

### CONTRIBUȚII LA EVALUAREA ȘI AMELIORAREA EMISIILOR ȘI IMUNITĂȚII ÎN COMPATIBILITATEA ELECTROMAGNETICĂ A AUTOVEHICULELOR RUTIERE

### Teză de doctorat – Rezumat

pentru obținerea titlului științific de doctor la

Universitatea Politehnica Timișoara

în domeniul de doctorat inginerie electronică, telecomunicații și tehnologii informaționale

### autor ing. Andrei-Marius SILAGHI

conducător științific Prof.univ.dr.ing. Aldo De SABATA

luna iunie anul 2019

Teza de doctorat este structurată în 5 capitole: în capitolul 1 sunt descrise standardele din domeniul Compatibilității Electromagnetice; în capitolul 2 sunt prezentate contribuțiile aduse în domeniul emisiilor; capitolul 3 prezintă soluții pentru îmbunătățirea imunității în domeniul auto; aplicații ale metamaterialelor sunt descrise în capitolul 4 iar concluziile și contribuțiile sunt prezentate în capitolul final.

### 1. Standardele din domeniul Compatibilității Electromagnetice a Autovehiculelor Rutiere

În capitolul introductiv sunt prezentate și comentate aspecte relevante din cele două standarde care sunt folosite cu precădere în domeniul Compatibilității Electromagnetice a autovehiculelor rutiere: CISPR 25 și ISO 11452. Sunt abordate următoarele metode de testare din standardul CISPR 25: testele de emisii radiate (cu Absorber Lined Shielded Enclosure și Stripline), testele de emisii conduse cu sondă de curent si cele de emisii conduse prin metoda tensiunii [1], [2]. De asemenea, sunt descrise din standardul ISO 11452 sub-capitolele ISO 11452-2 (Absorber Lined Shielded Enclosure), ISO 11452-4 (Bulk Current Injection) si ISO 11452-5 (Stripline) [3]-[6].

# 2. Contribuții la Ameliorarea Emisiilor în Compatibilitatea Electromagnetică a Autovehiculelor

Validarea compatibilității electromagnetice a autovehiculelor presupune trecerea cu succes a testelor de imunitate și de emisii electromagnetice. Emisiile electromagnetice pot fi radiate sau conduse. Standardul CISPR 25 specifică domeniul de frecvență și echipamentele utilizate pentru testarea emisiilor radiate și a emisiilor conduse în Automotive.

În capitolul 2, prezentăm principalele teste de Compatibilitate Electromagnetică privind emisiile radiate și conduse care se realizează în industria Automotive. În locul unei prezentări teoretice generale, ușor de găsit în literatura de specialitate, am ales descrierea și comentarea testelor concrete la care am luat parte, precum și evaluarea și ameliorarea lor din diferite puncte de vedere, ținând cont de incertitudine și repetabilitate. Prezentăm totodată contribuțiile proprii aduse până în prezent în legătură cu această problematică.

Măsurarea emisiilor radiate (RE – "Radiated Emissions") de către dispozitivele testate (DUT – "Device under Test") este una dintre etapele testelor de Compatibilitate Electromagnetică. În acest capitol, este descris, studiat și ameliorat un setup de măsurători

pentru emisiile radiate produse de un modul electronic din automobil. În fig. 1 se observă că detectorul de vârf a furnizat o valoare peste limita de cvasi-vârf, așa că am efectuat o nouă măsurătoare cu detectorul de cvasi-vârf (fig. 2). Valoarea dată de detectorul de cvasi-vârf a fost sub limita de cvasi-vârf. Din punctul de vedere al emisiilor radiate, DUT este declarat ca fiind corespunzător [7].



Fig. 1 Măsurarea DUT-ului cu antena biconică. Pe abscisă: frecvența (MHz); pe ordonată: intensitatea câmpului electric (dBµV/m), valori de vârf și medii [7]



Fig. 2 Re-măsurarea cu detector de cvasi-vârf a fost efectuată pentru frecvențele la care detectorul de vârf a depășit limita de cvasi-vârf [7]

De asemenea, sunt investigate diferențele care apar atunci când se utilizează antene de măsurare diferite și camere semi-anechoice diferite, notate ALSE1 și ALSE2, în testele de emisii radiate efectuate asupra aceluiași DUT. Pentru testarea emisiilor radiate am utilizat următoarele antene: două antene monopol (Monopole VAMP9243 și RodAntenna HFZ2-Z6) în intervalul 0.1-30 MHz, două antene biconice (Schwarzbeck biconical BBA9106 și Biconical HK116E) între 30-200 MHz, două antene log-periodice (Logger VUSLP9111B și Logper HL223) de la 200 MHz la 1 GHz și două antene log-periodice (Logper VUSLP9111B și LogPer HL050) de la 1 GHz la 3.2 GHz.

