

**STUDII ȘI CERCETĂRI
PRIVIND ANALIZA ȘI DIAGNOSTICAREA
ZGOMOTELOR ȘI VIBRAȚIILOR
AUTOVEHICULELOR**

- REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT -

Autor,

Ing. Nicolae-Adrian NIȚU

Conducător de doctorat,

Prof. Univ. Habil. Dr. Ing. Carmen BUJOREANU

IAȘI, 2024

UNIVERSITATEA TEHNICĂ "GHEORGHE ASACHI" DIN IAȘI
RECTORATUL

Către

Vă facem cunoscut că, în ziua de **24.05.2024**, la ora **10:00**, în **Sala de conferințe Cezar Opreșan (M3)**, va avea loc susținerea publică a tezei de doctorat intitulată:

**„STUDII ȘI CERCETĂRI PRIVIND ANALIZA ȘI DIAGNOSTICAREA
ZGOMOTELOR ȘI VIBRAȚIILOR AUTOVEHICULELOR”**

elaborate de domnul **ING. NICOLAE-ADRIAN NIȚU** în vederea conferirii titlului științific de doctor.

Comisia de doctorat este alcătuită din:

- | | |
|---|------------------------|
| 1. Prof. univ. dr. ing. MUNTEANU Corneliu
Universitatea Tehnică "Gheorghe Asachi" din Iași | președinte |
| 2. Prof. univ. dr. ing. BUJOREANU Carmen
Universitatea Tehnică "Gheorghe Asachi" din Iași | conducător de doctorat |
| 3. Prof. univ.dr.ing. ISPAS Nicolae
Universitatea „Transilvania” din Brașov | referent oficial |
| 4. Conf.univ.dr. ing. GRĂMESCU Bogdan
Universitatea Națională de Știință și Tehnologie POLITEHNICA
București | referent oficial |
| 5. Prof. univ. dr. ing. RAKOSI Edward
Universitatea Tehnică "Gheorghe Asachi" din Iași | referent oficial |

Cu această ocazie vă invităm să participați la susținerea publică a tezei de doctorat.

RECTOR,

Prof. univ. dr. ing. Dan CASCAVAL



Secretar universitate,

Ing. Cristina NAGIȚ

Cuvânt înainte

Elaborarea tezei de doctorat este rezultatul punerii în practică a unei idei de cercetare, născută în anii studenției și pe care am aprofundat-o de-a lungul a 24 de ani de activitate în domeniul industriei autovehiculelor.

Tema analizei și diagnosticării zgomotelor și vibrațiilor autovehiculului este un subiect amplu ce oferă potențial de explorare, iar, prin intermediul acestei lucrări, sper să îmi aduc și eu umila contribuție la dezvoltarea acestei metode de diagnosticare pe cale neinvazivă.

Doresc să mulțumesc, în mod deosebit, îndrumătorului meu științific, doamnei profesor universitar doctor inginer Carmen BUJOREANU, pentru sprijinul competent și sfaturile valoroase pe care mi le-a acordat pe tot parcursul cercetării mele academice.

Recunoștința mea se îndreaptă, de asemenea, către Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași, Facultatea de Mecanică, pentru oportunitatea de a-mi desfășura cercetarea în cadrul Școlii Doctorale și de a beneficia de experiența și prestigiul câștigat pe parcursul celor 210 ani de inginerie.

Nu în ultimul rând, aș vrea să mulțumesc familiei care m-a susținut și încurajat să duc la bun sfârșit această cercetare științifică.

