroseriei</i>	41
7.4.	<i>Cazul 3: Cablu dus-întors – Construcție simetrică</i>	43
7.5.	<i>Cazul 4: Un cablu este poziționat în dreapta și unul central</i>	45
Capitolul 8: Concluzii și contribuții personale		47
10.1.	<i>Concluzii generale</i>	47
10.2.	<i>Contribuții personale</i>	49
10.3.	<i>Direcții viitoare de cercetare</i>	50
Lista articolelor publicate		51
Listă Bibliografică		52

Capitolul 1: Concepte Fundamentale

1.1. Introducere

În ultimii ani vehiculele electrice și hibride au început să fie din ce în ce mai populare. Acest lucru este datorat în primul rând preocupărilor crescute legate de emisiile globale de dioxid de carbon, cât și de emisiile locale de gaze de eșapament care fac orașele aglomerate să fie foarte poluate și insuportabil de locuit. Un alt factor important este reprezentat de resursele de petrol în scădere la nivel global. Dacă în trecut vehiculele electrice nu au căpătat o popularitate așa de mare din cauza limitărilor tehnice, evoluțiile în proiectare și îmbunătățirea bateriilor reîncărcabile, motoarelor și controlerelor reprezintă un factor important în dezvoltarea acestora.^[1]

Creșterea complexității sistemelor electrice și electronice ale autovehiculelor, împreună cu înăsprirea reglementărilor legate de consumul de combustibil și emiterea de noxe fac ca asigurarea compatibilității electromagnetice între sistemele electrice, electronice montate pe mașină să fie din ce în ce mai dificilă.

Sistemele electronice ale zilelor noastre conțin mult mai multe componente electronice active comparativ cu cele din trecut. Cum accentul se pune pe eficientizarea consumului de combustibil, vehiculele electrice și hibrid câștigă din ce în ce mai multă popularitate. Aceste tipuri de autovehicule introduc noi probleme la nivel de interferențe electromagnetice din cauza valorilor crescute ale curentului. Sistemele electrice interne care pot afecta funcționarea autovehiculelor pot fi radarul de evitare al coliziunilor, sistemul de navigație – radio, sistemul de servodirecție, pilotul automat, dispozitivul de umflare al airbag-ului, senzorul de presiune de la roți etc.

Pe lângă sursele de interferențe electromagnetice ale sistemelor montate în interiorul mașinilor, avem și sursele de perturbații electromagnetice externe care pot să interfereze cu sistemele electronice ale autovehiculelor. Aceste surse externe pot include sistemele de telecomunicații, transmisiunile radio și TV, sistemele radar, liniile de producere și transport de energie electrică, sistemele electrotehnice, sistemul de deschidere automată a ușilor de la garaj, dar și dispozitive care sunt aduse de pasageri în interiorul autovehiculelor cum ar fi dispozitivele bluetooth, telefonul mobil, jocurile video.^[3]

Cuvinte cheie: *compatibilitate electromagnetică în industria auto, standarde de compatibilitate electromagnetică, vehicule electrice, experimente și simulări câmp magnetic*

1.2. Obiectivele temei propuse

Tema prezentei lucrări de doctorat o reprezintă cercetarea și caracterizarea interferențelor electromagnetice produse de sistemele electrice ale autovehiculelor. Cu ajutorul metodelor de simulare, dar și de măsurare de câmp magnetic se vor evalua valorile inducției magnetice în apropierea cablurilor de înaltă tensiune prezente în vehiculele electrice pentru diverse topologii și interacțiuni cu mediul ambiant. Se va realiza și un set de măsurări de câmp magnetic, respectiv electric în timpul încărcării lente și rapide.

În prezenta lucrare ne vom concentra pe următoarele aspecte:

- Scurt istoric al autovehiculelor;
- Descrierea structurilor constructive de vehicule electrice și hibride;
- Analiza surselor de câmp semnificative în vehiculele electrice;
- Identificarea posibilelor victime ale interferențelor electromagnetice;
- Clasificarea standardelor de compatibilitate electromagnetică în industria auto;
- Simularea câmpului magnetic în interiorul vehiculului electric;
- Studiul și simularea interacțiunii dintre mediul electromagnetic ambiant și vehiculul electric;
- Măsurări de câmp magnetic și electric pentru modul de alimentare al vehiculului electric: încărcare lentă și rapidă;
- Măsurări de câmp electromagnetic produs de cablurile de înaltă tensiune din interiorul caroseriei vehiculelor electrice;
- Compararea rezultatelor obținute în urma simulărilor cu valorile măsurate din cadrul experimentelor privind câmpul magnetic.

1.3. Noțiuni introductive despre compatibilitatea electromagnetică

Compatibilitatea electromagnetică reprezintă abilitatea unui dispozitiv sau sistem de a funcționa în mediul lui electromagnetic, fără să-i fie afectate funcționalitățile și fără să emită perturbații asupra altor echipamente din vecinătate.

Interferențele electromagnetice pot avea efecte variate: o mică perturbație a imaginii de la televizor, o eroare apărută în timpul unui transfer de date sau chiar distrugerea completă și ireversibilă a unui dispozitiv electronic.

Sistemul electric reprezintă o rețea de componente electrice conectate, având scopul de a furniza, transfera și utiliza energie electrică. Mediul electromagnetic ambiant reprezintă toate fenomenele electromagnetice ce există într-o anumită zonă spațială. [32], [33]

Interferența electromagnetică se definește ca o perturbare electromagnetică care întrerupe, degradează sau limitează performanța echipamentelor electronice/electrice. Rezultatul unui fenomen de interferență este o perturbație. [34]

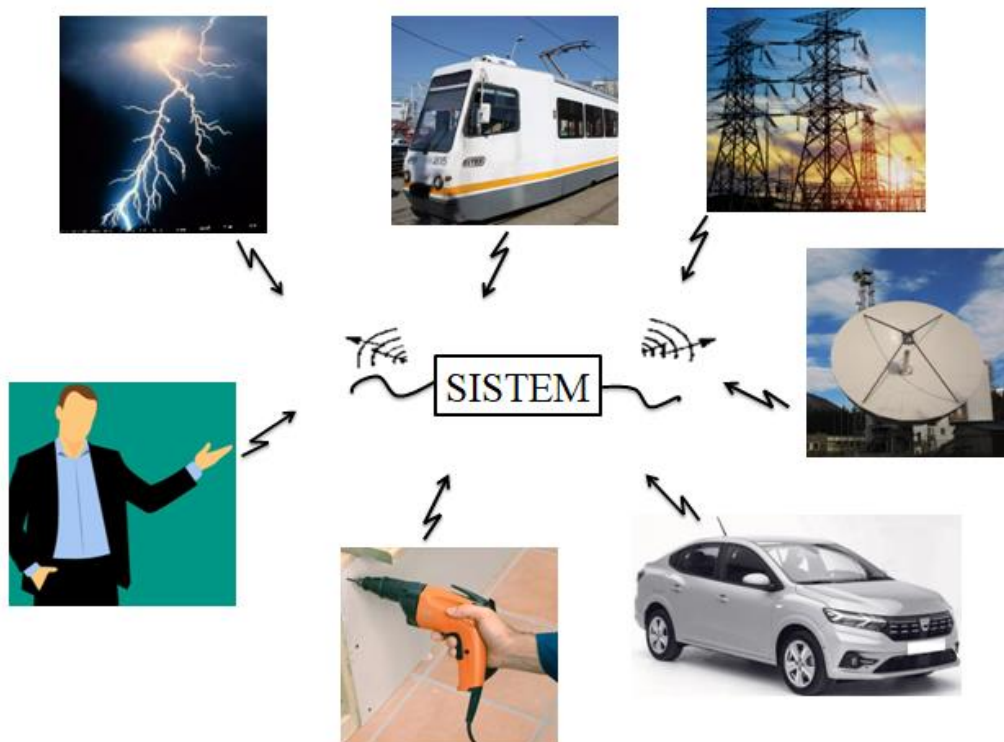


Figura 1.1. *Sistemul electric și spațiul înconjurător*

1.4. Scurt istoric al autovehiculelor electrice

În 1801, Richard Trevithick a construit o trăsură cu aburi, deschizând era mobilității fără cai. După 30 de ani de motoare zgomotoase și murdare cu aburi a fost construit primul vehicul electric cu baterii în 1834.

După 50 de ani a fost construit primul vehicul cu motor cu combustie internă în 1885.

În anii 1910 câteva sute de mii de vehicule electrice au fost produse și utilizate ca vehicule personale, dube, taxiuri și autobuze.

Inventarea starterului electric în 1912 de Charles Kettering, pentru motoarele cu combustie internă a înclinat balanța către autovehiculele cu combustie internă care erau mai ieftine (1908 – Henry Ford produce automobilul cu benzină care costa 290 \$, în timp ce salariul anual al unui muncitor era de 500\$).

În 1970 revenirea vehiculelor electrice începe cu problemele legate de energie cauzate de criza de petrol din Orientul mijlociu.

În ultima parte a secolului XX și începutul secolului XXI vehiculul electric a început să recâștige teren în industria autovehiculelor datorită noilor reglementări legate de protejarea mediului și datorită dezvoltării și îmbunătățirii construcției bateriilor reîncărcabile, motorului și controlerelor.^{[1], [4]}

1.5. Testarea vehiculelor electrice din punctul de vedere al compatibilității electromagnetice

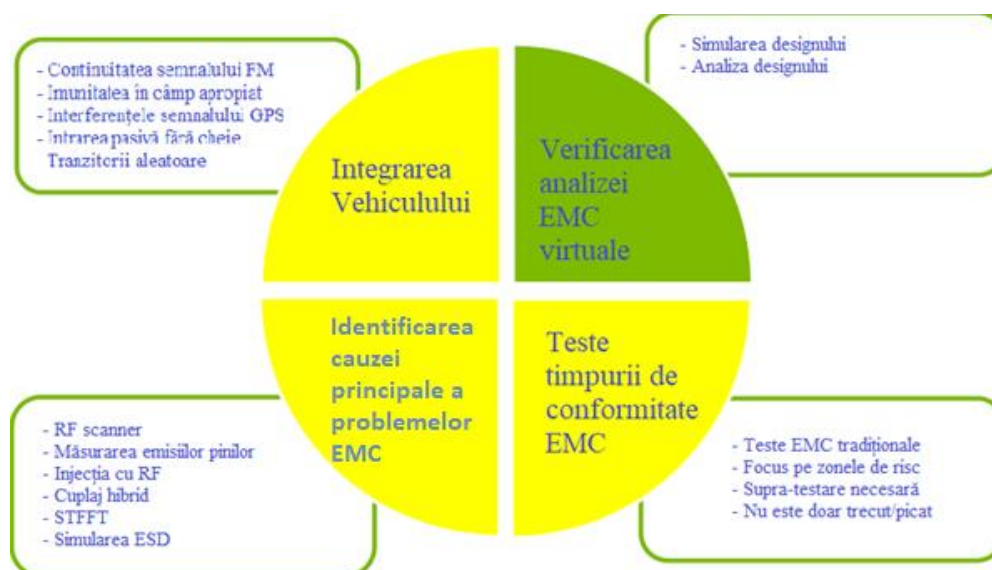


Figura 1.2: Procesul de testare al pre-conformității^[20]

Capitolul 2: Structuri constructive de vehicule electrice

Toate vehiculele sunt dispozitive care funcționează pe principiul conversiei de energie, transformând energia în cuplu mecanic care ulterior ajunge la roți și le învâрте. Într-o mașină convențională, energia este stocată sub formă chimică prin intermediul carburantului din rezervor. În interiorul rezervorului au loc reacții chimice între moleculele de hidrocarbură din combustibil care ard împreună cu oxigenul pentru a elibera căldură. Vehiculele electrice folosesc și ele energia chimică stocată în baterii, pe care o eliberează electrochimic, fără niciun fel de ardere.

2.1. Vehiculul cu baterie electrică (BEV)

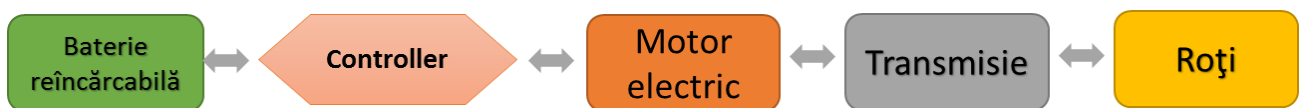


Figura 2.1: Fluxul de energie pentru BEV

2.2. Vehiculul electric hibrid (HEV)

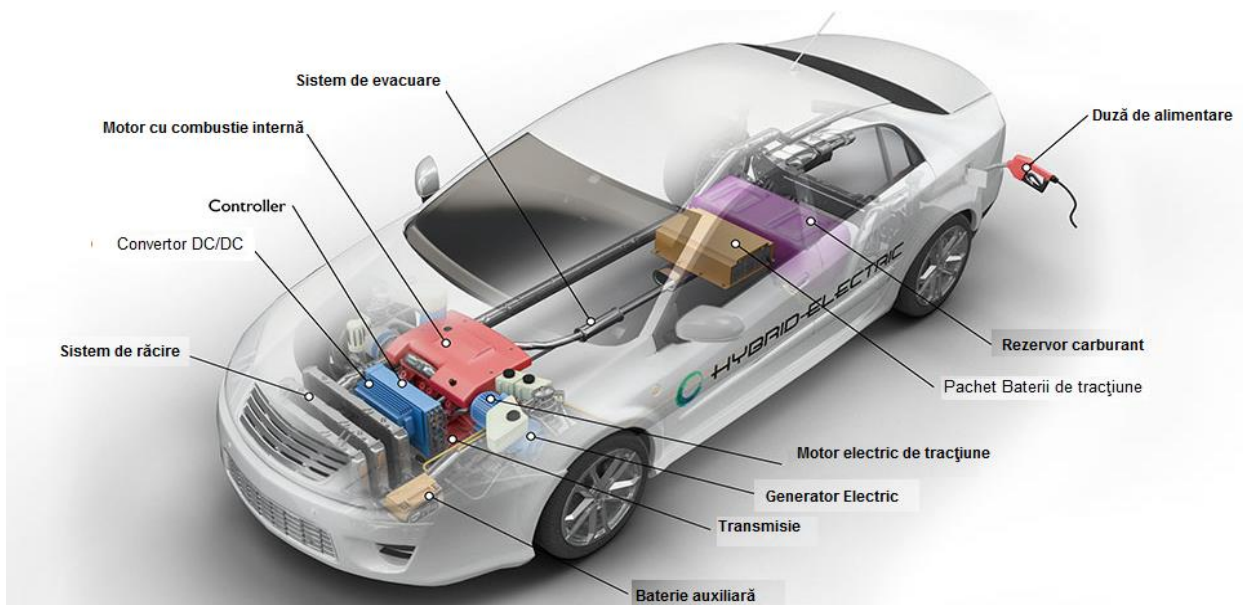


Figura 2.2: Elemente componente ale Vehiculului Electric Hibrid (HEV) ^[5]

2.3. Vehiculul hibrid plug-in (PHEV)

A. PHEV serie



Figura 2.3: Fluxul de energie pentru PHEV-serie

B. PHEV paralel

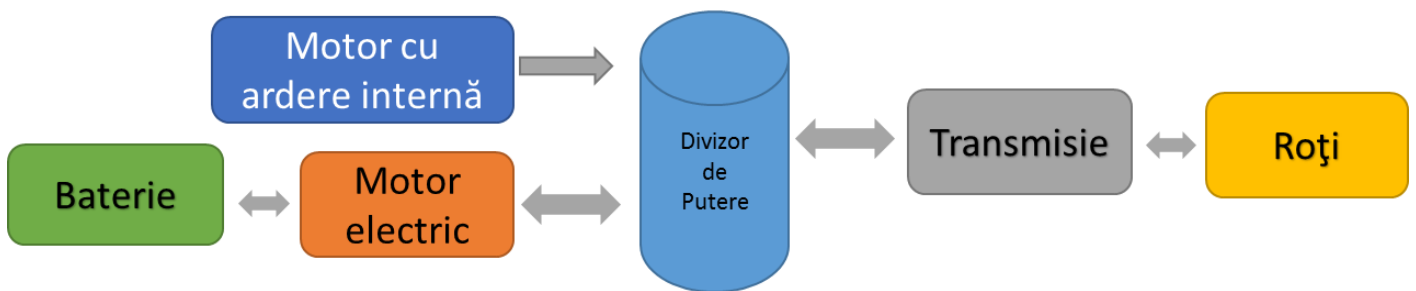


Figura 2.4: Fluxul de energie pentru PHEV-paralel

2.4. Integrarea sistemului electric/electronic în vehiculele electrice

Într-un vehicul electric, rețeaua internă de înaltă tensiune include cel puțin o unitate de stocare a energiei și un convertor electronic. Este foarte important ca rețeaua de înaltă tensiune a vehiculului să fie izolată galvanic de rețeaua de joasă tensiune, dar și de șasiul autovehiculului. Rețeaua de înaltă tensiune trebuie să aibă cabluri izolate și conectori. [24]

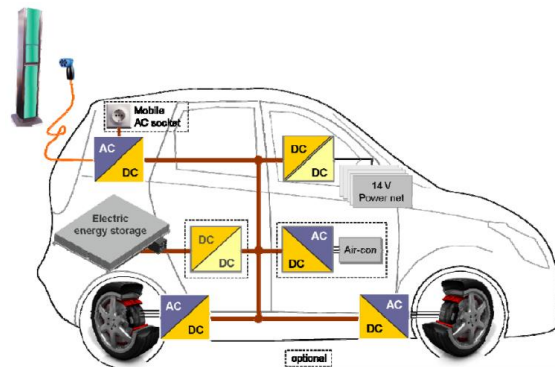


Figura 2.5: Structura de bază a rețelei de înaltă tensiune dintr-un vehicul electric [24]

Această soluție simplă constructivă prezintă numeroase avantaje cum ar fi o bună răcire, accesibilitate în caz de defect, dar toate acestea contrastează cu dezavantajul principal, acela al necesității unei cutii scumpe, destul de mari și dificil de integrat în compartimentul motor deja existent

O soluție alternativă, care elimină toate dezavantajele menționate mai sus este prezentată în figura 2.6. [24]

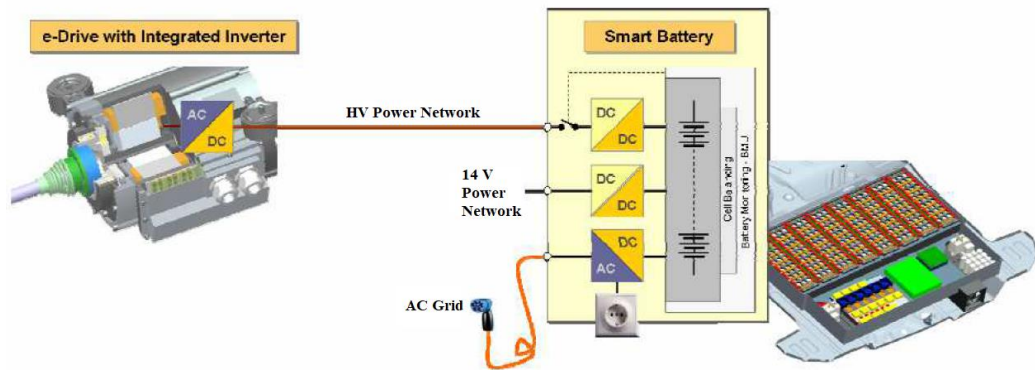


Figura 2.6: Integrarea electronicii de putere direct în motorul de tracțiune [24]

Această soluție este motivată de ideea că poziționarea convertorului de putere la nivelul motorului electric, sau chiar integrarea în acesta, reduce la minimum costurile de implementare, lungimea cablurilor și protejează pasagerii împotriva emisiilor electromagnetice. Restul convertoarelor de energie folosite pentru încărcarea bateriilor, conectarea la rețeaua publică, gestionarea nivelurilor de tensiune devin componente ale bateriei transformate într-o baterie inteligentă.

Capitolul 3: Surse de câmp electromagnetic semnificative în vehicule electrice

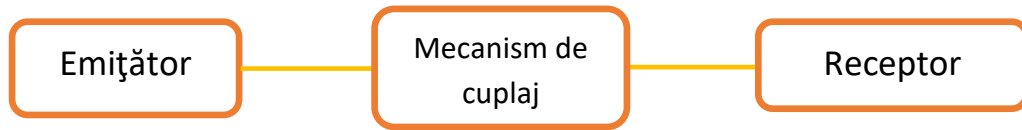


Figura 3.1: Model de interferență

3.1. Convertorul static

Pentru aplicațiile din industria auto sunt esențiale câteva aspecte de proiectare: greutate redusă, eficiență ridicată, volum mic, interferențe electromagnetice scăzute.