În fig. 3 se poate observa configurația de măsurare cu antena monopol. Măsurătorile raportate în fig. 4 au acoperit intervalul de frecvențe 100 KHz - 30 MHz și s-au bazat pe o antenă monopol polarizată vertical. Rezultatele obținute în ALSE 2 sunt reprezentate cu negru (detector de vârf) și roșu (detector de valoare medie). Rezultatele din ALSE1 sunt reprezentate cu maro (detector de vârf) și verde (detector de valoare medie).

Toate figurile menționate, precum și cele suplimentare din teză, arată că rezultatele măsurătorilor nu sunt identice, indiferent de lățimea de bandă prescrisă și antenele utilizate. În fig. 4, sunt evidente diferențe semnificative, care pot proveni de la driverele diferite utilizate de cele două receptoare de măsurare. În cazul R&S ESCI am folosit metoda FFT de la 3,5 MHz și modul receptor de la 100 KHz la 3,5 MHz. R&S ESR 7 utilizează metoda FFT pe toată gama de frecvențe. Putem concluziona că rezultatele măsurătorilor depind de configurarea testelor, uneori în mod semnificativ, deși echipamentul respectă cerințele standardelor [8].



Fig. 3 Configurația de test cu antena monopol [8]



Fig. 4 Măsurătoare cu antena monopol. Pe abscisă: frecvența (Hz); pe ordonată: intensitatea câmpului electric (dBµV/m), valori de vârf și medii [8]

Măsurarea emisiilor conduse (CE – "Conducted Emissions") este un alt test important în validarea Compatibilității Electromagnetice a autovehiculelor. În acest capitol, sunt de asemenea prezentate și comentate câteva studii de caz și sunt investigate diferite metode care pot fi utilizate pentru reducerea nivelurilor CE: conectarea de condensatoare cu valori între 10 și 220 nF pe șuruburile din mijlocul, stânga și dreapta PCB-ului (șuruburile prin care se leagă carcasa metalică de PCB); eliminarea condensatoarelor mecanice și de asemenea, înlocuirea bobinelor folosite cu unele ecranate. În fig. 5 este prezentat un test inițial eșuat. Putem vedea spike-urile în măsurătoarea cu detectorul de valoare medie în corespondență cu spike-urile de la măsurătoarea cu detectorul de vârf, iar nivelul de vârf este peste limita de bandă îngustă în acel loc. Fig. 6 arată rezultatul unei alte soluții care rezolvă problema de la 1 MHz. Ea constă în scoaterea condensatoarelor mecanice [9].



Fig. 5 Măsurătoarea inițială. Pe abscisă frecvența (Hz), pe ordonată tensiunea măsurată pe sarcina de 50 Ω a LISN (dBµV) [9]



Fig. 6 Rezultate de măsurare în cazul condensatoarelor mecanice eliminate. Pe abscisă frecvența (Hz), pe ordonată tensiunea măsurată pe sarcina de 50 Ω a LISN (dBµV) [9]

Tot în cadrul capitolului 2, este prezentată o tehnică de scanare în câmp apropiat pentru a reduce nivelurile RE astfel încât să se reducă timpul de comercializare a produsului. În fig. 7 se raportează un test inițial care este eșuat. Putem vedea că valoarea măsurată de către detectorul de vârf este deasupra limitei de bandă îngustă la 831.25 kHz, așa că am măsurat și cu detectorul de valoare medie. Diferența dintre detectorul de vârf (un nivel de 28,8 dBuV / m) și detectorul de valoare medie (un nivel de 26,3 dBuV / m) la această frecvență este sub 6 dB, astfel încât putem concluziona că testul este eșuat. Pentru a găsi o soluție pentru ca testele de emisiile radiate să treacă, am utilizat sistemul de scanare în câmp apropiat EHX + pentru a găsi sursa de emisii.

Am început cu o scanare spațială a întregului DUT pentru a găsi locația cu cele mai mari emisii (fig. 8). În cadrul unei scanări spațiale trebuie selectată o frecvență de interes, pentru care se calculează câmpul magnetic (în cazul nostru 831 kHz). Prin compararea acestei scanări spațiale cu layout-ul proiectului, am descoperit locul de unde au provenit emisiile. DUT-ul a constat dintr-un PCB cu două straturi, denumite în continuare stratul de jos și de sus.

Apoi, am făcut o scanare spectrală (fig. 9) în acea locație și am descoperit că frecvența fundamentală a semnalului cules care provine de la acel loc este de 415,5 kHz. În testul de câmp îndepărtat putem vedea această frecvență fundamentală, dar cea de-a doua armonică are o influență mult mai mare, din cauza limitei inferioare impuse de OEM în domeniul de frecvențe de 0,5-2 MHz.