CUPRINS

Capitolul 1. Evaluarea surselor generatoare de zgomot și vibrații în autovehicule.....	1
1.1 Zgomotul.....	1
1.2 Vibrația.....	2
1.3 Surse generatoare de zgomot în autovehicule.....	3
1.4 Surse generatoare de vibrații în autovehicule.....	4
1.5 Impactul generat de zgomotele și vibrațiile autovehiculelor	5
1.6 Necesitatea diagnosticării autovehiculului	6
1.7 Concluzii. Obiectivele tezei de doctorat	7
Capitolul 2. Stadiul actual al cercetărilor privind analiza și diagnosticarea zgomotelor și vibrațiilor autovehiculelor	9
2.1 Studii teoretice și modele matematice	9
2.1.1 Scopul studiului privind procesul de diagnosticare vibroacustică a autovehiculelor	9
2.1.2 Secvențierea vehiculului pe zone de interes vibroacustic	9
2.1.3 Studii pe modele matematice.....	10
2.1.4 Concluzii parțiale.....	14
2.2 Echipamente și soluții tehnice existente pentru analiza zgomotelor și vibrațiilor autovehiculului	14
2.2.1 Senzorul de detonație	15
2.2.2 Diagnosticarea acustică a sistemului audio	15
2.2.3 Echipamente complementare pentru evaluarea vibroacustică a autovehiculelor ..	17
2.2.4 Concluzii parțiale și direcții de urmat în cadrul cercetărilor proprii	18
Capitolul 3. Contribuții teoretice privind realizarea unui sistem de monitorizare a zgomotelor și vibrațiilor autovehiculelor	20
3.1 Recunoașterea semnalelor de zgomot și vibrație	20
3.2 Analiza propagării zgomotelor și vibrațiilor.....	21
3.3 Modelul uman al percepției zgomotelor și vibrațiilor.....	23
3.4 Localizarea bidimensională a surselor de zgomot și vibrație.....	24
3.5 Localizarea tridimensională a surselor de zgomot și vibrație	26
3.5.1 Localizarea tridimensională în mediu omogen.....	26
3.5.2 Localizarea tridimensională în mediu neomogen.....	27
3.6 Reflexia zgomotelor și vibrațiilor	28
3.7 Atenuarea zgomotelor și vibrațiilor.....	29
3.8 Filtrarea zgomotelor și vibrațiilor parazite	30
3.9 Considerații asupra detecției tridimensionale de zgomot și vibrație în autovehicule..	31
Capitolul 4. Contribuții experimentale privind dezvoltarea unui sistem de monitorizare și analiză a zgomotelor și vibrațiilor autovehiculelor	32
4.1 Perspective privind cercetarea experimentală a modelului de echipament de monitorizare a zgomotelor și vibrațiilor autovehiculelor	32

4.2	<i>Modelul de detecție tridimensională utilizat în cadrul studiului</i>	33
4.2.1	Selectarea plăcii optime de achiziție de date	33
4.2.2	Stabilirea modelului de accelerometru utilizat	35
4.2.3	Stabilirea modelului de microfon utilizat	37
4.2.4	Stabilirea soluției software utilizată pentru procesarea și analiza semnalelor de zgomote și vibrații	38
4.3	<i>Algoritmul de studiere al comportamentului vibroacustic al autovehiculului</i>	39
4.4	<i>Studiul experimental al comportamentului vibroacustic al autovehiculului în condiții variate de funcționare</i>	43
4.4.1	Stabilirea criteriilor de selecție eficace a autovehiculului de studiu	43
4.4.2	Etapele achiziției experimentale de date prin monitorizarea zgomotelor și vibrațiilor autovehiculului de studiu.....	45
Capitolul 5.	Rezultate experimentale proprii și validarea lor	48
5.1	<i>Prelucrarea rezultatelor obținute în cadrul experimentelor</i>	48
5.2	<i>Prelucrarea rezultatelor brute într-o formă ușor interpretabilă</i>	55
5.3	<i>Analiza comparativă a rezultatelor</i>	58
5.4	<i>Validarea rezultatelor teoretice</i>	66
5.5	<i>Concluzii</i>	74
Capitolul 6.	Concluzii finale, contribuții personale și direcții de cercetare ulterioară	76
	Bibliografie selectivă	80
	Lista de lucrări	86

STRUCTURA ȘI CONȚINUTUL TEZEI

Capitolul 1 abordează evaluarea surselor generatoare de zgomot și vibrații în autovehicule. Perspectiva de studiu pornește de la faptul că acest tip de informație este tratată drept bază pentru monitorizarea stării de funcționare (normală sau în stare de defect) a principalelor sisteme / agregate ale autovehiculului, ce sunt principalele surse.