3.2. Motorul electric

Motorul electric convertește energia electrică în energie mecanică. Acestea sunt capabile să furnizeze un cuplu mare la pornire chiar și pentru o viteză de 0 km/h.

Motoarele de curent alternativ sunt mai ușoare decât motoarele de curent continuu. Designul controlerului este mai complex. Motorul de inducție trifazat și motorul sincron sunt cele mai utilizate pentru construcția vehiculelor electrice.

3.3. Bateria de acumulator

Tipuri de baterii folosite pentru construcția vehiculelor electrice

- Acumulatorul cu Pb și acid sulfuric
- Acumulatorul Nichel metal hidruură
- Acumulatorul Litiu-Ion ^[8]

3.4. Cabluri ecranate și neecranate

Cablurile magistralei de înaltă tensiune care conectează convertorul de putere cu motorul și sursa de putere trebuie luate în considerare pentru descrierea noului sistem de acționare al vehiculelor electrice.

Din punctul de vedere al compatibilității electromagnetice, sunt linii de înaltă tensiune care transportă tensiuni de până la 900 V.^[8]

Pe lângă interconectarea liniilor, un alt mecanism de cuplaj îl reprezintă interferențele electromagnetice radiate de cablurile de înaltă tensiune în interiorul vehiculului.^[8]

3.5. Mecanisme de cuplaj

Sistemul de acționare al vehiculelor electrice conține câteva componente care sunt conectate doar la noua magistrală de înaltă tensiune. În integrarea noilor componente ale sistemului de acționare trebuie protejat nivelul de interferențe electromagnetice dintre sistemul electric convențional și dispozitivele de joasă tensiune cum ar fi receiverul radio. [8]

Interferența este reprezentată de un transfer neintenționat de energie electromagnetică. Efectul fenomenului de interferență este perturbația.

Interferența de la sursă la receptor este transmisă prin intermediul unuia din următoarele mecanisme de cuplaj: [33]

3.5.1. Cuplaj galvanic (conductiv)

Cuplajul conductiv are loc atunci când calea de cuplare dintre sursă și receptor este formată prin contact electric direct cu un corp conductor. [33]

3.5.2. Cuplaj magnetic (inductiv)

Cuplajul inductiv se referă la fenomenul care există atunci când un câmp magnetic produs de un curent electric într-un circuit induce un efect asupra unui flux magnetic produs de alt circuit. Când acest lucru se întâmplă, cele două fluxuri devin reactive reciproc sau cuplate prin efectele inductive ale câmpurilor magnetice variabile în timp.

3.5.3. Cuplaj electric (capacitiv)

Cuplajul se datorează existenței capacităților parazite. Acest tip de cuplaj apare între conductoarele ce au potențiale electrice diferite. Acest tip de cuplaj poate avea un efect intenționat sau accidental.

3.5.4. Cuplaj prin radiație electromagnetică

Cuplajul prin radiație electromagnetică apare atunci când energia electromagnetică emisă de o sursă se propagă și induce tensiuni și curenți într-un alt circuit din apropiere sau depărtare, câmpul electromagnetic propagându-se cu viteza luminii. [33]

Capitolul 4: Reglementări și standarde de compatibilitate electromagnetică

4.1. Reglementări ICNIRP

Frecvența (Hz)	Intensitatea câmpului electric E (kV/m)	Intensitatea magnetic H (A/m)	Inducția magnetică B (T)
1-8 Hz	5	$3.2 \times 10^4/f^2$	$4 \times 10^{-2}/f^2$
8-25 Hz	5	$4 \times 10^3/f$	$5 \times 10^{-3}/f$
25-50 Hz	5	1.6×10^2	2×10^{-4}
50 Hz-400 Hz	$2.5 \times 10^2/f$	1.6×10^2	2×10^{-4}
400-3 kHz	$2.5 \times 10^2/f$	$6.4 \times 10^4/f$	$8 \times 10^{-2}/f$
3 kHz-10 MHz	8.3×10^{-2}	21	2.7×10^{-5}

Tabel 4.1: Niveluri de referință ICNIRP pentru expunerea publicului la câmpuri magnetice variabile în timp.^[9]

4.2. Reglementări privind expunerea la câmpul magnetic static

În tabelul 4.2 sunt prezentate limitele câmpului magnetic static pentru expunerea ocupațională care se aplică acelor persoane care sunt expuse zilnic la câmp magnetic static din cauza profesiei lor și, de asemenea, pentru publicul larg care se referă la întreaga populație.

Caracteristicile expunerii	Valorile inducției magnetice (B)
<i>Occupational</i>	
Expunerea capului și trunchiului	2T
Expunerea membrelor	8T
<i>Publicul General</i>	
Expunerea oricarei părți a corpului	400 mT

Tabel 4.2. LIMITE DE EXPUNERE LA CÂMPUL MAGNETIC STATIC ^[27]

4.3. Standardul de expunere IEEE

Frecvența (Hz)	Intensitatea câmpului magnetic H (A/m)	Inducția magnetică B (T)
< 0.153 Hz	9.39×10^4	118×10^{-3}
0.153-20 Hz	$1.44 \times 10^4/f$	$18.1 \times 10^{-3}/f$
20-759 Hz	719	0.904×10^{-3}
759-3 kHz	$5.47 \times 10^5/f$	$687 \times 10^{-3}/f$

Tabel 4.3: IEEE - Nivel maxim permis de expunere la câmp magnetic sinusoidal pentru publicul general: cap și torace.^[9]

4.4. Standarde de compatibilitate electromagnetică în industria auto

Nr. Doc.	Titlu	Standard echivalent	Configurația de încercare și cerințele de mediu
SAE J113/11	Imunitatea la tranzitorii conduși pe cablurile de alimentare	ISO 7637-2	Imunitate la fenomenele de conducție tranzitorie în cameră ecranată
SAE J113/12	Interfețe electrice de conducție și cuplaj – clema de cuplare	ISO 7637-3	Imunitate la fenomene de conducție pentru diferite mecanisme de cuplaj în cameră ecranată
ISO 11452 - 10	Vehicule rutiere. Metode de încercare a componentelor pentru perturbații electrice generate de energia electromagnetică radiată în bandă îngustă. Partea 10: Imunitate la perturbații conduse în domeniul de frecvență audio extins	SAE J1113/2	Teste de imunitate la perturbații de conducție 15 Hz – 500 MHz realizate pe banc de test, nefiind nevoie de cameră ecranată
ISO 7637-2	Vehicule rutiere. Perturbări electrice cauzate de conducție și cuplare. Partea 2: Conducere tranzitorie electrică numai de-a lungul liniilor de alimentare	SAE J113/11	Imunitate la fenomenele de conducție tranzitorie aplicate direct surselor de putere realizate pe banc de test, nefiind nevoie de cameră ecranată
ISO 7637-3	Vehicule cu tensiune nominală de alimentare de 12 V sau 24 V - Transmisie electrică tranzitorie prin cuplare capacitivă și inductivă prin alte linii decât liniile de alimentare	SAE J113/12	Imunitatea efectuată pe diferite mecanisme de cuplaj realizate pe banc de test, nefiind nevoie de cameră ecranată

TABELUL 4.4: CERINȚELE DE IMUNITATE CONDUSE PENTRU AUTOVEHICULE ^{[18]. [20]}

Nr. Doc.	Titlu	Standard echivalent	Configurația de încercare și cerințele de mediu
SAE J551/16	Imunitate electromagnetică - Surse din afara vehiculului (Metoda camerei de reverbație) – Partea 16 - Imunitate la câmpuri electromagnetice radiate	-	Este necesară o cameră dimensionată de reverberație pentru vehicule.
SAE J551/17	Imunitatea electromagnetică a vehiculului – Câmpuri magnetice din jurul liniilor de putere	-	Testarea de imunitate la radiațiile câmpului magnetic. Nu e necesară o cameră ecranată
SAE J113/4	Imunitate la câmpurile electromagnetice radiate – Metoda injecției de curent în fascicul	ISO 11452-4	Imunitate la perturbații radiate folosind metoda BCI (Bulk current injection). Cameră ecranată.
SAE J113/27	Procedură de măsurare a compatibilității electromagnetice pentru componentele vehiculului. Partea 27: Imunitate la câmpuri electromagnetice radiate - Metodă de reverberare a amestecului în modul	-	Designul camerei de reverberare este bazat pe SAE J1113 / 27 -1995 sau echivalent standardul general de inginerie al motoarelor
ISO 11451-2	Vehicule rutiere. Metode de încercare a vehiculelor pentru perturbări electrice generate de energie electromagnetică radiată pe bandă îngustă. Partea 2: Surse de radiații în afara vehiculului	SAE J551-11	Test de imunitate radiată a vehiculului într-o cameră anecoică
ISO 11451-3	Partea 3: Simulare emițător la bord	SAE J551-12	O încăpere anecoică pentru vehicule este necesară
ISO 11451-4	Partea 4: Injecție de curent în fascicul	SAE J551/13	Testul a fost dedicat mașinărilor sau vehiculelor prea mari să încapă într-o încăpere standard de testare pentru vehicule. Spațiu de testare în aer liber (OTS) sau cameră anecoică pentru vehicule
ISO 11452-2	Vehicule rutiere. Metode de încercare a componentelor pentru perturbații electrice generate de energia electromagnetică radiată în bandă îngustă. Partea 2: Cameră anecoică	SAE J1113/21	Este necesară o cameră anecoică, de antene și generatoare de câmp care să acopere gama necesară. Nu este nevoie de scanare
ISO 11452-3	Partea 3: Celulă transversală electromagnetică (TEM)	SAE J1113/24	Celulă TEM
ISO 11452-4	Partea 4: Injecție de curent în fascicul	SAE J1113/4	Imunitate la perturbații radiate folosind metoda BCI (Bulk current injection). Este necesară camera ecranată
ISO 11452-5	Partea 5: Stripline (ghid de undă tip bandă)	SAE J1113/23	Imunitate la perturbații radiate folosind metoda cu

			ghid de undă tip bandă. Este necesară camera ecranată
ISO 11452-7	Partea 7: Injecție de putere RF directă	SAE J1113/3	Test de imunitate la fenomene de conducție 250 kHz – 500 MHz. Banc de test sau cameră ecranată
ISO 11452-8	Partea 8: Imunitate la câmpuri magnetice	SAE J1113/22	Sunt folosite bobinele Helmholtz. Banc de test, nu e nevoie de cameră ecranată
ISO 11452-9	Partea 9: Transmițătoare portabile	-	Sunt utilizate antene mici împreună cu amplificatoare și surse de semnal pentru a simula transmițătoarele portabile în cameră anecoică
ISO 11452-10	Partea 10: Imunitate la perturbații de conducție în domeniul extins de frecvență audio	SAE J1113/2	Test de imunitate la perturbații de conducție 15 Hz – 500 MHz. Banc de test
ISO 11452-11	Partea 11: Camera de reverberație	SAE J1113/28	Cameră de reverberație

TABELUL 4.5. CERINȚE DE IMUNITATE RADIATE ÎN AUTOMOTIVE ^{[18], [20]}

Nr. Doc.	Titlu	Standard echivalent	Configurația de încercare și cerințele de mediu
SAE J551/5	Metode și niveluri de performanță a măsurărilor intensității câmpului magnetic și electric de la vehiculele electrice, 150 kHz – 30 MHz	Se lucrează la CISPR36 pentru a acoperi RE < 30 MHz pentru vehicule electrice	Cameră anecoică pentru vehicule
CISPR12	Vehicule, bărci și motoare cu combustie internă – Caracteristici de perturbații radio – Limite și metode de măsurare pentru receptoarele din afara vehiculelor	SAE J551/2	Emisii radiate ale vehiculelor. Spațiu de testare în aer liber (OTS) sau cameră anecoică pentru vehicule
CISPR25	Vehicule, bărci și motoare cu combustie internă – Caracteristici de perturbații radio – Limite și metode de măsurare pentru protejarea receptorilor montate la bord	SAE J551/4	Clauza 5: Partea de testare vehicul a standardului. Aceasta este pentru a măsura cantitatea de zgomot generată de vehicul care va fi indusă în receptorul portului antenei montate la bord. Cameră anecoică pentru vehicule
CISPR25	Vehicule, bărci și motoare cu combustie internă – Caracteristici de perturbații radio – Limite și metode de măsurare pentru protejarea receptorilor montate la bord	SAE J1113/41	Clauza 6: Secțiunea de testare pe componente (module) unde emisiile conduse și radiate sunt măsurate. Cameră anecoică

TABELUL 4.6. STANDARDE PENTRU EMISII RADIATE ÎN INDUSTRIA AUTO ^{[18], [20]}

Nr. Doc.	Titlu	Standard echivalent	Configurația de încercare și cerințele de mediu
SAE J551 /15	Imunitatea electromagnetică a vehiculului – Descărcări electrostatice (ESD)	ISO-10605 Clauza 10	Testul ESD la nivelul vehiculului nu ar avea nevoie de o cameră ecranată.
SAE J1113 /13	Proceduri de compatibilitate electromagnetică pentru componentele vehiculelor – Imunitate la descărcări electrostatice	ISO-10605	Testarea ESD efectuată pe un banc de test într-un mediu controlat d.p.d.v. al temperaturii și umidității
ISO -10605	Vehicule rutiere – Metode de testare pentru perturbații electrice cauzate de descărcări electrostatice	SAE J551 /15 SAE J1113 /13	Testarea ESD efectuată pe un modul pe un banc de test într-un mediu controlat d.p.d.v. al temperaturii și umidității

TABELUL 4.7. STANDARDE PENTRU DESCĂRCAREA ELECTROSTATICĂ ÎN INDUSTRIA AUTO^{[18], [20]}



4.5. Reglementarea UNECE 10




Din punctul de vedere al reglementărilor R10.05 sunt două categorii de teste pentru radiațiile interferențelor electromagnetice: emisii de bandă largă (broadband → BB) cauzate de sistemele de aprindere, motoare de curent continuu și sisteme de încărcare la bordul mașini și emisii de bandă îngustă (narrowband → NB) produse de convertoare de putere, armonicile semnalului de ceas sau orice nu reprezintă arc sau aprindere. Limitele sunt definite atât pentru vehicul în ansamblul lui, cât și pentru testarea la nivel de componente. ^[17]

4.6. Standardul CISPR 25

4.6.1. Sistemele antenelor pentru CISPR 25

În tabelul 6.5 sunt prezentate o parte din antenele de câmp electric folosite de CISPR25 și gama de frecvență în care funcționează.

Tipul antenei		Domeniul de frecvență tipic	
Electrică	Biconică	30 MHz – 300 MHz	
	Log-periodică	200 MHz – 1 GHz	

	Hibridă (BiLog, BiConiLog)	30 MHz – 1 GHz	
	Horn	1 GHz – 2.5 GHz	
Magnetică	Bucă, Cadru	9 kHz – 30 MHz	

Tabel 4.8.: Antene de bandă largă pentru teste CEM ^{[16][17]}

4.6.2. Camera ecranată

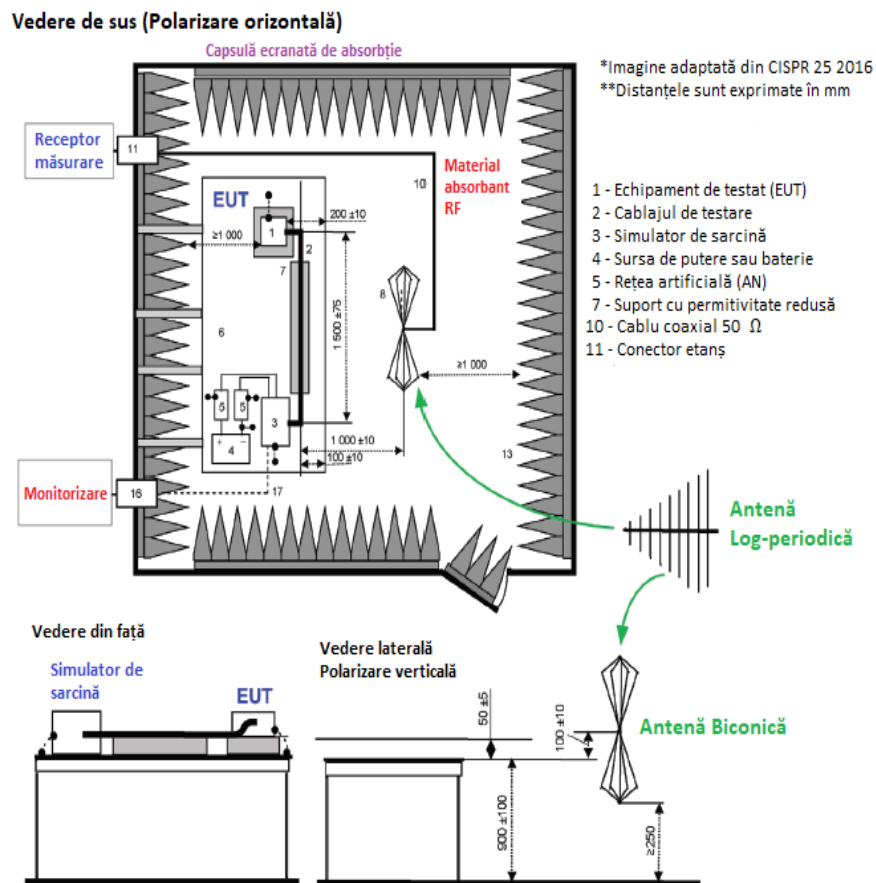


Figura 4.1: CISPR 25 Structura de măsurare a emisiilor radiate cu antenă biconică (30 MHz – 300 MHz) sau cu antenă log-periodică (200 MHz – 1 GHz) ^[17]

4.7. Standardul ISO 11452



Figura 6.2: Metode de testare ISO 11452: Celula TEM, metoda stripline, metoda BCI^[19]

4.8. Posibile victime ale interferențelor electromagnetice

În cazul vehiculelor electrice, pasagerii stau foarte aproape de sistemele electrice ce au puteri semnificative, de obicei pentru perioade considerabile de timp. Sistemul de acționare al vehiculelor electrice este un sistem electric cu o putere electrică considerabilă variind între 40 până la 120 kW. Aceste niveluri de putere sunt atinse îndeosebi prin curenți mari decât prin tensiuni mari. Majoritatea vehiculelor electrice comerciale lucrează cu tensiuni în jurul valorii de 400 V, care implică curenți de sute de amperi. Aceasta înseamnă că sistemul de tracțiune poate genera câmp magnetic puternic comparat cu alte surse convenționale.

Alt efect ce apare se numește radiație electromagnetică și aparține domeniului cunoscut ca bioelectromagnetism care studiază interacțiunea între câmpurile electromagnetice și sistemele biologice. Radiație electromagnetică este în principial împărțită în radiație ionizantă și neionizantă, în funcție de capacitatea de a ioniza atomii și de a sparge legăturile chimice. Granița dintre radiația ionizantă și cea neionizantă este localizată în domeniul ultraviolet al spectrului electromagnetic. În acest sens toate radiațiile electromagnetice emise de un vehicul electric sunt neionizante.^[9]

Încărcarea rapidă a bateriilor reprezintă o altă situație în care pasagerii pot fi expuși sau chiar și pietonii din proximitatea vehiculului. Cum tehnologia bateriilor s-a dezvoltat, rate mai mari de încărcare sunt atinse, ceea ce implică curenți mai mari, deci câmpuri magnetice mai puternice. Ca regulă generală, în timpul încărcării rapide este recomandat ca pasagerii să stea în afara vehiculului, la ceva distanță de acesta.