După investigațiile din câmp apropiat, a fost efectuat un ultim test în camera semianecoică. Această încercare (fig. 10) reprezintă un test trecut cu succes deoarece, la aceeași frecvență (831 kHz), detectorul de vârf furnizează o valoare peste limita de bandă îngustă, dar diferența dintre detectoarele de vârf (29 dBuV / m) și medie (21,7 dBuV / m) este mai mare de 6 dB [10].

Astfel, prin utilizarea unei tehnici de scanare în câmp apropiat, am găsit sursa de emisii și am reușit să găsim o soluție astfel încât dispozitivul electronic să poată trece limitele impuse de OEM. De asemenea, prin utilizarea acestei soluții, a fost adoptată o metodă mai ieftină și mai simplă în comparație cu mai multe teste într-o cameră semi-anechoică, care ar fi fost altfel necesare.



Fig. 7 Rezultatele de măsurare ale testului inițial eșuat de emisii radiate. Pe abscisă: frecvența (Hz); pe ordonată: intensitatea câmpului electric (dBµV/m), valori de vârf și medie [10]



Fig. 9 Scanarea spectrală cu EHX+. Pe abscisă: frecvența (MHz); pe ordonată: amplitudinea tensiunii (dBµV) [10]



Fig. 10 Testul final care este pass. Pe abscisă: frecvența (Hz); pe ordonată: intensitatea câmpului electric (dBµV/m), valori de vârf și medie [10]

Relevanța testelor de EMC trebuie asigurată prin repetabilitatea acestora atât în cadrul aceluiași laborator cât și între laboratoare diferite. Unul dintre elementele importante în teste este reprezentat de camera semi-anecoică (ALSE). Este necesar ca parametrii camerelor aparținând diferitelor laboratoare să se găsească între aceleași limite, altfel testele efectuate asupra aceluiași produs vor avea rezultate diferite în laboratoare diferite.



Fig. 11 Rularea cu monopol fără ferite. Pe abscisă: frecvența (Hz), pe ordonată:intensitatea câmpului electric (dBμV/m) [11]

Asigurarea îndeplinirii acestei cerințe se numește validare de cameră. În cele ce urmează, este prezentată și discutată o metodă de validare a camerei semi-anechoice în care se desfășoară testele de emisii, iar rezultatele sunt comparate cu cele obținute în alte laboratoare [11].

În timpul măsurătorilor s-au utilizat în total 481 de frecvențe, după cum urmează: 150 frecvențe în intervalul (150 kHz - 29,95 MHz), 170 frecvențe în (30 MHz - 199 MHz) și 161 frecvențe în intervalul (200 MHz - 1000 MHz). În Anexa J din CISPR 25 se specifică că minimum 90% din datele măsurate trebuie să fie între limitele de -6dB și +6dB față de medie , deci dintr-un total de 481 puncte, un minim de 433 puncte trebuie să respecte această toleranță (doar un maxim de 55 de puncte pot depăși limita). Primul ciclu de testare a fost realizat fără corecțiile pentru limitele de -6dB și +6dB. Al doilea ciclu a fost realizat fără ferită (fig. 11) și au rezultat 70 de vârfuri aflate în afara limitei de toleranță. Cel de-al treilea ciclu (realizat cu ferite) a fost salvat în cadrul validării (fig. 12) și a arătat că doar 21 de vârfuri erau în afara limitei, și 129 erau în interior [11].



Fig. 12 Rularea cu monopol. Pe abscisă: frecvența (Hz), pe ordonată:intensitatea câmpului electric (dBµV/m) [11]



Fig. 13 Valorile de referință vs. valorile măsurate [11]

A doua măsurare a fost făcută cu antenele biconică și log-periodică: 30 MHz - 1 GHz. Toate vârfurile (331) au respectat limita de toleranță internă de la prima trecere. Astfel, dintrun total de 481 de puncte, 460 au fost în limitele toleranței -6dB și + 6dB, ceea ce a condus la un total de 95% din datele măsurate, ceea ce este în conformitate cu CISPR 25, anexa J.

După măsurătorile raportate, radiatorul a fost trimis la alte 3 locații ALSE. Acest prim ALSE va fi numit mai jos: Laboratorul 4, iar celelalte vor fi Laboratorul 1, 2 și 3. Fig. 13 reprezintă graficul conținând datele măsurate de fiecare laborator, corespunzătoare întregii game de frecvențe, în comparație cu datele de referință, inclusiv limitele +/- 6dB. Din figura de mai sus se pot deduce câteva concluzii. În ceea ce privește măsurătorile cu antena monopol, Laboratorul 1 prezintă variații mari pentru frecvențe între 20 și 29 MHz față de valorile de referință. În ceea ce privește măsurătorile cu antena log-periodică, toate laboratoarele par să se încadreze în toleranța datelor de referință

### 3. Contribuții la Ameliorarea Imunității în Compatibilitatea Electromagnetică din Industria Auto

În subcapitolul 3.2 am prezentat concepte-cheie pentru testarea imunității. Am început cu definirea imunității și am continuat cu lanțul echipamentelor utilizate pentru testare în conformitate cu standardul ISO 11452-2. Am efectuat un test de imunitate radiată pe un DUT din domeniul Automotive, pentru a evalua performanțele sale în prezența unui câmp electromagnetic, în interiorul unei camere semi-anecoice.

Am prezentat rezultatele măsurătorilor obținute cu două tipuri diferite de antene existente în laboratorul nostru: antena log-periodică și antena horn. Un exemplu de test se poate observa în fig. 14. Pe baza acestor rezultate, am deschis calea stabilirii de metode mai realiste de calibrare și de proceduri de testare cu o fiabilitate îmbunătățită, deoarece parametrii echipamentului sunt cunoscuți prin măsurare și nu numai prin datele oferite de producător [12].



Fig. 14 Generarea de CW (Undă sinusoidală nemodulată); Pe abscisă: frecvența (MHz); pe ordonată: intensitatea câmpului electric în V/m [12]

În subcapitolul 3.3 am prezentat câteva concepte-cheie pentru testarea imunității la transmițătoarelor portabile. Am început cu prezentarea procedurii utilizate pentru testare: ISO-11452-9. După aceea, am făcut o comparație între două cuploare direcționale, pentru a vedea care dintre ele se potrivește mai bine acestei aplicații.

Am măsurat, de asemenea, VSWR (fig. 15, exemplu pentru antena de 52 MHz) și am ridicat diagramele Smith (fig. 16, exemplu pentru 125 MHz) corespunzătoare pentru trei antene elicoidale utilizate în mod obișnuit la testarea imunității, pentru a vedea dacă acestea corespund valorilor nominale furnizate de producător.

În cele din urmă, am făcut teste cu cele două cuploare direcționale și cu cele trei antene și am ajuns la concluzia că trebuie să folosim un cuplor Werlatone pentru a obține rezultate mai realiste (fig. 17). Am demonstrat necesitatea de a ne baza pe parametrii măsurați ai echipamentelor în locul valorilor nominale, pentru a evita potențialele rezultate false ale testelor de imunitate. În activitatea viitoare, vom folosi rezultatele raportate la elaborarea și introducerea procedurilor corective care să permită efectuarea corectă a testelor [13].



Fig. 15 VSWR pentru antena NMHA 52MHz. Pe abscisă: frecvența (MHz); pe ordonată: VSWR corespunzător parametrului S11 [13]



Date: 16.SEP.2016 18:12:09

Fig. 16 Diagrama Smith pentru antena NMHA 125MHz [13]



Fig. 17 Testul cu ajutorul cuplorului Werlatone (antena NMHA 125MHz). Pe abscisă: frecvența (MHz); pe ordonată: puterea in W [13]

În subcapitolul 3.4 am testat efectele semnalelor CW, FM și TV analogic asupra canalelor DVB-T și DVB-C care au acționat ca zgomot aditiv. Prima concluzie este că, pentru aceeași putere injectată în canal, zgomotul Gaussian duce la cea mai mare deteriorare a BER. În timpul experimentelor am observat că, datorită multiplexării OFDM, canalul DVB-T se comportă diferit față de canalul DVB-C: la DVB-T, o împrăștiere a spectrului prin modulare scade BER, în timp ce DVB-C este mai sensibil la modulare, dar prezintă o imunitate mai mare față de semnalele CW. În cazul semnalului DVB-T, efectul interferatorului ATV poate fi asimilat unui interferator CW, dar în cazul DVB-C un interferator ATV este mai aproape de zgomotul Gaussian [14], [15].



Fig. 18 BER al semnalului DVB-T QAM64 interferat cu semnal FM comparat cu funcția AWGN BER teoretică: . Pe abscisă: SIR (dB); pe ordonată: BER [14]



Fig. 19 Semnal DVB-C interferat cu semnal analogic TV; Pe abscisă: SIR (dB); pe ordonată: BER [15]

În toate cazurile, interferatorul AWGN reprezintă o limită superioară, ducând la cea mai gravă deteriorare a BER prin comparație cu semnalele testate, pentru aceeași putere de interferență injectată.

În fig. 18 (cazul DVB-T) am comparat funcția BER vs SIR corespunzătoare aceluiași semnal cu caracteristicile teoretice echivalente BER vs.  $E_b/N_o$  pentru cazul AWGN (Additive White Gaussian Noise), înlocuind SIR cu BER.  $E_b$  reprezintă energia per bit iar  $N_0$  reprezintă densitatea spectrală a puterii de zgomot.

Așa cum se observă în fig. 19 (cazul DVB-C), BER pt cazul AWGN teoretic este mult

mai mare decât pentru cazul interferenței cu nivelul de putere echivalent cazului AWGN al semnalului ATV. În concluzie, referitor la constelații, interferatorul este clar vizibil dacă ATV este nemodulat și se împrăștie în jurul constelației dacă se folosește modulația (fig. 20).