Capitolul 5: Simularea câmpului magnetic în interiorul vehiculului electric

5.1. Mediul de simulare

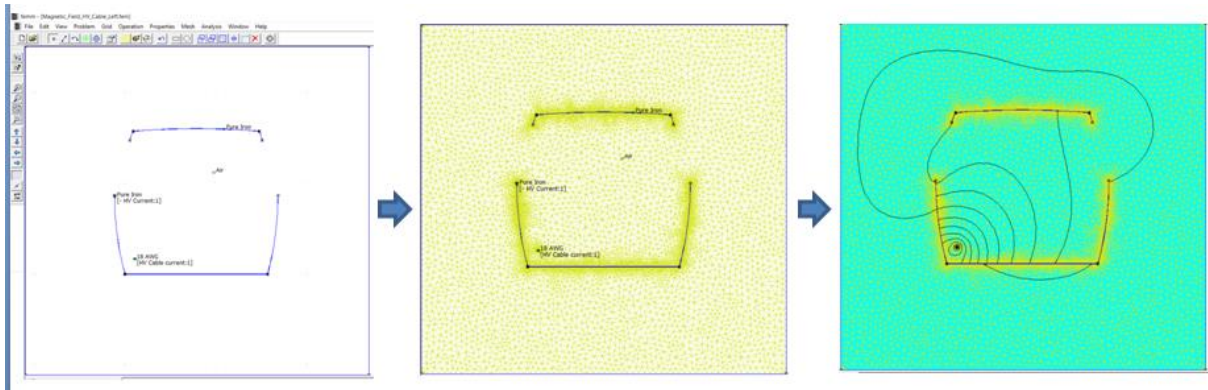


Figura 5.1: Cele trei părți ale programului FEMM

În figura 5.1 se descriu cele trei părți ale programului FEMM aplicate geometriei alese. În imaginea din stânga este reprezentată geometria aleasă, materialele folosite, elementele de circuit și proprietățile problemei magnetice. În figura din mijloc este reprezentat modelul ales împărțit într-un număr mare de triunghiuri. În figura din dreapta poate fi observată reprezentarea câmpului magnetic.

5.2. Geometria aleasă pentru simularea câmpului magnetic

O vedere frontală a vehiculului electric va fi utilizată pentru a simula câmpul magnetic produs de cablul de înaltă tensiune care conectează motorul electric de sistemul de baterii. Ca dimensiuni de referință, BMW i3 a fost luat ca exemplu pentru geometria simulării așa cum se poate vedea și în figura 5.2.

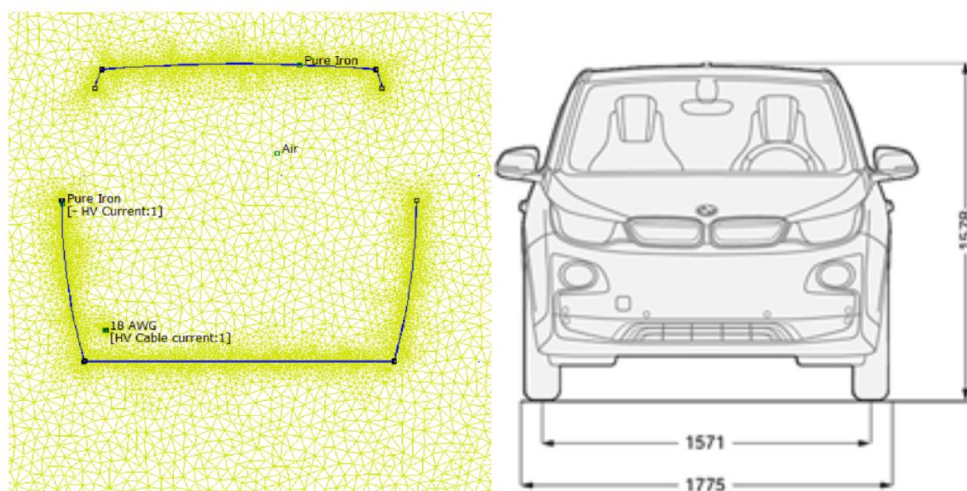


Figura 5.2: Geometria simulării – geometria modelului [30]

5.3. Traseu cablu cu întoarcere prin carcasă – construcție asimetrică

În figura 5.3 se poate observa cum sunt concentrate liniile de câmp magnetic în jurul cablului de înaltă tensiune, închizându-se prin caroserie. Dacă studiem legenda putem observa că valorile inducției magnetice pot ajunge în configurația de față până la 0.1997 T, valoare ce este atinsă în interiorul caroseriei.

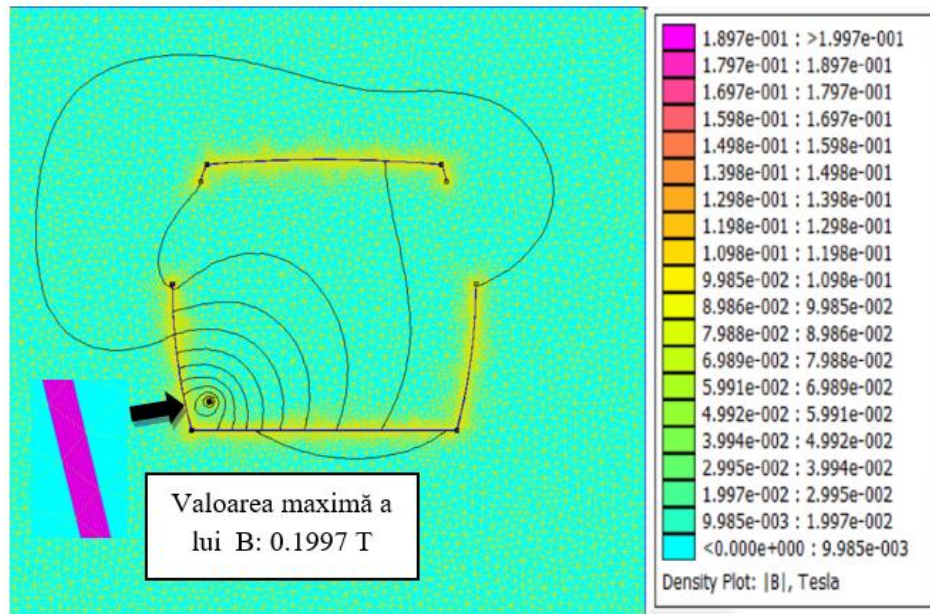


Figura 5.3: Reprezentarea câmpului magnetic – construcție asimetrică ^[30]

5.4. Traseu cablu dus-întors – Construcție simetrică

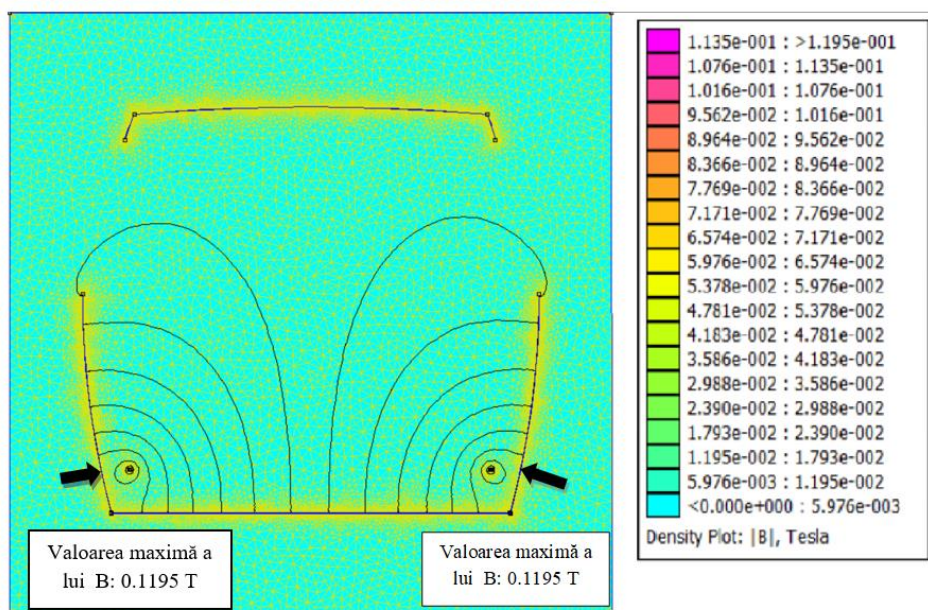


Figura 5.4: Câmpul magnetic pentru construcție simetrică – Cablu dus-întors

În Figura 5.4 se poate observa cum liniile de câmp magnetic sunt concentrate în jurul cablurilor și se închid prin carcasa mașinii. Valorile câmpului magnetic iau valori de până la 0.1195 [T].

Comparând cazul construcției simetrice (cablu dus-întors) cu cel asimetric putem observa că în cazul construcției simetrice valoarea maximă atinsă în caroseria mașinii ia valori mai mici cu 0.2 [mT].

5.5. Traseu cablu cu întoarcere prin carcasă – construcție simetrică

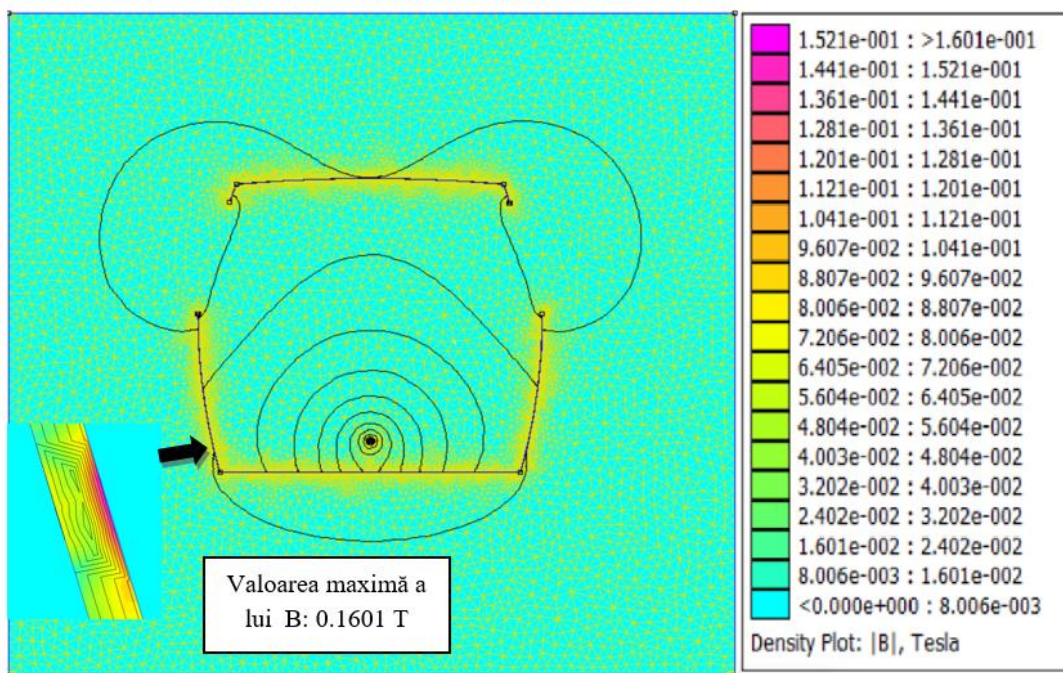


Figura 5.5: Reprezentarea câmpului magnetic – construcție simetrică

Comparând cu primul caz valorile maxime atinse pentru inducția magnetică, putem observa că obținem o inducție magnetică mai mică cu aproximativ 0.04 T.

5.6. Traseu cablu cu întoarcere prin carcasă – construcție simetrică – 0 cm față de podea

În acest caz, cablul de înaltă tensiune ce conectează motorul electric, ce are invertorul integrat, de sistemul inteligent al bateriilor, va fi poziționat la 0 cm față de podeaua vehiculului, simetric, pe mijlocul mașinii cu întoarcere prin caroserie. Astfel în interiorul cablului din cupru a fost atribuit un circuit pozitiv de 100 A, iar în interiorul caroseriei din fier a fost atribuit un circuit negativ de -100 A.

În Figura 5.6 se poate observa distribuția liniilor de câmp magnetic din apropierea cablului și nu numai. Cu această topologie valorile inducției magnetice ajung până la 0.295 T.

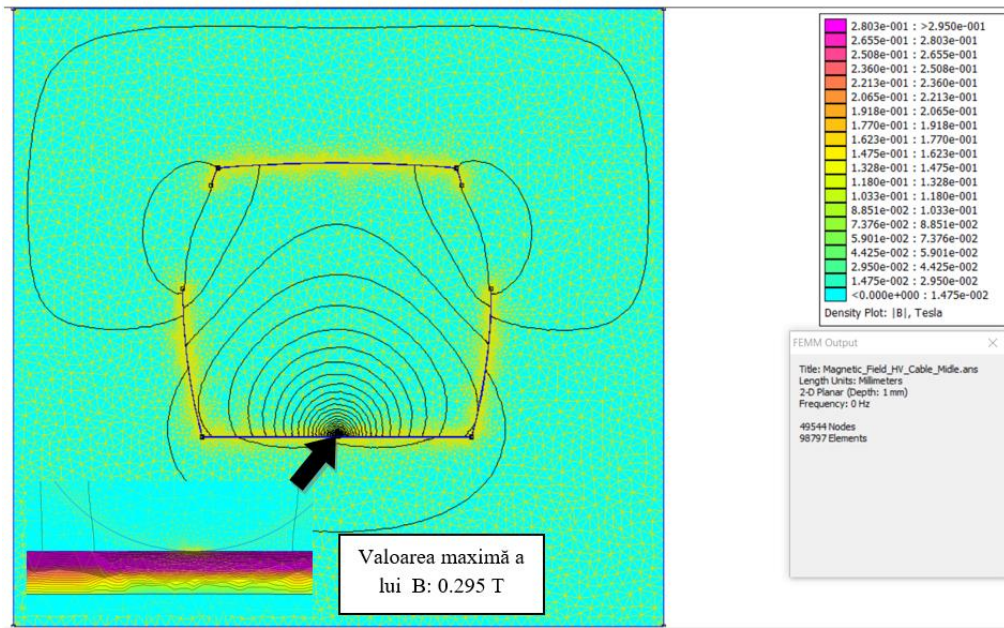


Figura 5.6: Reprezentarea câmpului magnetic – construcție simetrică – 0 cm față de podea

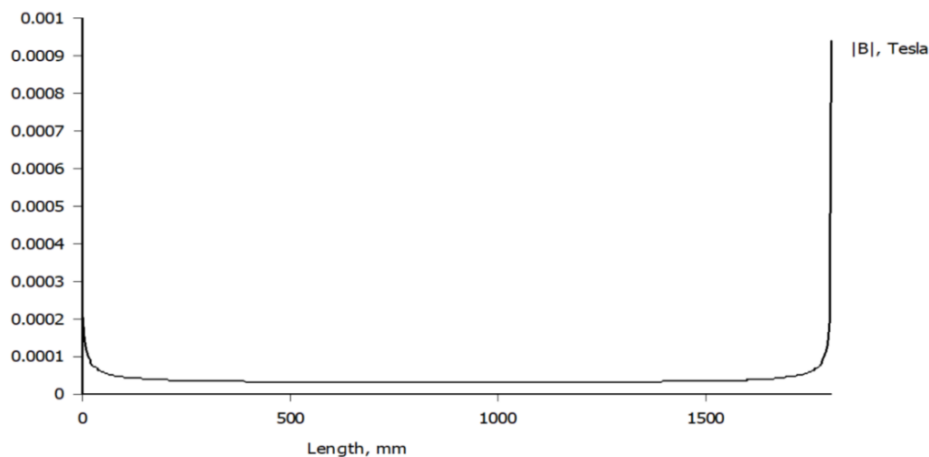


Figura 5.7: Reprezentarea grafică a valorilor campului magnetic la nivelul inferior al geamurilor din interiorul vehiculului electric

5.7. Traseu cablu cu întoarcere prin carcasă – construcție simetrică: 10 cm față de podea

Cablul de înaltă tensiune ce conectează motorul electric de sistemul inteligent al bateriilor, va fi poziționat la 10 cm de podeaua vehiculului având închidere prin caroseria mașinii. Și în acest caz în interiorul cablului din cupru a fost atribuit un circuit pozitiv de 100 A, iar în interiorul caroseriei din fier a fost atribuit un circuit negativ de -100 A.

În figura 5.8 se poate observa cum sunt concentrate liniile de câmp magnetic în jurul cablului de înaltă tensiune, închizându-se prin caroserie. Dacă studiem legenda putem observa că valorile inducției magnetice pot ajunge în configurația de față până la 0.1883 T, valoare ce este atinsă în interiorul caroseriei.

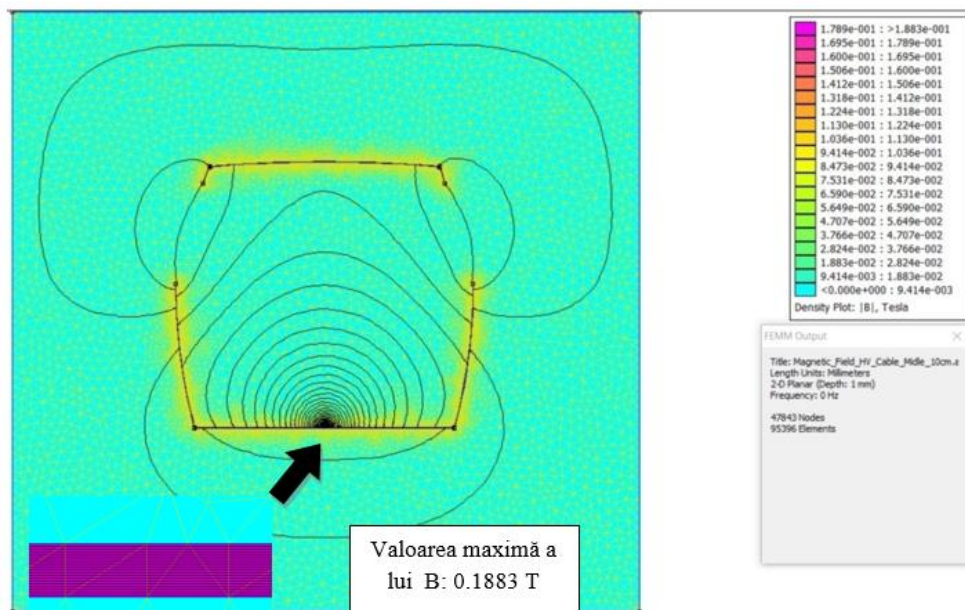


Figura 5.8: Reprezentarea câmpului magnetic – construcție simetrică – 10 cm față de podea

Comparând cu studiul de caz în care avem construcție simetrică și cablul poziționat la 0 cm față de podea valorile maxime atinse pentru inducția magnetică, putem observa că obținem o inducție magnetică mai mică cu aproximativ 0.1 T.

5.8. Traseu cablu cu întoarcere prin carcasă – construcție simetrică – 10 cm față de podea cu scaune

În acest caz, cablul de înaltă tensiune ce conectează motorul electric de sistemul inteligent al bateriilor, va fi poziționat la 10 cm de podeaua vehiculului având închidere prin caroseria mașinii și va fi reprezentat și cadrul metalic al scaunelor. Și în acest caz în interiorul cablului din cupru a fost atribuit un circuit pozitiv de 100 A, iar în interiorul caroseriei din fier a fost atribuit un circuit negativ de -100 A.

În figura 5.9 se poate observa cum sunt concentrate liniile de câmp magnetic în jurul cablului de înaltă tensiune, închizându-se prin caroserie și prin cadrul metalic al scaunelor. Dacă studiem legenda putem observa că valorile inducției magnetice pot ajunge în configurația de față până la 0.2527 T, valoare ce este atinsă în interiorul caroseriei.