Fig. 20 Efectul interferatorului ATV nemodulat asupra constelației 64QAM DVB-T [15]

### 4. Aplicații ale Metamaterialelor în Industria Autovehiculelor

Capitolul 4 este structurat în două părti: prima parte descrie o cutie ecranată formată din metamateriale și cea de-a două un cuplor direcțional format din metamateriale.

În prima parte am propus o soluție pentru suprimarea modurilor de cavitate rezonantă în cutiile metalice concepute pentru a proteja circuitele de înaltă frecvență. Această soluție s-a bazat pe tehnologia metamaterialelor și a prezentat noua caracteristică a funcționării începând cu frecvența zero (dc). În funcție de parametrii geometrici și ai materialelor, lățimea de bandă operațională ar putea fi mai mare de 10 GHz.

Am evaluat proprietățile structurii propuse atât din punct de vedere al metamaterialelor, adică prin analiza propriu-zisă a unei repetări periodice infinite a celulei unitate și luând în considerare două exemple de aplicare a unei versiuni finite a structurii închise într-o cutie metalică cu circuitul care trebuie să fie protejat.

Cele două abordări s-au dovedit a fi consecvente. Soluția propusă poate fi aplicată pentru ecranarea circuitelor care ocupă un loc aproape de axa cutiei în paralel cu direcția fluxului de semnal [16], [17], [18].

În a doua parte am exploatat posibilitatea de a elabora structuri periodice cu EBG, care pot fi folosite ca ecrane la realizarea unui cuplor direcțional destinat testării aferente Compatibilității Electromagnetice. Originalitatea soluției propuse constă în faptul că ecranele funcționează în joasă frecvență, începând de la frecvența zero (dc), spre deosebire de soluțiile care se găsesc în literatura de specialitate, care funcționează într-o bandă între două frecvențe diferite de zero. În fig. 21 se poate observa cuplorul direcțional având 11 celule unitate în direcția fluxului de semnal și 8 celule unitate în direcția ortogonală.

Am prezentat rezultatele obținute asupra parametrilor S calculați cu ajutorul CST Microwave Studio [19], care demonstrează funcționalitatea structurii. De exemplu, în fig. 22, parametrul S11 arată faptul că funcționarea dispozitivului nu este afectată de modurile de cavitate rezonantă până la o frecvență de aproximativ 4,78 GHz.



Am realizat studii parametrice pentru a îmbunătăți funcționarea cuplorului. Într-un alt caz particular (fig. 23) am dorit să vedem influența folosirii unei singure linii coaxiale și mărirea numărului de celule unitate. Spre deosebire de fig. 21 am utilizat 15 celule unitate în direcția fluxului de semnal și 14 celule unitate în direcția ortogonală. Dispozitivul funcționează corect până la 6 GHz. Între 6 și 8 GHz sunt lansate modurile de cavitate.

8

Frequency / GHz Fig. 22 Parametrul S11 simulat

6

(4.718, -6.1102

14

15

12

10

-40

-50

-60

0

2

Și această nouă structură a fost evaluată conform procedurilor aferente metamaterialelor (calcularea diagramei de dispersie) [20]. Am realizat diagrama de dispersie prin intermediul eigensolver-ului din CST Microwave Studio pentru următoarele cazuri: celulă unitate, celulă unitate și un conductor metalic și celulă unitate și două conductoare metalice acoperind astfel toate configurațiile prezentate anterior. După cum reiese din a treia DD (fig. 24), apar două moduri care încep de la dc: primul mod până la 6 GHz și al doilea până la 11 GHz. Aceste două moduri, care încep de la dc, corespund prezenței celor două conductoare. Cel de-al doilea conductor are ca efect dispariția benzii intezise, efectul prezenței acestuia asupra celorlalte moduri fiind destul de mic.



Fig. 23 Cutiuța modificată



Fig. 24 Diagrama de dispersie obținută prin repetarea infinită a structurii

Nu am urmărit optimizarea parametrilor cuplorului ci doar demonstrarea fezabilității conceptului. Studiul parametric în vederea furnizării unor date de proiectare va face obiectul unor cercetări viitoare. În final, cuplorul direcțional a fost realizat practic, parametrii S ai săi au fost măsurați cu un analizor de rețea, iar prin comparația rezultatelor practice cu rezultatele simulării am putut observa o bună corespondență. Cutia cu două linii coaxiale din fig. 21 a fost realizată practic în laboratorul Departamentului de Electronică și Telecomunicații din cadrul Politehnicii din Torino, Italia (reprezentare în fig. 25).



Fig. 25 Interiorul cutiei

Am comparat rezultatele parametrilor S din CST Microwave Studio cu cele măsurate în laborator cu ajutorul unui analizor de rețea Agilent. În fig. 26 se poate observa comparația dintre măsurătorile practice realizate cu analizorul de rețea și simulările din cadrul programului CST Microwave Studio (parametrul S11, S21 și S41). Din figură reiese o bună corespondență între simulări și măsurători.