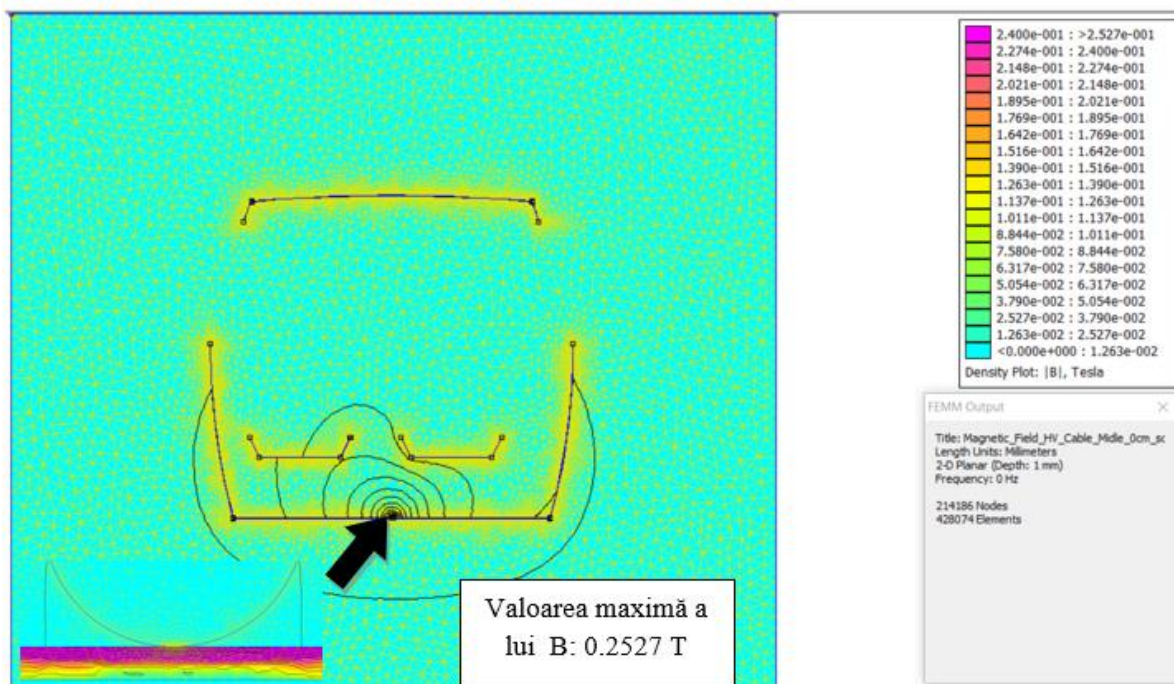


Figura 5.9: Reprezentarea câmpului magnetic – construcție asimetrică 10 cm față de podea cu scaune

Comparând cu celelalte două cazuri în care am analizat construcția simetrică la 0 cm respectiv 10 cm față de podea, valorile maxime atinse pentru inducția magnetică, putem observa că obținem o inducție magnetică mai mică cu aproximativ 0.04 T față de cazul cu 0 cm și mai mare cu 0.06 T comparativ cu cel poziționat la 10 cm față de podea.

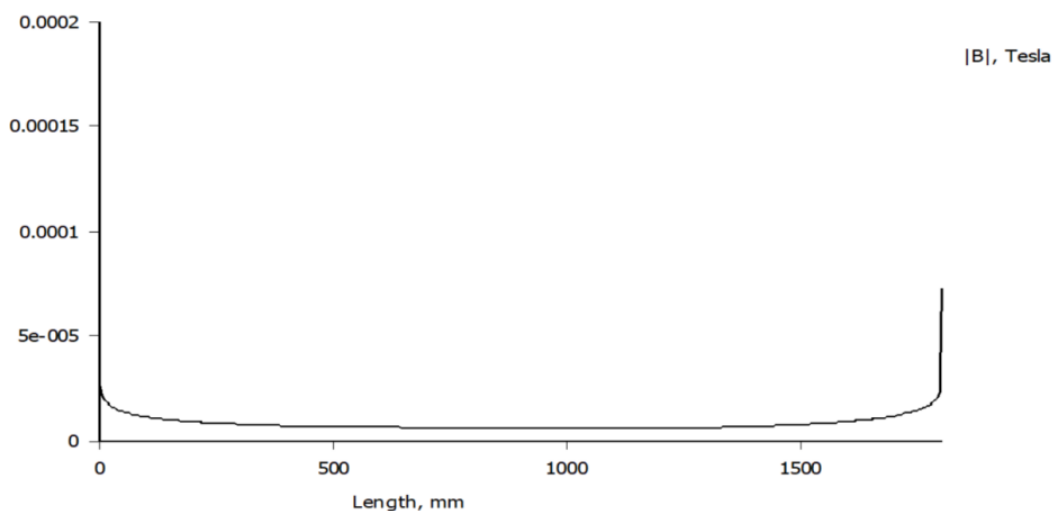


Figura 5.10: Reprezentarea grafică a valorilor câmpului magnetic la nivelul inferior al geamurilor din interiorul vehiculului electric

5.9. Simulare câmp magnetic cablu coaxial – construcție asimetrică

În tabelul 5.1 sunt prezentate dimensiunile fiecărui strat ale cablului coaxial și, de asemenea, a materialelor utilizate. Cablul coaxial simulat are un conductor interior de cupru, acoperit cu izolație din cauciuc siliconic, izolat de un scut de cupru care este îmbrăcat de un alt strat de cauciuc siliconic.

	Conductor de cupru	Izolație cauciuc siliconic	Scut de Cupru	Izolație cauciuc siliconic
<i>Grosime [mm]</i>	8.5	2	0.252	3.438

Tabel 5.1: Straturi cablu coaxial

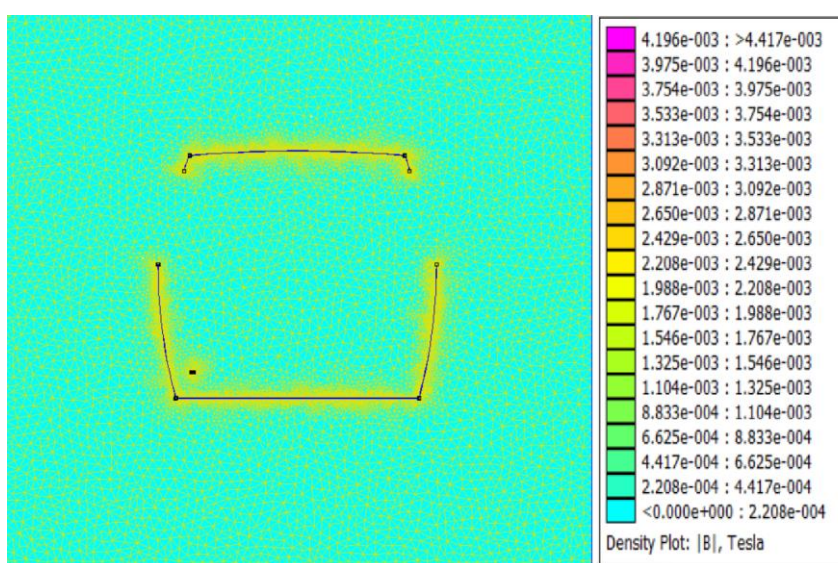


Figura 5.11: Reprezentarea câmpului magnetic – cablu coaxial în construcție asimetrică

Se poate observa că, în cazul cablului coaxial pentru construcție asimetrică, liniile fluxului magnetic se închid în interiorul cablului, atingând valori maxime de 4.417 mT.

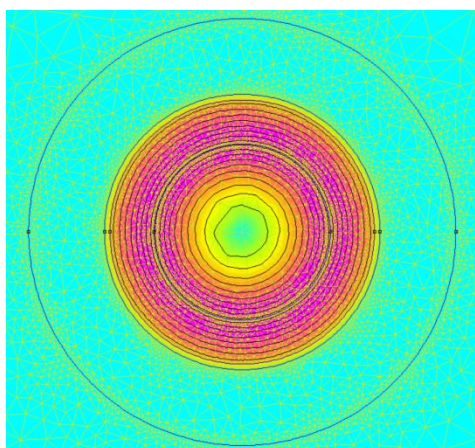


Figura 5.12: Reprezentarea câmpului magnetic în interiorul cablului coaxial ^[30]

Capitolul 6: Studiul interacțiunii dintre mediul electromagnetic ambiant și vehiculul electric

6.1. Descrierea mediului electromagnetic ambiant

Spectrul electromagnetic acoperă undele electromagnetice cu frecvențe cuprinse între 1 [Hz] și 1025 [Hz]. În figura 6.1 se poate observa distribuția de câmp electromagnetic de la radio la raze Gamma.^[28]

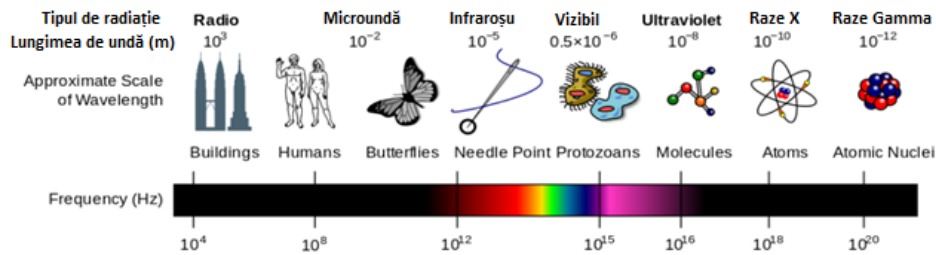


Figura 6.1: Spectrul electromagnetic ^[29]

6.2. Analiza și simularea mediului electromagnetic ambiant exterior vehiculului electric

Cu ajutorul programului FEMM, a fost realizată simularea câmpului magnetic produs de o linie de distribuție a energiei de 20 [kV]. Cele 3 conductoare active ale unui stâlp reprezentat în 2D au fost poziționate la o înălțime de 7m de la sol. Diametrul conductoarelor a fost ales să fie de 20 mm, iar curentul care curge prin cabluri are valorile $I_1 = 310\sqrt{3}$ [A], $I_2 = -310/2$ [A], $I_3 = -310/2$ [A]. Simularea a fost efectuată la 50 Hz, având curent alternativ.

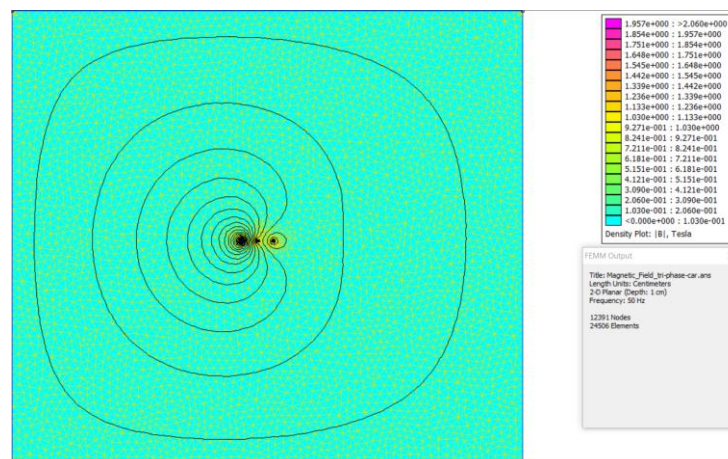


Figura 6.2: Distribuția câmpului magnetic al unei linii de distribuție trifazată MT ^[31]

Se poate observa din figura 6.2, cum sunt distribuite liniile câmpului magnetic în jurul liniei de alimentare trifazate. În partea dreaptă este reprezentată legenda care arată că valoarea maximă atinsă în acest caz este de 2.06 [T]. În figura 6.3 se arată distribuția câmpului magnetic în interiorul unuia dintre cei 3 conductori. Valoarea maximă de 2,06 [T] este atinsă pe conturul cablului.

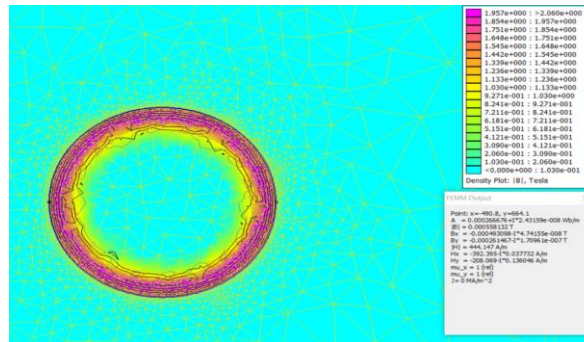


Figura 6.3: Distribuția câmpului magnetic în interiorul unui conductor al liniei electrice [31]

6.3. Simularea câmpului magnetic produs de o linie de transfer de energie de medie tensiune în prezența unei caroserii

În acest caz, a fost introdusă o caroserie de vehicul. Pentru moment, nu a fost atribuit niciun circuit de curent în carcasă, scopul fiind de a vedea modul în care mediul electromagnetic interacționează cu structura vehiculului. În figura 6.4 este reprezentată interacțiunea câmpurilor magnetice între linia de transfer de putere de MT și o cabină de vehicul. Se poate observa că liniile de densitate ale fluxului magnetic nu se intersectează cu caroseria mașinii.

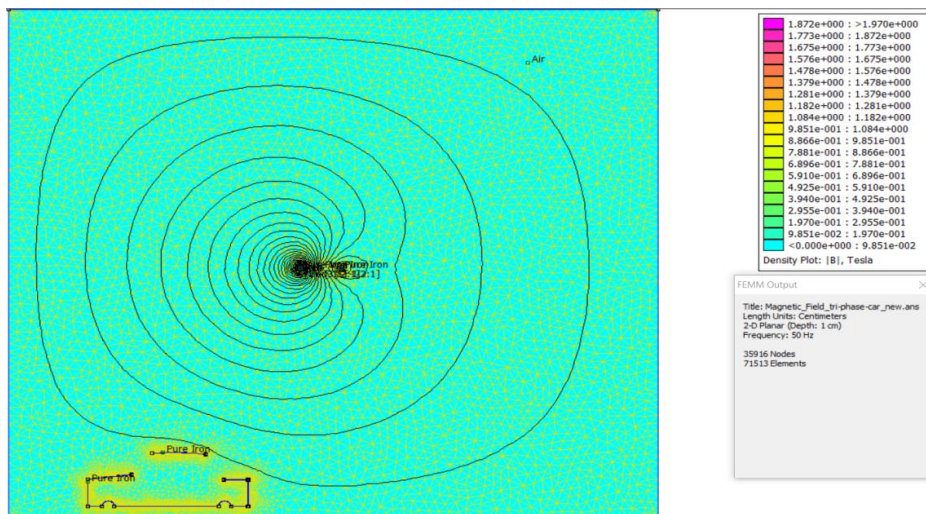


Figura 6.4: Interacțiunea câmpului magnetic între rețeaua electrică și o caroserie [31]

În Figura 6.5 se poate observa cum sunt distribuite liniile de densitate ale fluxului de câmp magnetic lângă conturul cablului. Valoarea maximă de 1,97 [T] este atinsă în interiorul conductorului de pe conturul acestuia.

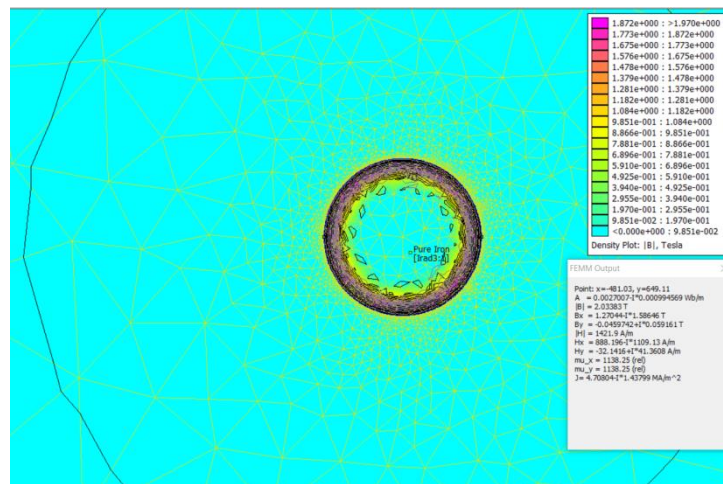


Figura 6.5: Distribuția câmpului magnetic în interiorul unui conductor al liniei electrice în prezența cabinei EV [31]

6.4. Analiza mediului electromagnetic ambiant interior habitaculului vehiculului electric

Vehiculele electrice prezintă în principal 3 surse principale de radiații ale câmpului magnetic: - sistemul inteligent de baterii care include convertoarele de putere utilizate pentru încărcarea bateriei, conectarea la rețeaua electrică și gestionarea nivelurilor de tensiune;

- motorul electric care poate avea inverterul integrat direct în acesta;
- rețeaua de înaltă tensiune a mașinii care interconectează sistemul de baterii inteligente de motorul electric.

Pentru acest caz, în simulare s-a introdus o caroserie de vehicul electric în care a fost introdus un cablu de înaltă tensiune, cu un diametru de 8 [mm] și valoarea curentului de 100 [A].

În figura 6.6 se poate observa modul în care sunt distribuite liniile de flux magnetic. În legendă putem vedea că valoarea maximă pentru densitatea fluxului de câmp magnetic ia valori de până la 2.061 [T], valoare obținută în interiorul conductoarelor liniei de alimentare.

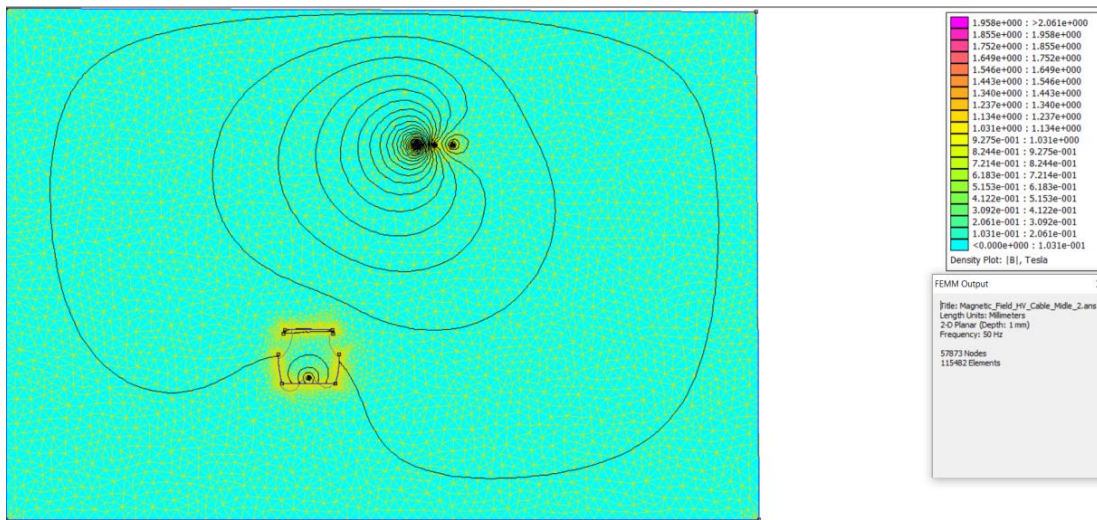


Figura 6.6: Interacțiunea dintre câmpurile magnetice ale sursei de alimentare și rețeaua ÎT a vehiculului electric în construcție simetrică [31]

6.5. Măsurarea câmpului electric și magnetic în timpul încărcării unui vehicul electric

În primul caz seturile de măsurări evidențiază valorile câmpului magnetic și electric pentru modul de încărcare lentă, fiind folosit un încărcător Type 2, în plaja de frecvență 0 – 100 [Hz]. Puterea de încărcare este de 3,6 [kW] curent alternativ. Pentru încărcarea completă a bateriei este nevoie de 11 ore 45 minute.

În cel de-al doilea caz am studiat valorile câmpului electric și magnetic pentru modul de încărcare rapid, fiind folosit un încărcător tip Chademo, în plaja de frecvență 0 – 100 [Hz]. Puterea de încărcare maximă este de 46 [kW] în curent continuu. Pentru încărcarea completă a bateriei este nevoie de 40 minute.

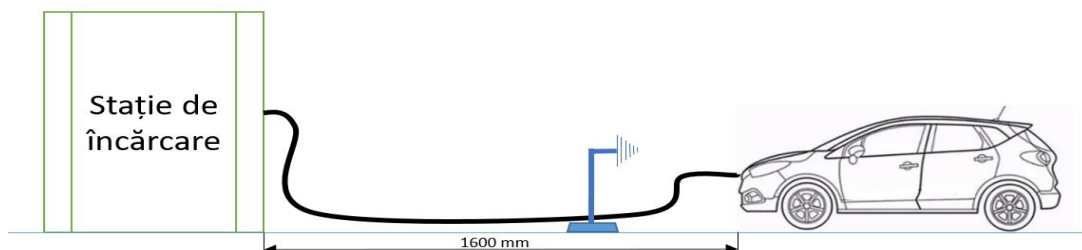


Figura 6.7: Schemă vehicul în modul de încărcare cuplat la rețeaua de alimentare electrică

6.5.1. Măsurarea câmpului electric și magnetic pentru încărcare lentă

Pentru acest prim set de măsurări ale câmpului electric și magnetic, am folosit un încărcător Type 2 conectat direct la 230 [V] priză convențională. Măsurările s-au realizat pe durata de 1 minut, în plaja de frecvență 0 - 100 [Hz] pentru încărcare lentă în curent alternativ.

În figura 6.8 am reprezentat valorile intensității câmpului electric și inducției magnetice, având antena poziționată lângă conectorul de încărcare al mașinii.