Fig. 26 Simulări și măsurări realizate realizate până la frecvența de 5 GHz. Parametrul S11

### 5. Contribuții proprii

În cadrul programului doctoral am studiat 116 titluri bibliografice și de asemenea am publicat 2 articole în reviste ISI (unul dintre ele fiind acceptat spre publicare la o revistă ISI Q1 – IEEE Access), 15 articole la conferințe indexate ISI Proceedings, 2 articole în reviste BDI și 5 articole la conferințe indexate BDI. Doresc să remarc faptul că un articol din cadrul tezei a fost citat în IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility (revistă ISI indexată Q3). Enumăr mai jos contribuțiile proprii aduse în această teză.

În capitolul introductiv:

- Am prezentat și comentat aspecte relevante din cele două standarde care sunt folosite cu precădere în domeniul Compatibilității Electromagnetice a autovehiculelor rutiere: CISPR 25 și ISO 11452.
- Am prezentat și comentat următoarele metode de testare din standardul CISPR 25: testele de emisii radiate (cu Absorber Lined Shielded Enclosure și Stripline), sub-capitolul 1.3, testele de emisii conduse prin metoda tensiunii (sub-capitolul 1.4) și cele de emisii conduse cu sondă de curent (sub-capitolul 1.5).
- De asemenea, am descris, din standardul ISO 11452, părțile ISO 11452-2 (Absorber Lined Shielded Enclosure), sub-capitolul 1.7, ISO 11452-4 (Bulk Current Injection) sub-capitolul 1.8 și ISO 11452-5 (Stripline), sub-capitolul 1.9.

În capitolul 2:

- Am prezentat și comentat principalele teste de Compatibilitate Electromagnetică privind emisiile radiate și conduse care se realizează în industria Automotive și am realizat un studiu bibliografic la începutul fiecărui sub-capitol.
- În locul unei prezentări teoretice generale, ușor de găsit în literatura de specialitate, am ales descrierea și comentarea testelor concrete la care am luat parte, precum și evaluarea lor din diferite puncte de vedere ținând de incertitudine și repetabilitate.
- Am prezentat totodată contribuțiile proprii aduse până în prezent în legătură cu această problematică:
- configurarea setup-ului de test bazat pe date măsurate cu antene diferite, măsurători efectuate pentru a determina care dintre antene se potrivește mai bine în aplicația dată;
- prezentarea echipamentelor principale utilizate pentru testarea conform standardului general pentru testarea emisiilor radiate CISPR 25 și elaborarea configurației de măsurare pe baza măsurătorilor efectuate anterior care au evaluat performanțele echipamentului (de exemplu, ale antenelor);
- În sub-capitolele 2.2 și 2.3 este descris, studiat și ameliorat un setup de măsurători pentru emisiile radiate produse de la un modul din automobil. De asemenea, sunt investigate diferențele care apar atunci când se utilizează antene de măsurare diferite și camere semi-anechoice diferite în testele de emisii radiate efectuate asupra aceluiași DUT; a fost realizată, de exemplu, o comparație între factorii de antenă ai antenelor biconică și log-periodică și între log-periodică și horn.
- În sub-capitolul 2.4, am prezentat și comentat câteva studii de caz și am investigat diferite metode care pot fi utilizate pentru reducerea nivelurilor de emisii conduse (CE): conectarea de condensatoare cu valori între 10 și 220 nF pe șuruburile din mijlocul, stânga și dreapta PCB-ului (șuruburile prin care se leagă carcasa metalică de PCB); eliminarea condensatoarelor mecanice și de asemenea, înlocuirea bobinelor folosite cu unele ecranate.
- Tot în cadrul capitolului 2, în sub-capitolul 2.5, am prezentat o tehnică de scanare în câmp apropiat pentru a ghida găsirea de soluții de reducere a nivelurilor emisiilor radiate astfel încât să se reducă timpul de comercializare a produsului; am prezentat rezultate de măsurare în câmp îndepărtat și în câmp

apropiat, precum și soluțiile de reducere a radiațiilor electromagnetice ale produsului.

- În cele din urmă, în sub-capitolul 2.6, este prezentată și discutată o metodă de validare a camerei semi-anechoice în care se desfășoară testele de emisii, iar rezultatele sunt comparate cu cele obținute în alte laboratoare.
- A fost prezentată și folosirea tehnicilor de depanare a camerei în gama de frecvențe a antenei monopol, deoarece, inițial, în afara limitelor acceptate au fost găsite prea multe vârfuri de câmp electromagnetic.