Din graficul reprezentat putem vedea că valoarea maximă obținută pentru intensitatea câmpului electric este de 111.15 [V/m], valoarea obținută la 50.05 [Hz]. Valoarea maximă a inducției magnetice este de asemenea atinsă la frecvența de 50.05 [Hz] și are valoarea de 0.0397 [μ T].

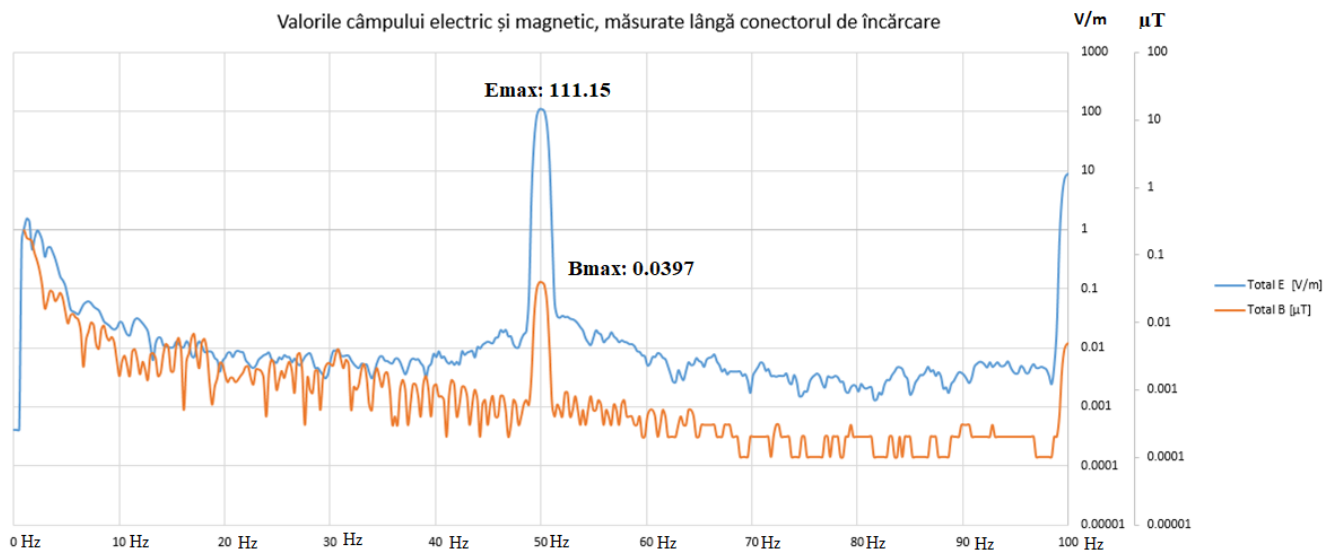


Figura 6.8: Reprezentarea câmpului magnetic și electric în spectrul de frecvență 0 – 100 Hz, pentru încărcare lentă, antena poziționată lângă conectorul de încărcare

Comparând valorile măsurate lângă conectorul de încărcare cu valorile impuse de ICNIRP 2010 (vezi Tabel 4.1), putem observa că valoarea intensității câmpului magnetic de 111.15 [V/m] este mai mică decât valoarea impusă de standard care este de 5 [kV/m], la fel și valoarea inducției magnetice de 0.0397 [μ T] este mai mică decât valoarea impusă de standard care este de 2×10^{-4} [T].

În figura 6.9 am reprezentat valorile intensității câmpului electric și inducției magnetice, având antenna poziționată lângă priza de alimentare.

Din graficul reprezentat putem vedea că valoarea maximă obținută pentru intensitatea câmpului electric este de 185.03 [V/m], valoarea obținută la 50.05 [Hz]. Valoarea maximă a inducției magnetice este de asemenea atinsă la frecvența de 50.05 [Hz] și are valoarea de 0.8226 [μ T].

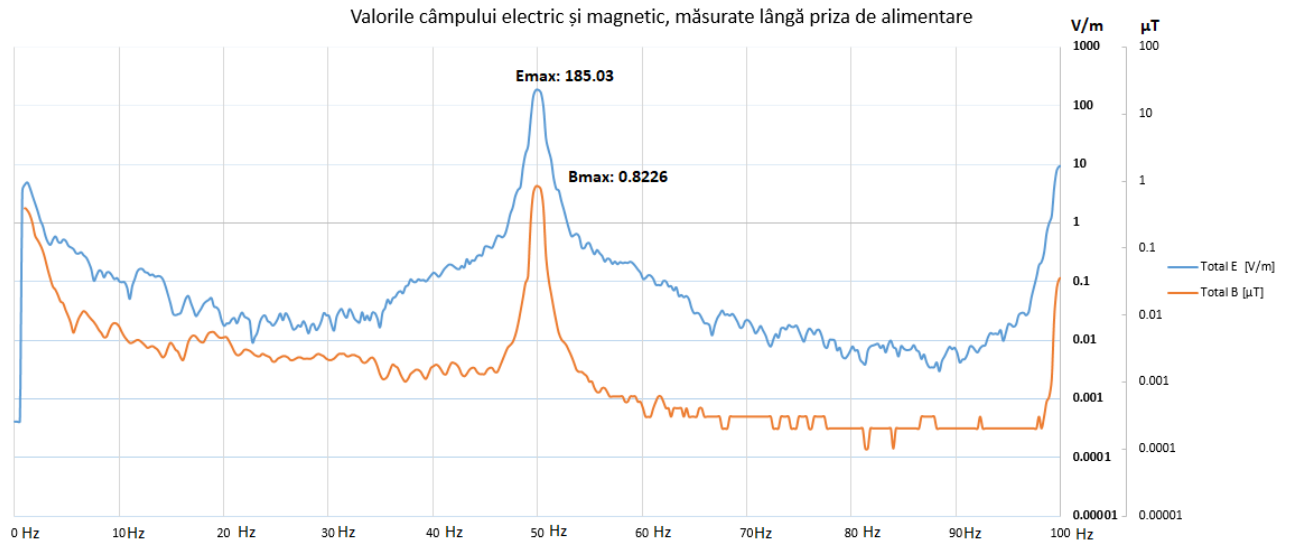


Figura 6.9: Reprezentarea câmpului magnetic și electric în spectrul de frecvență 0 – 100 Hz, pentru încărcare lentă, antenna poziționată lângă priza de alimentare

Comparând valorile măsurate lângă priza de alimentare cu valorile impuse de ICNIRP 2010 (vezi Tabel 4.1), putem observa că valoarea intensității câmpului electric de 185.03 [V/m] este mai mică decât valoarea impusă de standard care este de 5 [kV/m], la fel și valoarea inducției magnetice de 0.8226 [μ T] este mai mică decât valoarea impusă de standard care este de 2×10^{-4} [T].

Este util să comparăm valorile obținute în cele 2 topologii. Pentru intensitatea câmpului electric am obținut valoarea de 111.15 [V/m] lângă conectorul de alimentare, valoare ce este mai mică decât cea obținută pentru măsurarea realizată lângă priza de alimentare: 185.03 [V/m]. Și în cazul inducției magnetice am observat că valoarea de 0.0397 [μ T] măsurată lângă conectorul de alimentare al mașinii este mai mică decât valoarea de 0.8226 [μ T] măsurată lângă priza de alimentare.

6.5.2. Măsurarea câmpului electric și magnetic pentru încărcare rapidă

Pentru a ne sigura că testele nu sunt afectate semnificativ de un zgomot sau semnal extern fals, o măsurare a zgomotului ambiental trebuie efectuată înainte de testarea propriu-zisă. Această măsurare s-a realizat în partea din stânga, lângă mașină pe o durată de 1 minut, în plaja de frecvențe 0 – 100 Hz. Ne interesează valorile măsurate în jurul frecvenței de 50 Hz. Valorile maxime obținute pentru E sunt de 0.0268 [V/m] și pentru B sunt de 0.0062 [μ T] așa cum se poate vedea în Figura 6.10. Aceste valorile măsurate pentru referință sunt acceptabile și nu alterează măsurările efectuate în timpul încărcării.

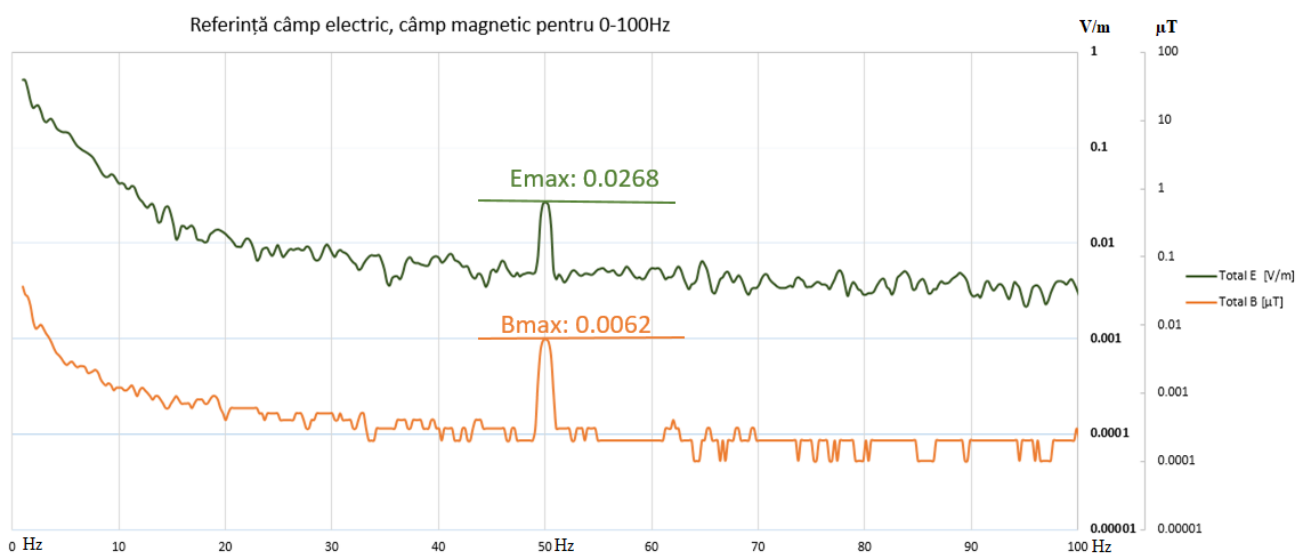


Figura 6.10: Reprezentarea câmpului magnetic și electric – măsurare de referință a zgomotului ambiental

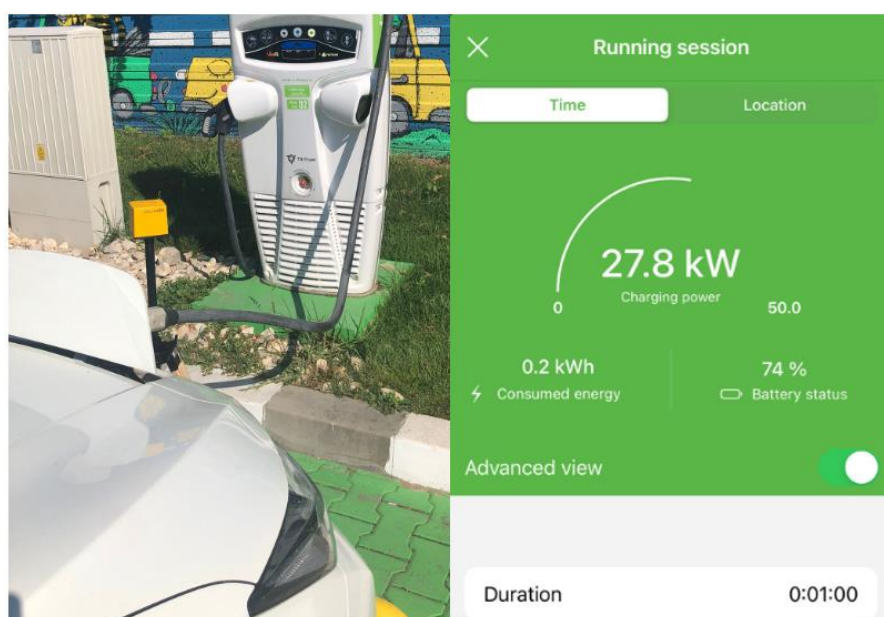


Figura 6.11: Setarea reală a măsurărilor și parametri de încărcare

În figura 6.11 se poate observa în partea din stânga amplasarea mașinii lângă stația de încărcare, amplasarea antenei tip Narda EHP-50f, iar în partea din dreapta putem observa parametri din timpul încărcării. Puterea instantanee de încărcare a fost de 27.8 [kW] din 50 [kW] puterea maximă suportată de stația de încărcare.

În acest al doilea set de măsurări vom analiza valorile maxime obținute la 50 [Hz] pentru tipul de încărcare rapidă, folosind conector de tip Chademo.

În figura 6.12 am reprezentat valorile intensității câmpului electric și inducției magnetice, având antena poziționată lângă conectorul de încărcare al mașinii.

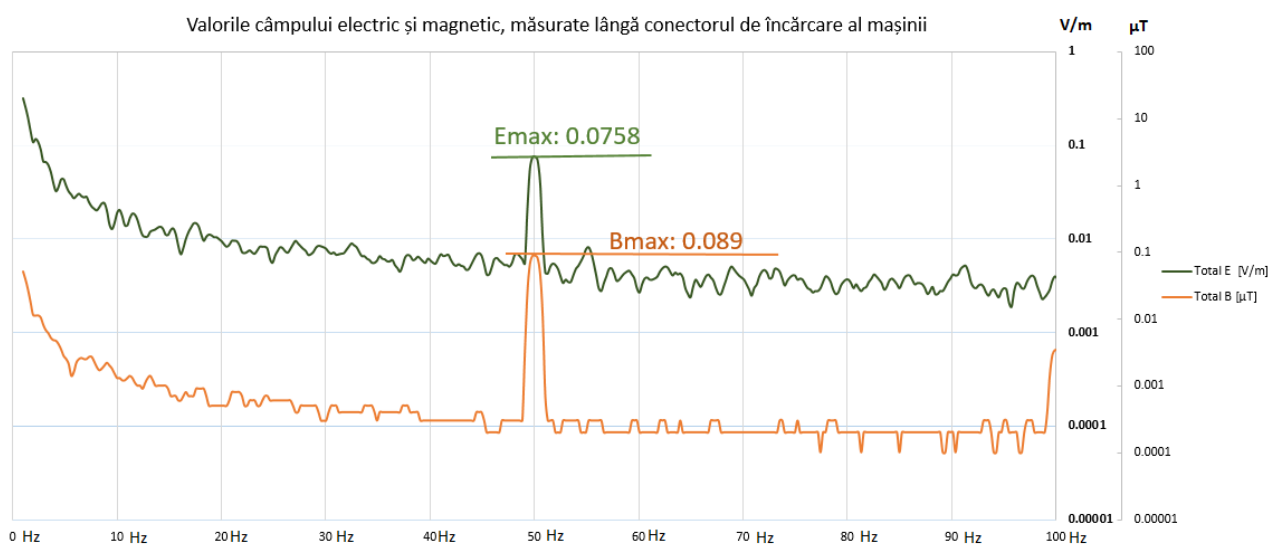


Figura 6.12: Reprezentarea câmpului magnetic și electric în spectrul de frecvență 0 – 100 Hz, pentru încărcare rapidă, antena poziționată lângă conectorul de încărcare al mașinii

Din graficul reprezentat putem vedea că valoarea maximă obținută pentru intensitatea câmpului electric este de 0.0758 [V/m], valoarea obținută la 50.05 [Hz]. Valoarea maximă a inducției magnetice este de asemenea atinsă la frecvența de 50.05 [Hz] și are valoarea de 0.089 [μT].

Comparând valorile măsurate lângă conectorul de alimentare cu valorile impuse de ICNIRP 2010 (vezi Tabel 4.1), putem observa că valoarea intensității câmpului electric de 0.0758 [V/m] este mai mică decât valoarea impusă de standard care este de 5 [kV/m], la fel și valoarea inducției magnetice de 0.089 [μT] este mai mică decât valoarea impusă de standard care este de 2×10^{-4} [T].

În figura 6.13 am reprezentat valorile intensității câmpului electric și inducției magnetice, având antena poziționată lângă stația de încărcare.

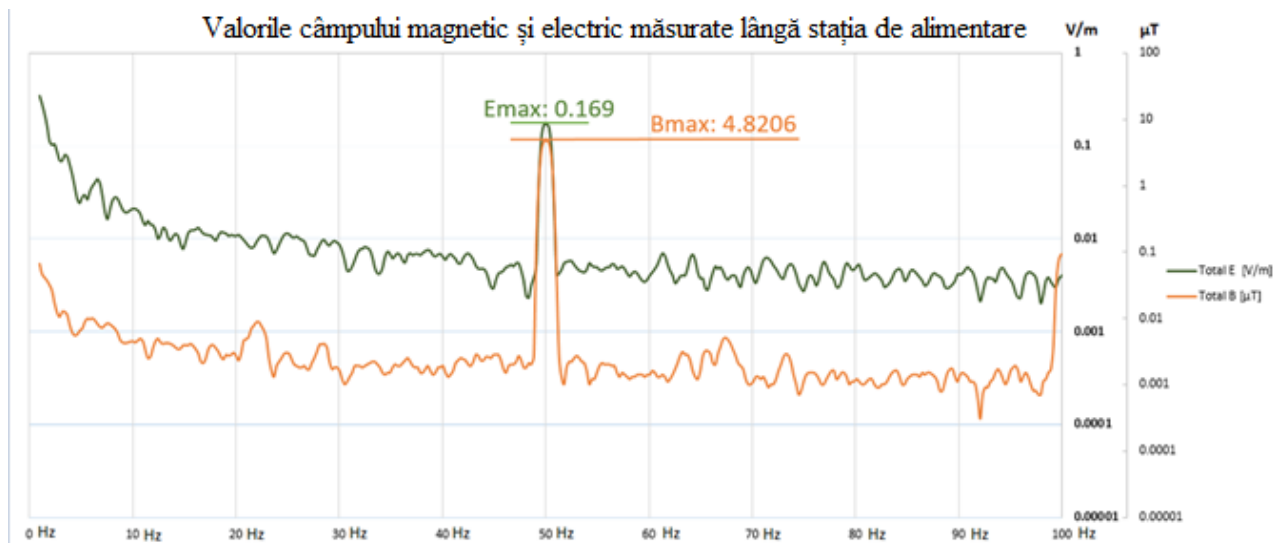


Figura 6.13: Reprezentarea câmpului magnetic și electric în spectrul de frecvență 0 – 100 Hz, pentru încărcare rapidă, antena poziționată lângă stația de încărcare

Din graficul reprezentat putem vedea că valoarea maximă obținută pentru intensitatea câmpului electric este de 0.169 [V/m], valoarea obținută la 50.05 [Hz]. Valoarea maximă a inducției magnetice este de asemenea atinsă la frecvența de 50.05 [Hz] și are valoarea de 4.8206 [μT].

Comparând valorile măsurate lângă stația de încărcare cu valorile impuse de ICNIRP 2010 (vezi Tabel 4.1), putem observa că valoarea intensității câmpului electric de 0.169 [V/m] este mai mică decât valoarea impusă de standard care este de 5 [kV/m], la fel și valoarea inducției magnetice de 4.8206 [μT] este mai mică decât valoarea impusă de standard care este de 2×10^{-4} [T].

Capitolul 7: Măsurări de câmp electromagnetic produs de cablurile de înaltă tensiune din interiorul caroseriei vehiculelor electrice

7.1. Instalația utilizată

Pornind de la următoarea schiță a fost realizată carcasa mașinii la scară 1:2.

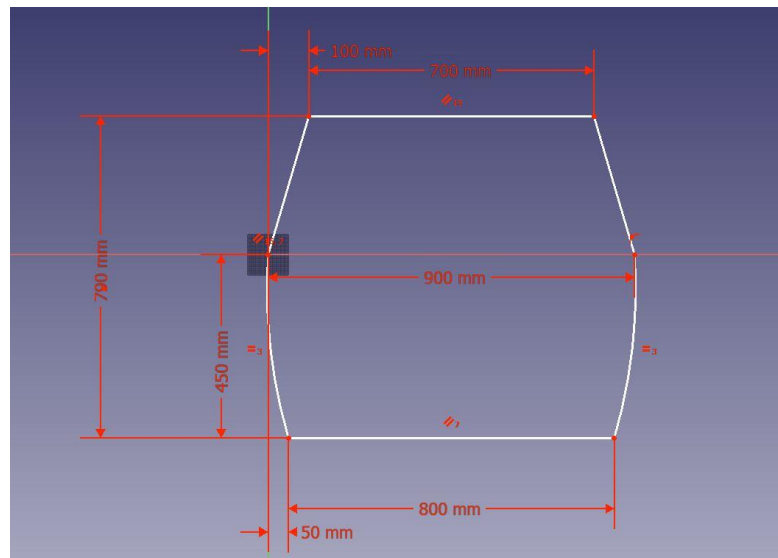


Figura 7.1: Schemă carcasă vehicul – scară 1:2

Pentru realizarea carcasei s-a folosit tablă zincată cu grosimea de 0.3 mm. După manipularea ei, aceasta are următoarea structură:



Figura 7.2: Machedă carcasă vehicul – scară 1:2

S-a folosit un transformator coborâtător de la 220 [V] la 6 [V] pentru a genera curentul care trece prin cablurile ce vor fi poziționate în carcasa metalică.

Secundarul a fost configurat pentru obține un curent de 230A.

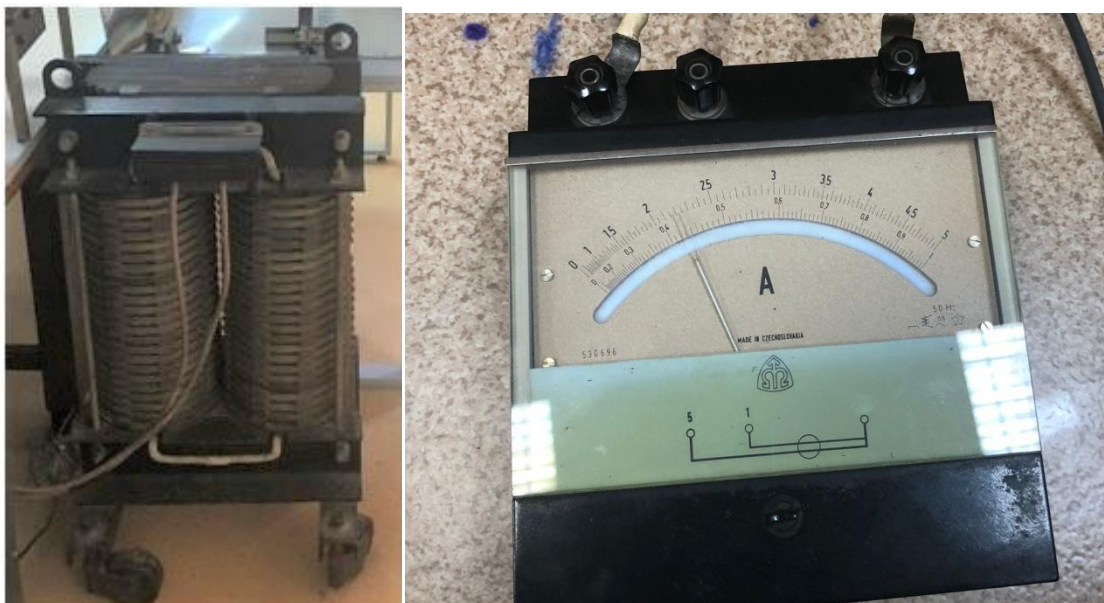


Figura 7.3: Transformator coborâtor 220 [V] / 6 [V] – Ampermetru

Pentru a măsura câmpul magnetic produs de parcurgerea curentului prin cele 2 cabluri din interiorul caroseriei, s-a folosit un Gaussmetru 475 DSP:



Figura 7.4: Gaussmetru 475 DSP



Figura 7.5: Instalația experimentală de măsură a câmpului magnetic

Setul de experimente privind câmpul magnetic tratează 4 cazuri distincte după cum urmează.

7.2. Cazul 1: Ambele cabluri sunt poziționate unul lângă altul în colțul din dreapta al caroseriei



Figura 7.6: Ambele cabluri alăturate, poziționate în dreapta caroseriei – punctele de măsurare reprezentate

În urma măsurărilor realizate cu gaussmetrul, folosind sonda perpendiculară, s-au obținut următoarele valori ale câmpului magnetic:

	Punctele de măsură					
Punctele de măsură	a	b	c	d	e	f
Valorile câmpului magnetic măsurat [mT]	0.27	0.67	0.23	0.19	0.09	-

Tabel 7.1: Valorile măsurate ale câmpului magnetic – cazul 1

Pentru a verifica acuratețea măsurărilor, cu ajutorul programului Femm, a fost realizată simularea acestui caz.

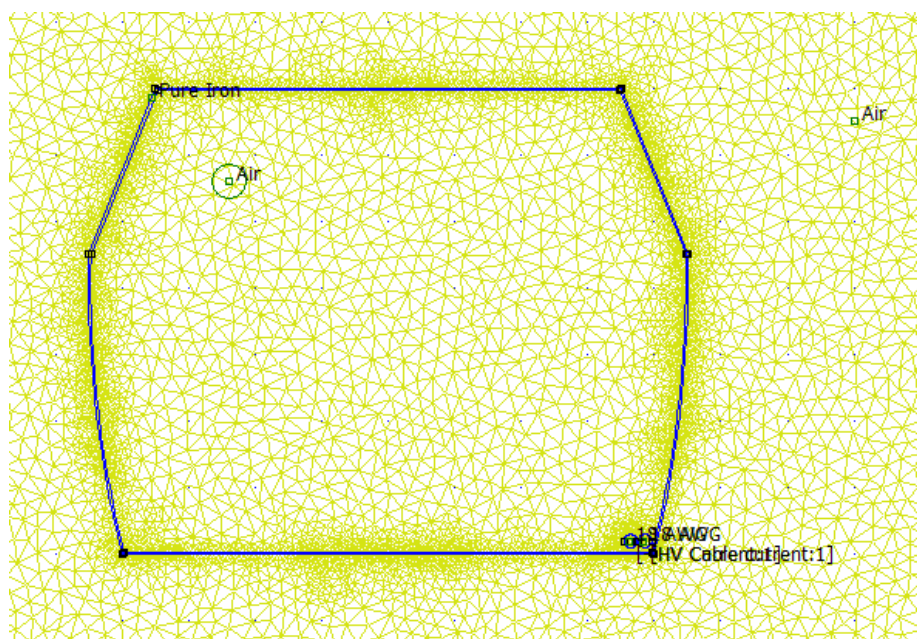


Figura 7.7: Simularea cazului 1: ambele cablurile poziționate în colțul dreapta

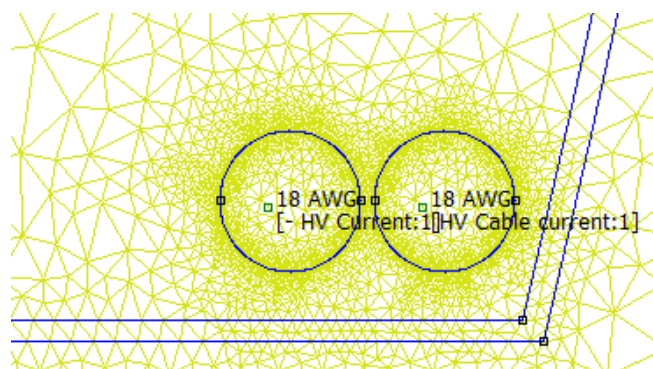


Figura 7.8: Dispunerea cablurilor

Celor 2 cabluri le-au fost atribuite câte un circuit, în unul dintre ele valoarea curentului atribuită este de 230 [A], iar în celălalt circuit valoarea de -230[A], la frecvența de 0 [Hz].

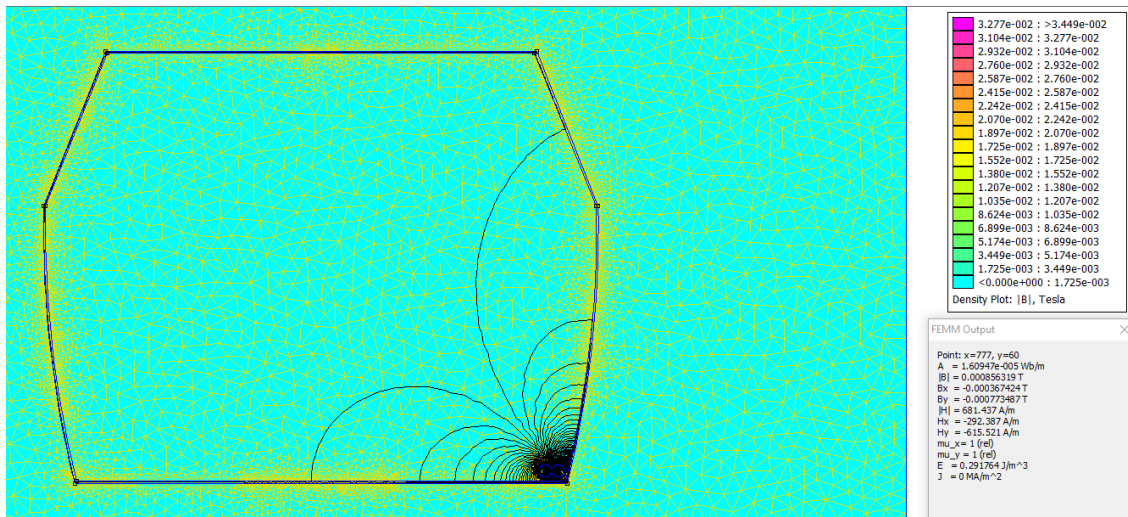


Figura 7.9: Distribuția liniilor de câmp magnetic și valoarea din punctul dreapta jos a câmpului magnetic

În vecinătatea cablurilor, valoarea simulată a câmpului magnetic este de 0.85 [mT].

	Punctele de măsură					
Punctele de măsură	a	b	c	d	e	f
Valorile câmpului magnetic simulate [mT]	0.29	0.85	0.3	0.1	0.063	-

Tabel 7.2: Valorile simulate ale câmpului magnetic – cazul 1

Comparând valorile măsurate cu cele simulate obținem următorul grafic:

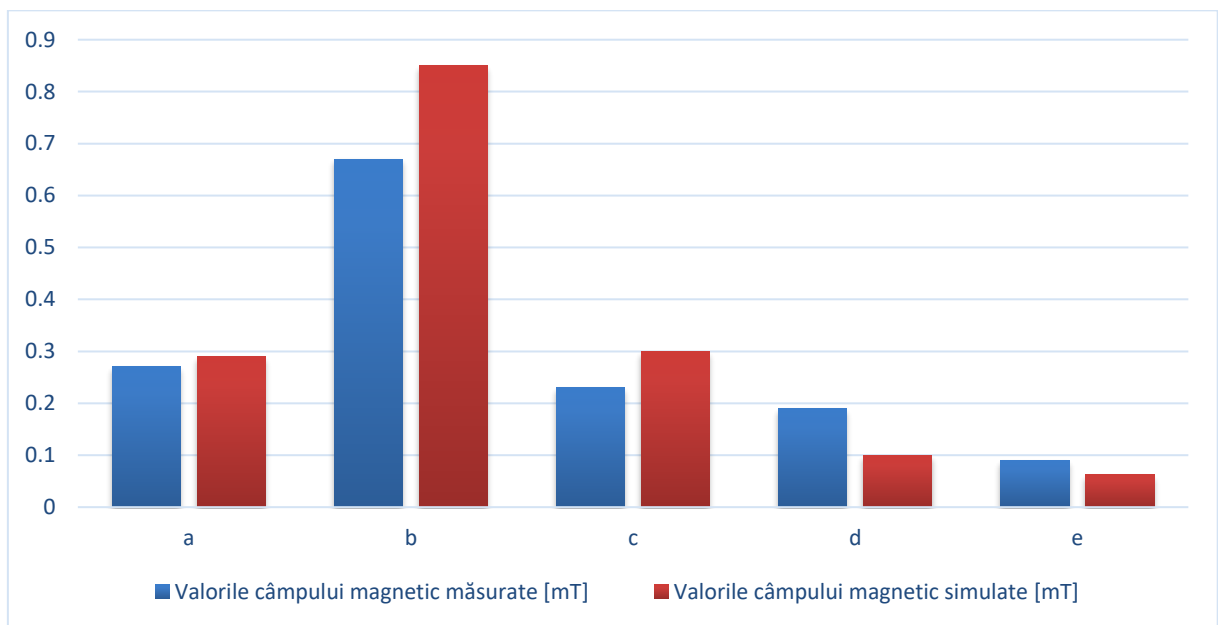


Figura 7.10: Valorile câmpului magnetic măsurate versus simulate – cazul

7.3. Cazul 2: Ambele cabluri sunt poziționate unul lângă altul pe centrul caroseriei

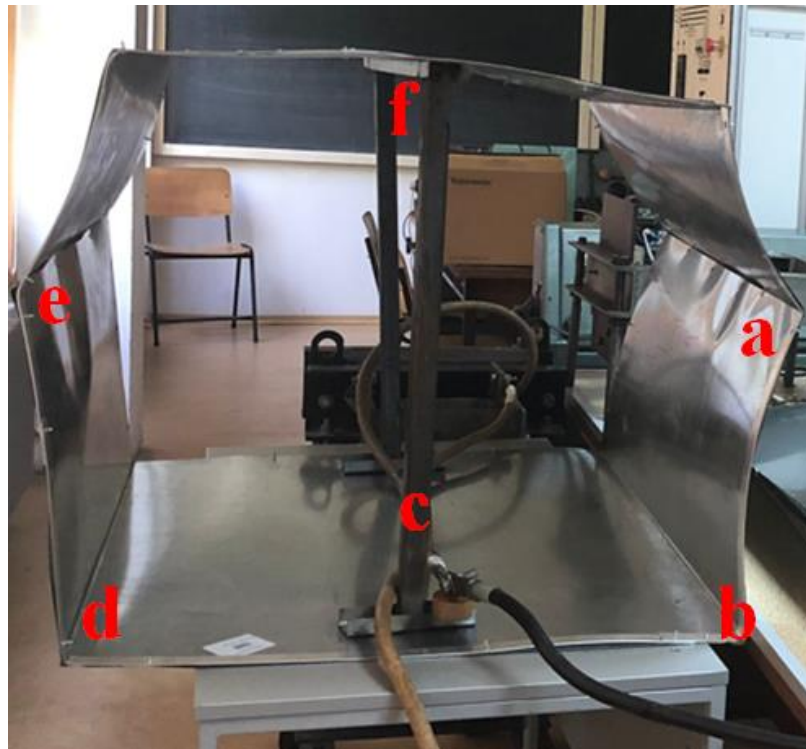


Figura 7.11: Ambele cabluri poziționate pe centrul caroseriei

	Punctele de măsură					
Punctele de măsură	a	b	c	d	e	f
Valorile câmpului magnetic măsurate [mT]	0,008	0,012	0,32	0,03	0,011	0,015

Tabel 7.3: Valorile măsurate ale câmpului magnetic – cazul 2

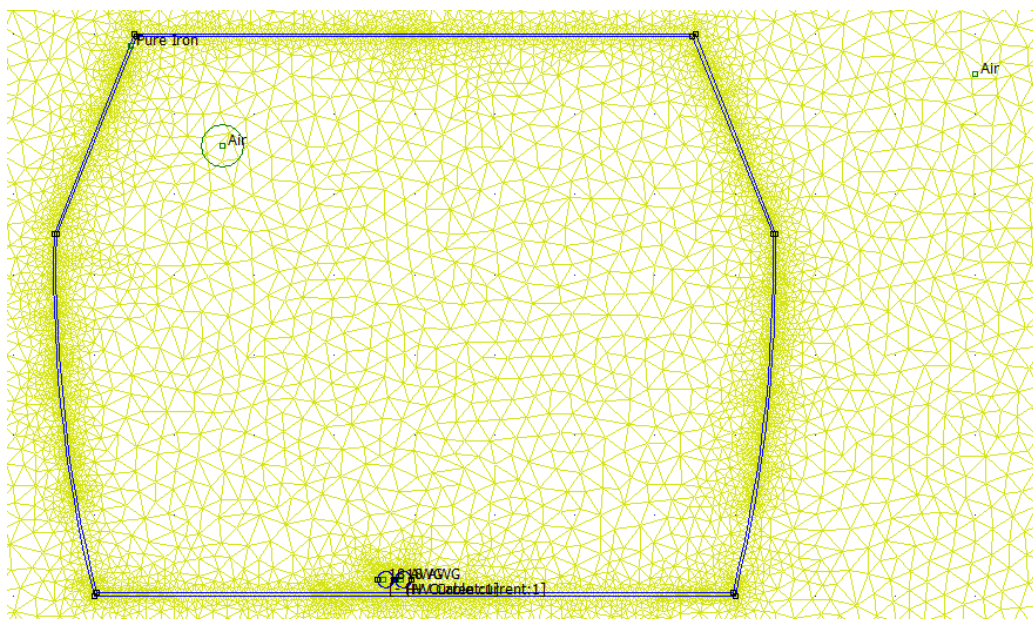


Figura 7.12: Simularea cazului 2: ambele cablurile poziționate central

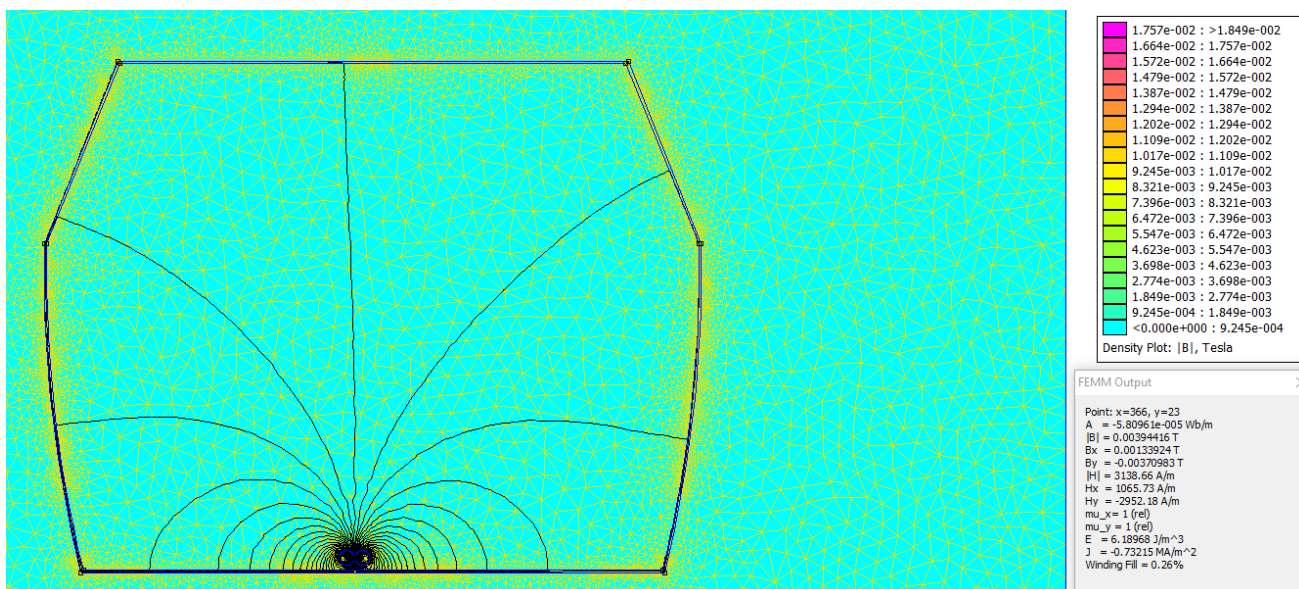


Figura 7.13: Distribuția liniilor de câmp magnetic și valoarea din punctul central jos a câmpului magnetic

În vecinătatea cablurilor, valoarea simulată a câmpului magnetic este de 0.39 mT.