În capitolul 3:

- În sub-capitolul 3.2 am prezentat și comentat concepte-cheie pentru testarea imunității echipamentelor electronice din industria Automotive la radiații electromagnetice. Am început cu definirea imunității și am continuat cu lanțul echipamentelor utilizate pentru testare în conformitate cu standardul ISO 11452-2. Am ales ca punct de plecare un test de imunitate radiată pe un DUT din domeniul Automotive, pentru a evalua performanțele sale în prezența unui câmp electromagnetic, în interiorul unei camere semi-anechoice.
- Am prezentat rezultatele măsurătorilor obținute cu două tipuri diferite de antene existente în laboratorul nostru: antena log-periodică și antena horn. Pe baza acestor rezultate, am stabilit metode realiste de calibrare și proceduri de testare cu o fiabilitate îmbunătățită, deoarece parametrii echipamentului au fost cunoscuți prin măsurare și nu numai prin datele date de producător.
- În sub-capitolul 3.3 am prezentat câteva concepte-cheie pentru testarea imunității echipamentelor electronice din dotarea autovehiculelor moderne la emisiile transmițătoarelor portabile. Am început cu prezentarea procedurii utilizate pentru testare, bazate pe standardul ISO-11452-9. După aceea, am făcut o comparație între două cuploare direcționale, pentru a vedea care dintre ele se potrivește mai bine acestei aplicații.
- Am măsurat, de asemenea, VSWR și am ridicat diagramele Smith corespunzătoare pentru trei antene elicoidale utilizate în mod obișnuit la testarea imunității pentru a vedea dacă acestea corespund valorilor nominale furnizate de producător. În cele din urmă, am făcut teste cu cele două cuploare direcționale și cu cele trei antene și am ajuns la concluzia că este recomandabilă folosirea unui cuplor Werlatone pentru a obține rezultate mai realiste.
- Am demonstrat necesitatea de a ne baza pe parametrii măsurați ai echipamentelor în locul valorilor nominale din specificațiile producătorilor, pentru a evita potențiale rezultate falsificate ale testelor de imunitate.
- În sub-capitolul 3.4 am testat efectele semnalelor CW, FM și TV analogic (ATV) asupra canalelor DVB-T și DVB-C, când acestea acționează ca zgomot aditiv. Am realizat curbe BER vs. SIR în cele trei cazuri.
- Am prezentat spectrul unui semnal DVB-T interferat cu un semnal ATV având aceeași putere a canalului (puterea în canal a semnalului DVB-T este egală cu puterea în canal a interferatorului ATV). Am ilustrat de asemenea impactul unui interferator ATV nemodulat și modulat asupra constelației 64QAM DVB-T.

În capitolul 4:

• În sub-capitolul 4.2 am prezentat o soluție pentru suprimarea modurilor de cavitate rezonantă în cutiile metalice concepute pentru a proteja circuitele de înaltă frecvență. Această soluție s-a bazat pe tehnologia metamaterialelor și a prezentat noua caracteristică a funcționării începând cu dc. În funcție de

parametrii geometrici și ai materialelor, lățimea de bandă operațională ar putea fi mai mare de 10 GHz.

- Am evaluat proprietățile structurii propuse atât din perspectiva metamaterialelor, adică prin analiza propriu-zisă a unei repetări periodice infinite a celulei unitate cât și luând în considerare două exemple de aplicare a unei versiuni finite a structurii închise într-o cutie metalică cu circuitul care trebuie să fie protejat.
- În sub-capitolul 4.3, am exploatat posibilitatea de a elabora structuri periodice cu EBG, care pot fi folosite ca ecrane la realizarea unui cuplor direcțional destinat testării aferente Compatibilității Electromagnetice. Originalitatea soluției constă în faptul că ecranale funcționează în joasă frecvență, începând de la frecvența zero (dc), spre deosebire de soluțiile prezentate în literatură, care funcționează între două frecvențe diferite de zero.
- În sub-capitolul 4.3.2 am prezentat rezultatele obținute în ceea ce privește parametrii S simulați cu ajutorul CST Microwave Studio, care demonstrează funcționarea structurii.
- În sub-capitolul 4.3.3 am prezentat rezultatele unor studii parametrice efectuate pentru a testa și eventual îmbunătăți funcționarea cuplorului: eliminarea unor rânduri de celule unitate, introducerea unor discontinuități, și folosirea unei singure linii coaxiale cu mai multe celule unitate în interiorul cutiei.
- Și această nouă structură a fost evaluată conform procedurilor aferente metamaterialelor (calcularea diagramei de dispersie, sub-capitolul 4.3.5): celulă unitate, celulă unitate și un conductor metalic și celulă unitate și două conductoare metalice, pentru a acoperi toate configurațiile prezentate anterior.
- În final, în subcapitolul 4.3.6, am descris cum cuplorul direcțional a fost realizat practic, parametrii S ai săi au fost măsurați cu un analizor de rețea, iar prin comparația rezultatelor practice cu rezultatele simulării s-a putut observa o bună corespondență.