Punctele de măsură	Punctele de măsură					
	a	b	c	d	e	f
Valorile câmpului magnetic simulate [mT]	0.0057	0.019	0.39	0.02	0.007	0.008

Tabel 7.4: Valorile simulate ale câmpului magnetic – cazul 2

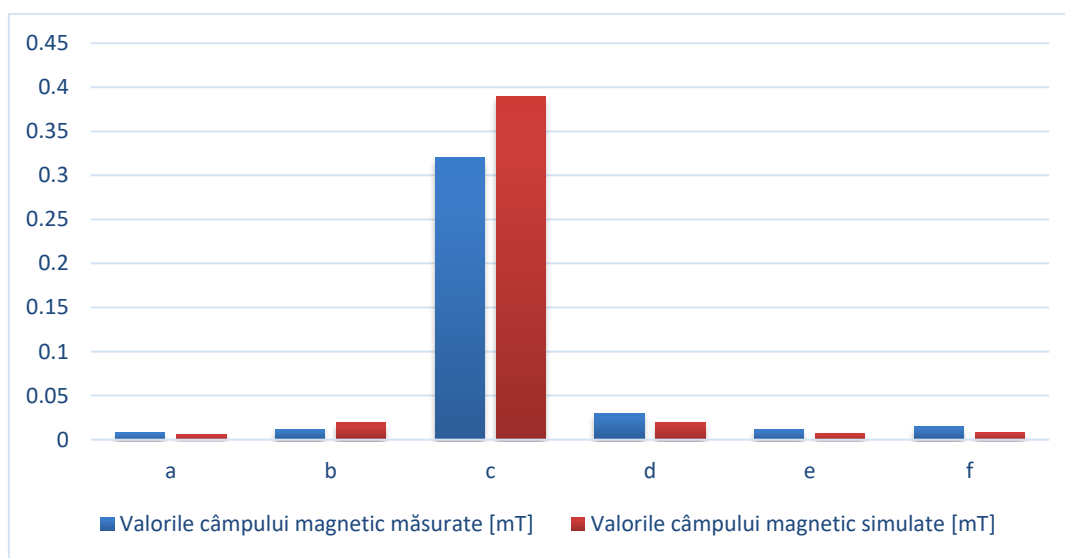


Figura 7.14: Valorile câmpului magnetic măsurate versus simulate – cazul 2

7.4. Cazul 3: Cablu dus-întors – Construcție simetrică

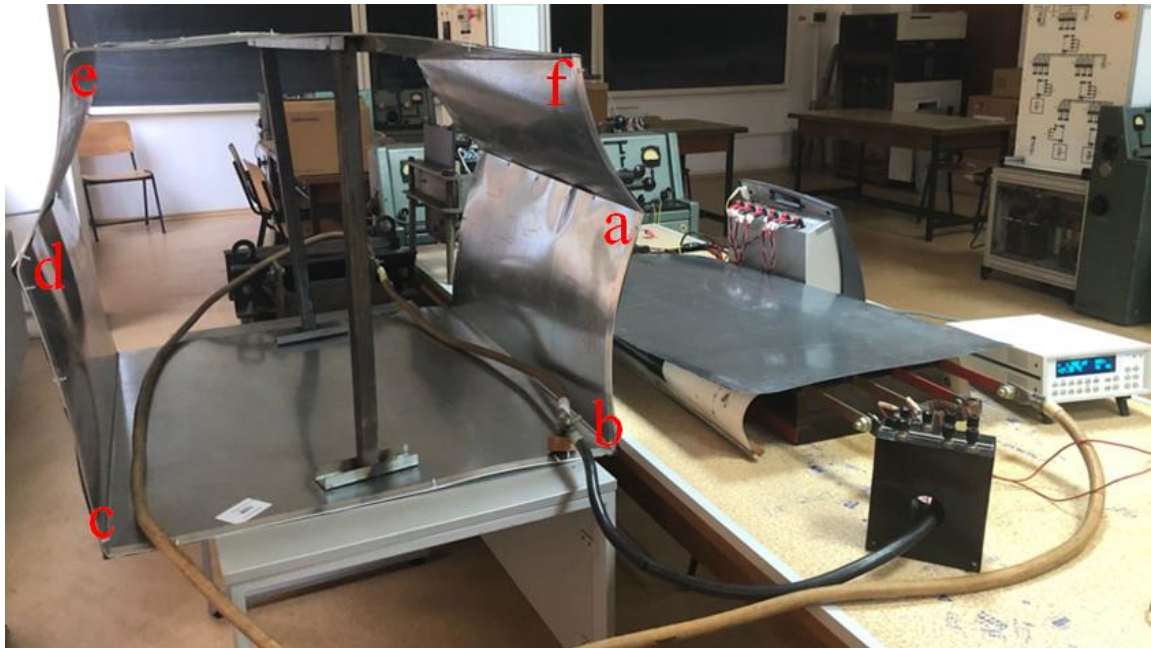


Figura 7.15: Cablurile așezate în construcție simetrică

	Punctele de măsură					
	a	b	c	d	e	f
Valorile câmpului magnetic măsurate [mT]	0.12	0.55	0.3	0.03	0.023	0.03

Tabel 7.5: Valorile măsurate ale câmpului magnetic – construcție simetrică - cazul 3

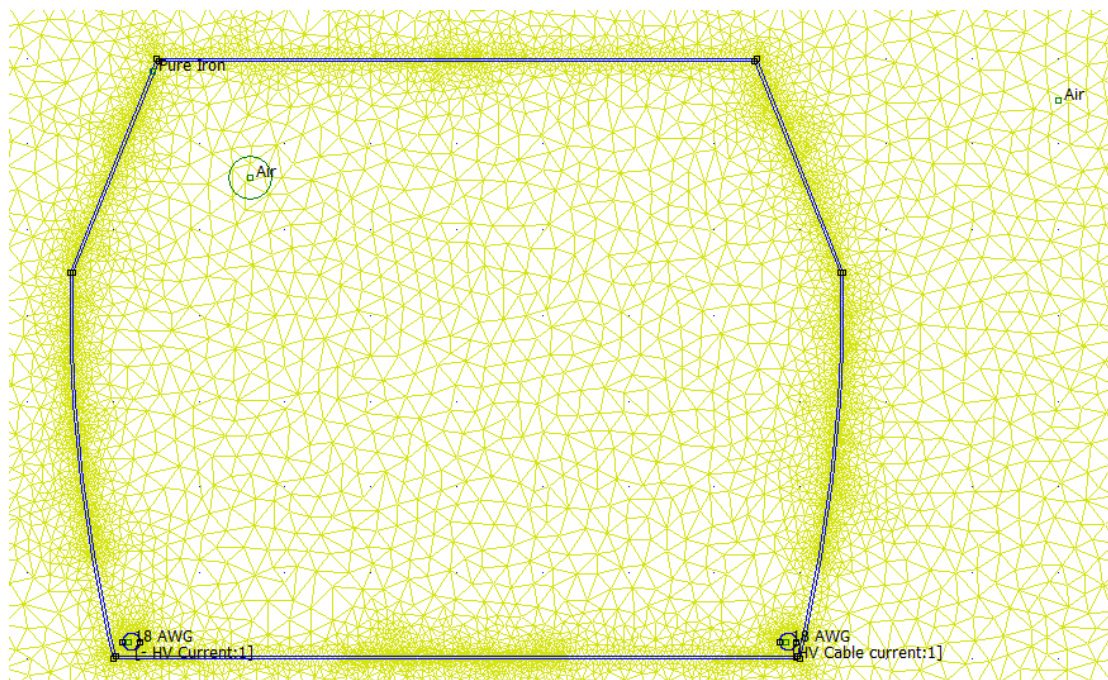


Figura 7.16: Rețeaua de discretizare – construcție simetrică

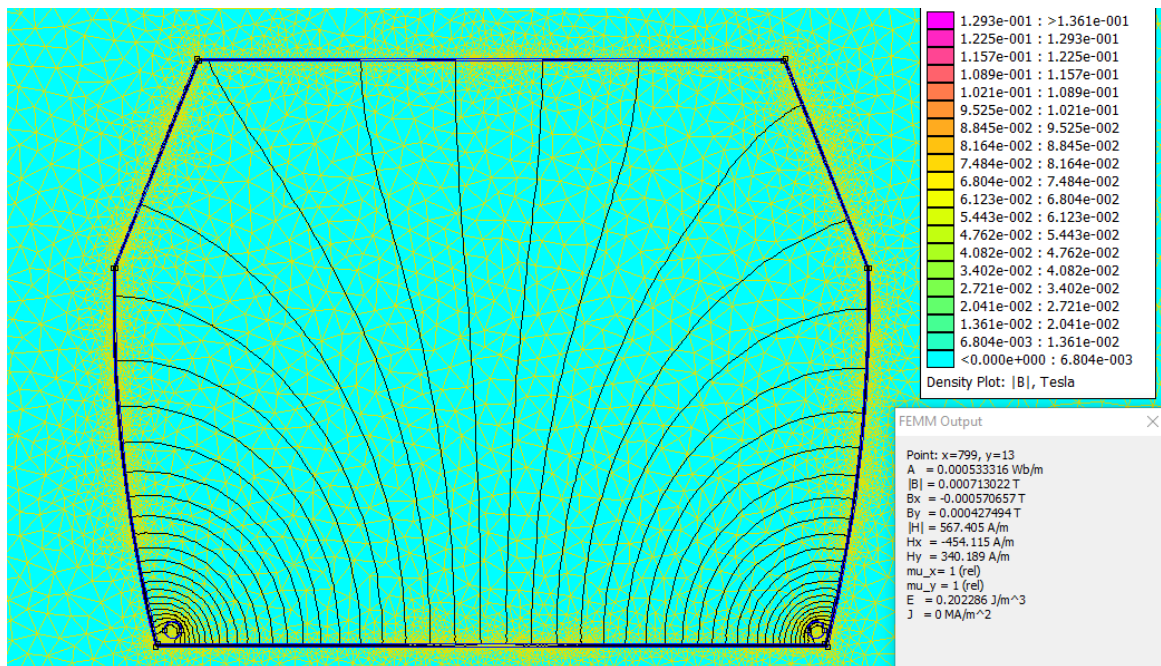


Figura 7.17: Distribuția liniilor de câmp magnetic pentru construcție simetrică și valoarea din punctul dreapta jos a câmpului magnetic

	Punctele de măsură					
	a	b	c	d	e	f
Valorile câmpului magnetic simulate [mT]	0.19	0.71	0.37	0.14	0.012	0.036

Tabel 7.6: Valorile simulate ale câmpului magnetic – construcție simetrică – cazul 3

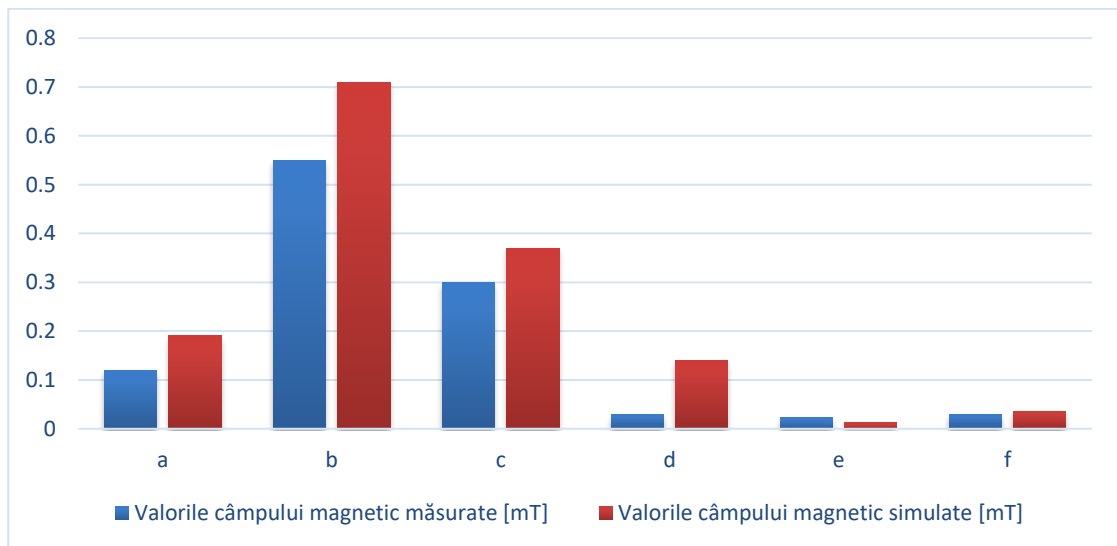


Figura 7.18: Valorile câmpului magnetic măsurate versus simulate – cazul 3

7.5. Cazul 4: Un cablu este poziționat în dreapta și unul central

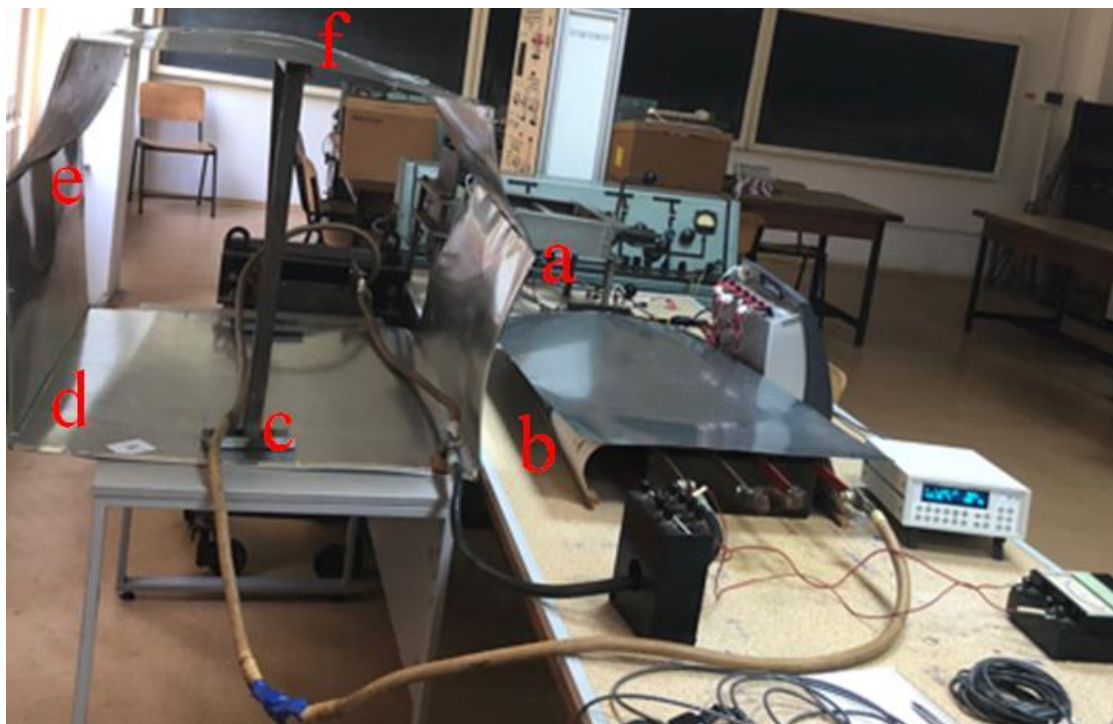


Figura 7.19: Cablurile așezate în construcție asimetrică – unul în dreapta și unul pe centru

	Punctele de măsură					
	a	b	c	d	e	f
Valorile câmpului magnetic măsurate [mT]	0.023	0.8	0.5	0.081	0.031	0.03

Tabel 7.7: Valorile măsurate ale câmpului magnetic – cazul 4

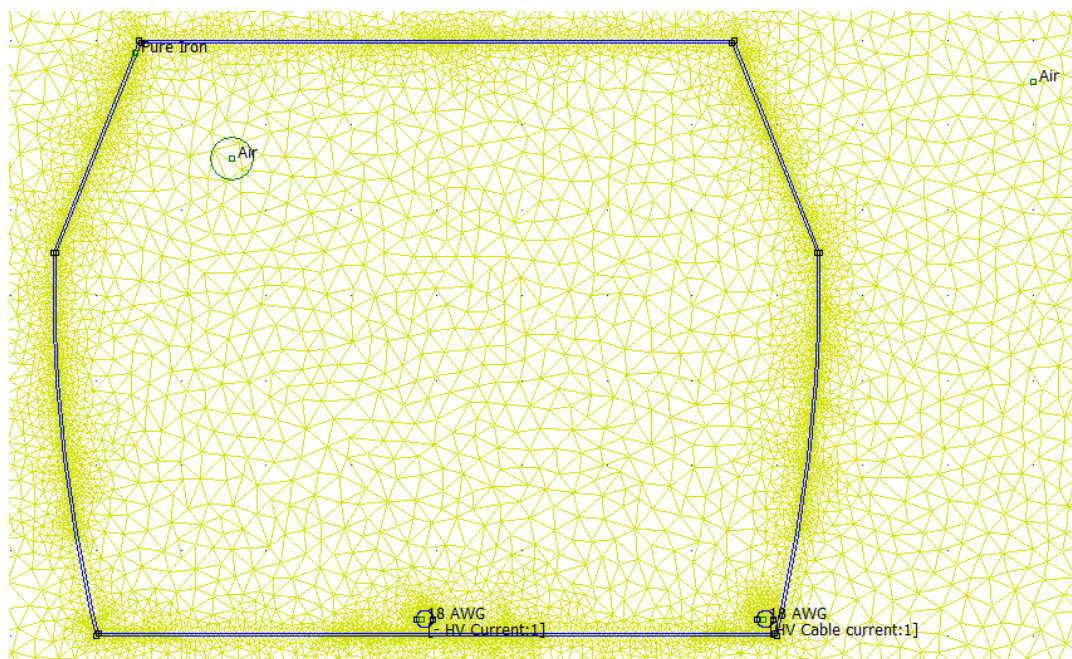


Figura 7.20: Rețeaua de discretizare – construcție asimetrică

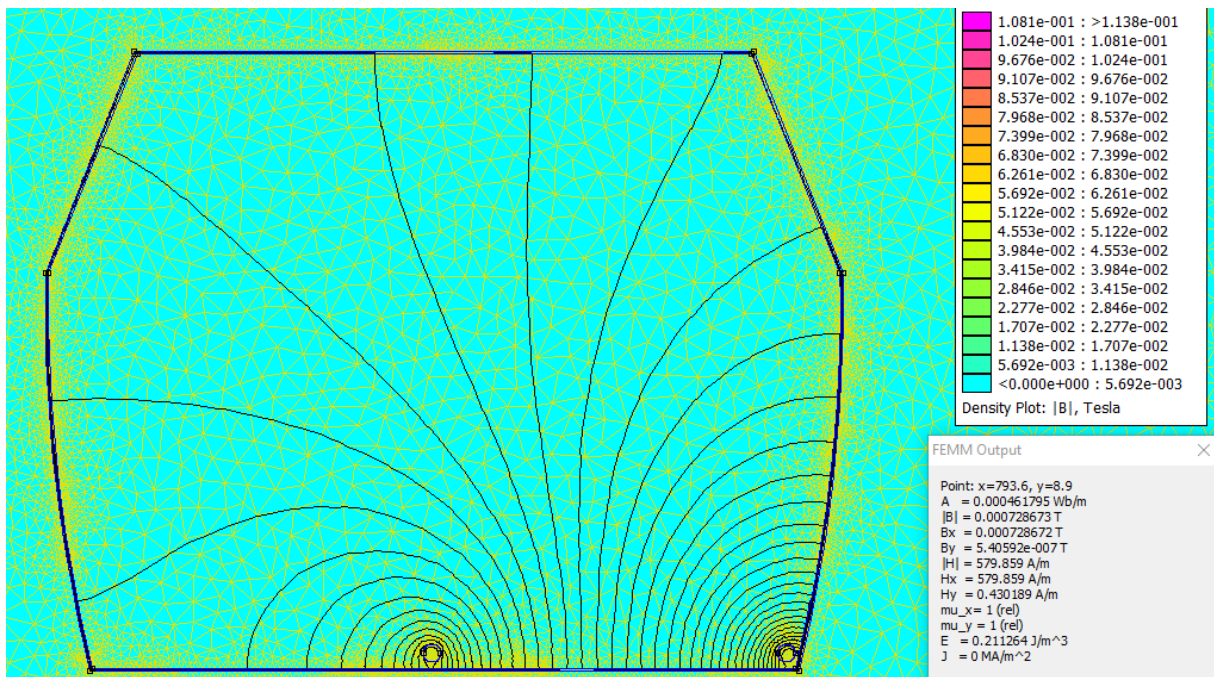


Figura 7.21: Distribuția liniilor de câmp magnetic pentru construcție asimetrică și valoarea din punctul dreapta jos a câmpului magnetic

	Punctele măsurate					
	a	b	c	d	e	f
Valorile câmpului magnetic simulate [mT]	0.12	0.72	0.7	0.006	0.045	0.092

Tabel 7.8: Valorile măsurate și simulate ale câmpului magnetic – construcție asimetrică

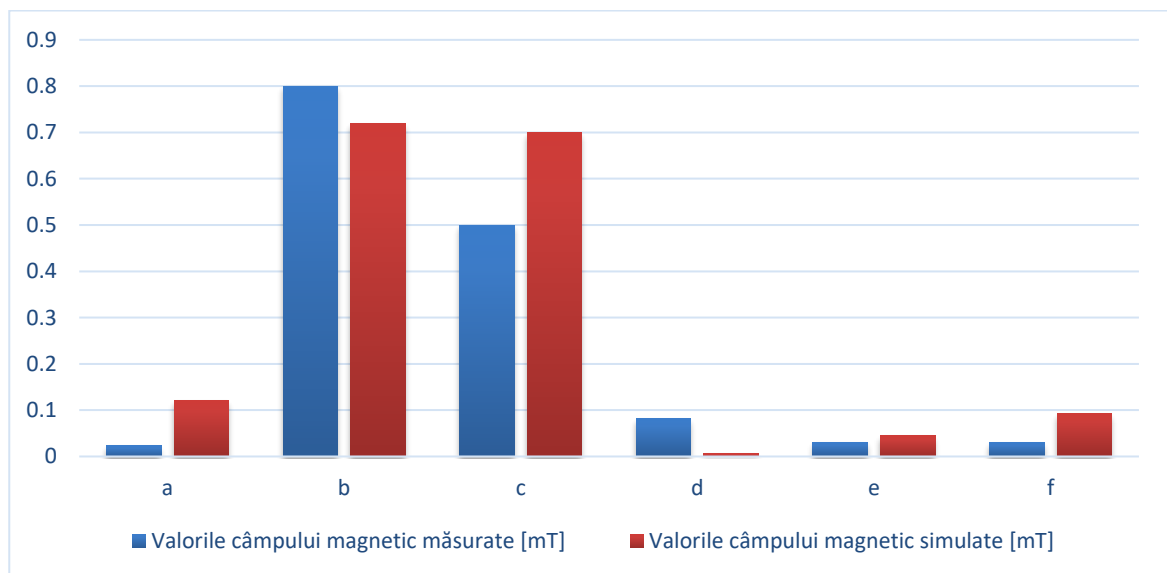


Figura 7.22: Valorile câmpului magnetic măsurate versus simulate – cazul 4

Capitolul 8: Concluzii și contribuții personale

8.1. Concluzii generale

Prezenta lucrare de doctorat intitulată „Interferențe electromagnetice în sistemele electrice ale autovehiculelor” este alcătuită din 7 capitole.

Primul capitol descrie conceptele fundamentale ale compatibilității electromagnetice, standardele de compatibilitate electromagnetică și un scurt istoric al autovehiculelor electrice. Primul vehicul electric cu baterii a fost construit în 1834. După 50 de ani de la apariția vehiculului electric a fost construit primul vehicul cu motor cu combustie internă în 1885. Vehiculele electrice nu au avut parte de același succes ca în cazul vehiculelor cu motoare cu combustie internă care ofereau o autonomie mai mare și erau foarte ușor de alimentat. În ultima parte a secolului XX și începutul secolului XXI vehiculul electric a început să recâștige teren în industria autovehiculelor datorită noilor reglementări legate de protejarea mediului și datorită dezvoltării și îmbunătățirii construcției bateriilor reîncărcabile, motorului și controlerelor.

Capitolul 2 prezintă cele 3 structuri constructive principale de vehicule electrice și hibride: vehiculul cu baterie electrică, vehiculul electric hibrid și vehiculul hibrid plug-in, fiind evidențiate componentele fiecăreia și diferențele dintre acestea. Tot în acest capitol am prezentat integrarea sistemului electric/electronic în vehiculele electrice și dificultățile tehnice.

Cel de-al treilea capitol identifică și analizează sursele de câmp semnificative în vehiculele electrice. Principalele elemente ale noilor sisteme de acționare pentru vehicule electrice sunt motorul electric, convertorul static de putere, alimentarea cu energie electrică și liniile care conectează componentele. Fiecare componentă a sistemului de acționare creează o cale de transfer pentru interferențele electromagnetice. Convertorul de putere reprezintă principala sursă de interferențe electromagnetice. Componentele sistemului de acționare au fost analizate ca fiind fie sursă a zgomotului electromagnetic, fie parte a mecanismului de cuplaj.

În cel de-al patrulea capitol au fost prezentate succint reglementările și standardele de prevenție: reglementările ICNIRP și standardul IEEE. Au fost prezentate posibilele victime ale interferențelor electromagnetice. În cazul vehiculelor electrice, pasagerii stau foarte aproape de sisteme electrice ce au puteri semnificative, de obicei pentru perioade considerabile de timp. Curenții relativ mari la care ajung aceste sisteme și distanțele scurte dintre dispozitivele de putere și pasageri pot duce la expunerea pasagerilor la un câmp magnetic semnificativ.

Pentru ca sistemele autovehiculelor și vehiculul în întregul lui să nu emită perturbații electromagnetice și să nu fie susceptibile la perturbații trebuie analizate reglementările în domeniul auto de compatibilitate electromagnetică.

Orice companie constructoare de mașini și-a formulat propriile standarde interne care specifică nivelele și modalitățile de testare pe care componentele utilizate în vehiculele lor trebuie să le îndeplinească. Aceste reglementări interne se bazează de asemenea pe documentele CISPR și ISO. Constructorii de mașini americani folosesc documentele SAE. ^[13]

Capitolul 5 prezintă simularea câmpului magnetic produs de cablul de înaltă tensiune ce conectează sistemul inteligent al bateriilor de motorul electric în șapte topologii diferite. Aceste simulări ale câmpului magnetic au fost realizate cu ajutorul programului FEMM. În 6 dintre cazurile simulate s-a folosit conductor din Cupru, pentru ca în cel de-al 7-lea caz să se folosească un cablu coaxial, observând cum liniile de câmp magnetic se închid în interiorul lui.

Analizând și comparând valorile maxime obținute pentru inducția magnetică în fiecare caz putem extrage valoarea maximă cea mai mică, cu valoarea de 0.1195 [T] obținută pentru cazul al doilea: traseu cablu dus-întors – construcție simetrică și valoarea maximă cea mai mare a inducției magnetice de 0.295 [T] obținută pentru cazul al 4-lea: traseu cablu cu întoarcere prin carcasă – construcție simetrică – 0 cm față de podea.

Este important de specificat faptul că aceste valori maxime ale inducției magnetice pentru fiecare caz se obțin fie în interiorul cablului coaxial, fie în interiorul carcasei vehiculului. În zonele în care pasagerul este expus, aceste valori fiind cu mult mai mici, de exemplu în dreptul geamurilor obținându-se o valoare de 0.5 [μ T].

Prin compararea rezultatelor în urma simulărilor cu reglementarea ICNIRP 2009 care descrie valorile limită de expunere la câmpul magnetic static, se poate concluziona că valorile obținute în cele 7 cazuri sunt mai mici decât nivelul de referință reglementat pentru publicul larg, care este de 400 [mT].

În capitolul 6 am realizat studiul interacțiunii dintre mediul electromagnetic ambiant și vehiculul electric. Deoarece nivelul de poluare a atins un nivel critic, iar resursele de petrol s-au redus în mod dramatic, mașinile convenționale trebuie înlocuite în viitorul apropiat cu vehicule electrice sau cu alte alternative nepoluante. Introducerea de BEV-uri în transportul public va ridica unele probleme de compatibilitate electromagnetică.

Un alt scenariu de interes în acest capitol a fost măsurarea câmpului magnetic și electric în timpul încărcării unui vehicul mediu urban folosind 2 tipuri diferite de încărcătoare, unul pentru încărcarea lentă (type 2) și altul pentru încărcarea rapidă (Chademo). Măsurările au fost realizate pentru fiecare tip de încărcare în imediata apropiere a stației/prizei de încărcare, respectiv lângă conectorul de încărcare al mașinii.

Am observat că valoarea maximă a lui E este obținută pentru încărcarea lentă, valoare măsurată lângă priza de alimentare. Valoarea maximă a lui B în urma comparației celor 4 măsurări este obținută pentru încărcarea rapidă, în imediata apropiere a stației de încărcare.

Capitolul 7 tratează măsurările de câmp magnetic realizate în interiorul unei carcase din tablă zincată pentru 2 cabluri legate la un transformator ce le alimentează la 230 [A]. Au fost tratate 4 cazuri distincte pentru topologii diferite. Pentru a verifica corectitudinea măsurărilor de laborator, au fost realizate simulări de câmp magnetic, în final comparându-se valorile măsurate cu cele simulate.

8.2. Contribuții personale

Lucrarea prezintă următoarele contribuții originale:

- Simularea câmpului magnetic produs de cablul de înaltă tensiune în interiorul vehiculului electric în diferite topologii:
 - Traseu cablu cu întoarcere prin carcasă – construcție asimetrică
 - Traseu cablu dus-întors – Construcție simetrică
 - Traseu cablu cu întoarcere prin carcasă – construcție simetrică
 - Traseu cablu cu întoarcere prin carcasă – construcție simetrică – 0 cm față de podea
 - Traseu cablu cu întoarcere prin carcasă – construcție simetrică – 10 cm față de podea
 - Traseu cablu cu întoarcere prin carcasă – construcție simetrică – 10 cm față de podea cu scaune
 - Simulare câmp magnetic cablu coaxial – construcție asimetrică

- Studiul interacțiunii dintre mediul electromagnetic ambiant și vehiculul electric:
 - Analiza și simularea mediului electromagnetic ambiant exterior vehiculului electric fiind analizat câmpul magnetic produs de o linie de medie tensiune
 - Simularea câmpului magnetic produs de o linie de transfer de energie de medie tensiune în prezența unei caroserii
 - Analiza mediului electromagnetic ambiant interior habitaculului vehiculului electric
 - Măsurarea câmpului electric și magnetic în timpul încărcării unui vehicul electric cu conector de tip Type2 – încărcare lentă
 - Măsurarea câmpului electric și magnetic în timpul încărcării unui vehicul electric cu conector de tip Chademo – încărcare rapidă

- Experimente privind câmpul magnetic produs de cablurile de înaltă tensiune din interiorul caroseriei vehiculelor electrice pentru diferite topologii:
 - Ambele cabluri sunt poziționate unul lângă altul în colțul din dreapta al caroseriei
 - Ambele cabluri sunt poziționate unul lângă altul pe centrul caroseriei
 - Cablu dus-întors – Construcție simetrică
 - Un cablu este poziționat în dreapta și unul central

- Simulări de câmp magnetic produs de cablurile de înaltă tensiune din interiorul caroseriei vehiculelor electrice pentru diferite topologii:
 - Ambele cabluri sunt poziționate unul lângă altul în colțul din dreapta al caroseriei
 - Ambele cabluri sunt poziționate unul lângă altul pe centrul caroseriei
 - Cablu dus-întors – Construcție simetrică
 - Un cablu este poziționat în dreapta și unul central

- Compararea rezultatelor obținute în urma experimentelor de laborator cu cele obținute în urma simulărilor.

8.3. Direcții viitoare de cercetare

Pentru viitor ar putea fi analizate și dezvoltate următoarele:

- Măsurarea câmpului magnetic în diverse tipuri de vehicule electrice, hibride și convenționale în toate regimurile de funcționare
- Analiza câmpului magnetic în structuri carcasate în plastic
- Comparare între structurile carcasate în aluminiu și cele în plastic din punct de vedere electromagnetic.

Lista articolelor publicate

1. **Violeta-Maria IONESCU**, Anca-Alexandra SĂPUNARU, Claudia Laurența POPESCU, Mihai Octavian POPESCU, “EMC Normes for Testing Electric and Hybrid Cars” (EV2019) (PoD) ISBN:978-1-7281-0792-9, Electronic ISBN:978-1-7281-0791-2, DOI: 10.1109/EV.2019.8892881
2. Anca-Alexandra SĂPUNARU, **Violeta-Maria IONESCU**, Mihai Octavian POPESCU, Claudia Laurența POPESCU, “Study Of Radiated Emissions Produced By An Electric Vehicle In Different Operating Modes” (EV2019) (PoD) ISBN:978-1-7281-0792-9, Electronic ISBN:978-1-7281-0791-2, DOI: 10.1109/EV.2019.8893142
3. **Violeta-Maria IONESCU**, Anca-Alexandra SĂPUNARU, Mihai Octavian POPESCU, Claudia Laurența POPESCU, “Magnetic Field Constraints in the Passenger Compartment of Electric Vehicles” (ISGT-Europe) (PoD) ISBN:978-1-5386-8219-7, Electronic ISBN: 978-1-5386-8218-0, DOI: 10.1109/ISGTEurope.2019.8905554
4. Anca-Alexandra SĂPUNARU, **Violeta-Maria IONESCU**, Mihai Octavian POPESCU, Claudia Laurența POPESCU, “Propagation Phenomena of Conducted Disturbances in a Converter Powered through a LISN” (ISGT-Europe) (PoD) ISBN: 978-1-5386-8219-7, Electronic ISBN: 978-1-5386-8218-0, DOI: 10.1109/ISGTEurope.2019.8905620
5. **Violeta-Maria IONESCU**, Anca-Alexandra SĂPUNARU, Mădălina-Andreea LUPAȘCU, Mihai Octavian POPESCU, Claudia Laurența POPESCU, “Electromagnetic Interaction between the Power Distribution Grid and the Hv System of an Electric Vehicle” (Foren 2020); Journal title: EMERG - Energy.Environment. Efficiency.Resources.Globalization ISSN: 2457-5011 (print), 2668-7003 (online) EMERG 2020; 6 (3) : 77-84; 10.37410/EMERG.2020.3.07
6. Anca-Alexandra SĂPUNARU, **Violeta-Maria IONESCU**, Ovidiu FRĂȚILĂ, Mădălina Andreea LUPAȘCU, Mihai Octavian POPESCU, Claudia Laurența POPESCU, “Active Power Transfer between two Energetic Networks, of Different Working Frequencies, using a Variable Frequency Transformer” (Foren 2020)
Journal title: EMERG - Energy.Environment. Efficiency.Resources.Globalization ISSN 2457-5011 (print), 2668-7003 (online) EMERG 2/2021; Vol. 7, Issue 2, pp. 48-54 (2021), DOI: 10.37410/EMERG.2021.2.04
7. Andreea - Mădălina LUPAȘCU, **Violeta-Maria IONESCU**, Ion POTÂRNICHE, Valentin NĂVRĂPESCU , Anca-Alexandra SĂPUNARU, “Increase of Energy Efficiency of Electrically Driven Drilling Installations by Valorising the Braking Regime of The Draw Works upon Descending the Pipe Line”, (Foren 2020).
Journal title: EMERG - Energy.Environment. Efficiency.Resources.Globalization ISSN: 2457-5011 (print), 2668-7003 (online) Publisher: AGIR F EMERG 2020; 6 (3): 33-40; 10.37410/EMERG.2020.3.03

Listă Bibliografică

- [1] James Larminie, John Lowry – „Electric Vehicle Technology Explained”, John Wiley & Sons Ltd, 2003
- [2] Mark Steffka – „Automotive EMC Introduction and Overview”, University of Michigan - Dearborn
- [3] Gary Fenical – „A Primer on Automotive EMC for Non-EMC Engineers”, 2013
- [4] C. C. Chan - „The rise & fall of electric vehicle in 1828-1930: Lessons learned”, Proceedings of the IEEE, 2013
- [5] https://www.afdc.energy.gov/vehicles/electric_basics_ev.html, 16.05.2018
- [6] Ramesh C. Bansal - „Handbook of automotive power electronics and motor drives”, Taylor & Francis Group, LLC, 2005
- [7] Monzer Al Sakka, Joeri Van Mierlo, Hamid Gualous – “DC/DC Converters for Electric Vehicles”, Intech, 2011
- [8] S. Guttowski, S. Weber, E. Hoene, W. John, H. Reichl – “EMI in Electric Vehicles”, 2014
- [9] Pablo Moreno-Torres, Marcos Lafoz, Marcos Blanco, Jaime Arribas – “Passenger Exposure to Magnetic Fields in Electric Vehicles”, Intech, 2016
- [10] Maurizio di Paolo Emilio – „Automotive EMC”, Interference Technology guide series, 2018
- [11] Kenneth Wyatt – „Basic EMI Concepts”, Interference Technology guide series, 2018
- [12] Kal Mustafa – „Design and Layout Guidelines for the CDCVF2505 Clock Driver”, Texas Instruments, 2000
- [13] Vicente Rodrigues – “Automotive Component EMC Testing: CISPR 25, ISO 11452-2 and Equivalent Standards”, SAFETY & EMC, 2011
- [14] Todd Hubing – “Common Commercial, Automotive, Medical, Wireless & Military EMC standards”, Interference Technology guide series, 2018
- [15] Online:https://www.com-power.com/ah220_horn_antenna.html, 01.12.2018
- [16] Eduard Luncă – “Compatibilitate electromagnetică – Teste și măsurări specifice”, Editura Pim, Iași, 2015
- [17] Timothy Hegarty - “An overview of radiated EMI specifications for power supplies”, Texas Instrument, June 2018
- [18] Garth D’Abreu, Craig Fanning, Ammar Sarwar - “EMC Standards and Chamber Testing for Automotive Components”, InCompliance, February 2016
- [19] Enoch Eapen, Aditi Sethi - “Electric Vehicle - EMC aspects”, Icat, April 2018

- [20] Violeta-Maria Ionescu, Anca-Alexandra Săpunaru, Mihai Octavian Popescu, Claudia-Laurența Popescu - "EMC Normes For Testing Electric And Hybrid Cars", EV2019
- [21] Linda Dawson, Andrew Dawson, Alastair Ruddle, Lester Low, Rob Armstrong, "EMC Measurements and testing for FEVs," *Electrical powertrain health monitoring for increased safety of FEVs*, pp. 4-8, 25 March 2014.
- [22] Pablo Moreno-Torres, MarcosLafoz, Marcos Blanco, Jaime R. Arribas, "Passenger exposure to magnetic fields in electric vehicles," *INTECH*, pp. 47-52, 2016.
- [23] Andrea Vassilev, Alain Ferber, Christof Jan Wehermann, Olivier Pinaud, Meinhard Schilling, Alastair R. Ruddle, "Magnetic field exposure assessment in electric vehicles", *IEEE transactions on electromagnetic compatibility*, pp. 1-2, February 2015.
- [24] Martin März, Andreas Schletz, Bernd Eckardt, Sven Egelkraut, Hubert Rauh, "Power electronics system integration for electric and hybrid vehicles", *IEEE Xplore*, pp. 1-2, March 2010.
- [25] David Meeker, "Finite Element Method Magnetics", pp. 6-7, October 25, 2015. [Online]: <http://www.femm.info/Archives/doc/manual.pdf>
- [26] ICNIRP 2010: International Commission on non-ionizing Radiation Protection, ICNIRP statements-Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and Magnetic fields (1 Hz to 100 kHz), *Health Physics* 99 (6), page 818-836, 2010
- [27] ICNIRP Publication, 2009. ICNIRP Guidelines on limits of exposure to static magnetic fields. *Health Physics* 96(4):504-514; 2009, pages: 510-512. [Online]. Available <https://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPstatgdl.pdf>
- [28] [Online]: <https://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetism>
- [29] [Online]: https://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic_spectrum
- [30] Violeta-Maria Ionescu, Anca-Alexandra Săpunaru, Mihai Octavian Popescu, Claudia Laurența Popescu - „Magnetic Field Constraints in the Passenger Compartment of Electric Vehicles”, 2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe)
- [31] Violeta-Maria Ionescu, Anca-Alexandra Săpunaru, Mădălina-Andreea Lupașcu, Mihai Octavian Popescu, Claudia Laurența Popescu – „Electromagnetic Interaction between the power distribution grid and THE HV system of an electric vehicle”, FOREN2020
- [32] Popescu M.O. – Compatibilitate electromagnetică, Aplicații la Convertoare statice de putere;
- [33] Hortopan Gheorghe – Principii și tehnici de compatibilitate electromagnetică – ET Buc 2005;
- [34] Schwab A. – Compatibilitate electromagnetică, ET, București 1996 (Traducere in română);
- [35] Popescu Claudia s.a, CEM – Sinteze si aplicatii, Ed.Ars Docendi Bucuresti 2004;
- [36] http://telecom.etc.tuiasi.ro/telecom/staff/vlcehan/discipline%20predate/cem/%281%29%20CEM_introducere.pdf;
- [37] http://www.sier.ro/Articolul_6_1_2.pdf.
- [38] https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2014/april/Voltage_Classes_for_Electric_Mobility/Voltage_Classes_for_Electric_Mobility.pdf