## 6. Bibliografie

- International Standard CISPR 25, "Vehicles, boats and internal combustion engines

   Radio disturbance characteristics Limits and methods of measurement for the
   protection of on-board receivers", 3.0 ed. 2008.
- 2. A. Schwab, W. Kurner, *Electromagnetic Compatibility*, București: AGIR, 2013 (jn Romanian translated from German).
- 3. ISO 11452-1:2005 Road vehicles Component test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy: International Standardization Organisation, 2005, Part 1: General principles and terminology.
- 4. ISO 11452-2:2004 Road vehicles Component test methods for electrical disturbances by narrowband radiated electromagnetic energy: International Standardization Organisation, 2004, Part 2: Absorber-Lined Shielde Enclosure.
- 5. ISO 11452-4:2011 Road vehicles Component test methods for electrical disturbances by narrowband radiated electromagnetic energy: International Standardization Organisation, 2011, Part 4: Harness excitation methods.
- 6. ISO 11452-5:2002 Road vehicles Component test methods for electrical disturbances by narrowband radiated electromagnetic energy: International Standardization Organisation, 2002, Part 5: Stripline.

- A. SILAGHI, E. Tolan, A. De Sabata, A. Buta, "Measurement of radiated emissions from an automotive cluster", Electronics and Telecommunications (ISETC), 2016 12th IEEE International Symposium on, 27-28 Oct 2016, Timisoara, Romania, pp. 21-24, 2016.
- A. SILAGHI, C. Balan, E. Tolan, A. De Sabata, "The influence of measurement setups in radiated emissions testing", Engineering of Modern Electric Systems (EMES), 2017 14th International Conference on, 1-2 June 2017, Oradea, Romania, pp. 220-223, 2017.
- 9. A. SILAGHI, A. Buta, S. Baderca, A. De Sabata, "Methods for reducing Conducted Emissions levels", 22nd IMEKO TC4 International Symposium and 20th International Workshop on ADC Modelling and Testing 2017, 14-15 September 2017, Iasi, Romania, 2017, pp. 352-355.
- A. SILAGHI, R. Aipu, A. De Sabata, P. M. Nicolae, "Near-field scan technique for reducing Radiated Emissions in Automotive EMC: A Case Study", 2018 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and 2018 IEEE Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC/APEMC 2018), 14-18 May 2018, Singapore, Singapore, 2018, pp. 831-836.
- 11. **A. SILAGHI**, R. Aipu, A. De Sabata, F. Alexa, "Absorber Lined Shielded Enclosure Chamber Validation", 2018 13th International Symposium on Electronics and Telecommunications (ISETC 2018), 8-9 November 2018, Timisoara, Romania, 2018.
- A. SILAGHI, A. De Sabata, F. Alexa, A. Buta, S. Baderca, "Measurement of radiated immunity in the automotive industry: Key concepts", Electronics and Telecommunications (ISETC), 2016 12th IEEE International Symposium on, 27-28 Oct 2016, Timisoara, Romania, pp. 25-28, 2016.
- A. SILAGHI, A. De Sabata, M. Silaghi, "Testing Immunity to Portable Transmitters with Helical Antennas: Key concepts", 2016 IEEE 22nd International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME 2016), 20-23 October 2016, Baile Felix, Oradea, Romania, 2016, pp. 270-273.
- A. SILAGHI, T. Petrita, U. L. Rohde, M. Silaghi, "Performance of the reception of DVB signals in the presence of a communication signal interferer", 2014 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe 2014), 1-4 September 2014, Gothenburg, Sweden, 2014, pp.164-168.
- 15. **A. SILAGHI**, F. Alexa, T. Petrita, H. Silaghi, M. Silaghi, "DVB demodulation in presence of analogic interferer", 2014 11th International Symposium on Electronics and Telecommunications (ISETC 2014), 14-15 November 2014, Timisoara, Romania, 2014, pp.1-4.
- D. Sievenpiper, L. Zhang, F. J. Boas, N. G. Alexópoulos, E. Yablonovitch, "Highimpedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band", IEEE Trans. MTT, vol. 47, no. 11, pp. 2059-2074, Nov. 1999.
- A. De Sabata, L. Matekovits, A. SILAGHI, "Metamaterial based screening box working from DC up to GHz range", 2015 International Symposium on Signals, Circuits and Systems (ISSCS 2015), 9-10 July 2015, Iasi, Romania, pp. 1-4, 2015.
- A. De Sabata, L. Matekovits, "Reduced complexity biasing solution for switched parallel-plate waveguide with embedded active metamaterial layer", Journal of Electromagnetic Waves and Applications (JEMWA), vol. 26, no. 14/15, pp. 1828-1836, 2012.
- 19. www.cst.com
- 20. L. Brillouin, Wave Propagation in Periodic Structures, New York: Dover, 1953.