Capitolul 2 prezintă stadiul actual al cercetărilor privind analiza și diagnosticarea zgomotelor și vibrațiilor autovehiculelor, cu referire la soluțiile existente atât pe partea de exploatare, cât și pe latura de îmbunătățire a calității procesului de fabricație. De asemenea, sunt evaluate modelele matematice de interes pentru studiul nostru, precum și tehnicile de analiză a informației vibroacustice.

Capitolul 3 cuprinde contribuții teoretice privind realizarea unui sistem de monitorizare a zgomotelor și vibrațiilor autovehiculelor. S-a pornit de la recunoașterea semnalelor de zgomot și vibrații, luându-se în calcul analiza propagării semnalelor de interes. În plus s-a studiat atât localizarea bidimensională, cât și cea tridimensională în mediu omogen și, respectiv, neomogen, ținând cont de fenomenele de perturbare a semnalelor studiate.

Capitolul 4 se referă la contribuțiile experimentale privind dezvoltarea unui sistem de monitorizare și analiză a informației vibroacustice din autovehicul. Astfel s-au pus bazele modelului de detecție tridimensională, pornind de la procesul de selecție a componentelor utilizate, cum ar fi placa de achiziție de date, modelele de accelerometre și, respectiv, de microfoane din cadrul matricei de senzori. Coroborat s-a stabilit aplicația software utilizată pentru achiziția și procesarea semnalelor eșantionate. Referitor la materialul de studiu, s-a determinat modelul de autovehicul al cărui comportament vibroacustic urmează a fi studiat atât în stare de bună funcționare, cât și în stare indusă de defect, ale cărei manifestări sunt cunoscute. Aici ar fi de menționat contribuția personală privind identificarea celor două clase principale de autovehicul și anume cu compartiment motor deschis sau, respectiv, închis, din punct de vedere al interacționării vibroacustice cu factorii perturbatori din mediul ambiant. Tot în cadrul acestui capitol s-au conturat etapele procesului de achiziție experimentală a semnalelor de zgomote și vibrații de la autovehiculul de studiu.

Capitolul 5 înglobează rezultatele experimentale proprii privind procesul de eșantionare și analiză a informației vibroacustice a autovehiculului studiat. În partea de început este descrisă prelucrarea informației obținute în urma măsurătorilor, pentru a facilita procesul analiză a rezultatelor și pentru ușurința interpretării. Aici discutăm despre analiza evoluției în timp a semnalelor de accelerație, dar și despre analiza în frecvență ca urmare a procesării rapide Fourier a semnalelor. În primele etape a măsurătorilor a fost important să se identifice pozițiile eficiente de amplasare a senzorilor, precum și componența optimă a matricei de senzori. Odată cu evoluția procesului de înregistrare experimentală, se descrie partea de analiză comparativă a rezultatelor obținute pentru diferite regimuri de eșantionare, cum ar fi stare normală și stare de defect, amplasare diferită a senzorilor, precum și proporție diferită între accelerometre și microfoane în cadrul matricei de senzori. Pe final se tratează latura de validare a rezultatelor teoretice din punct de vedere al semnalelor brute, respectiv procesate, coroborat cu utilizarea unor dispozitive externe.

Capitolul 6 se axează pe zona de concluzii finale, contribuții personale și direcții de cercetare ulterioară. Ca și contribuții personale putem evidenția elaborarea metodei neinvazive de analiză a zgomotelor și vibrațiilor autovehiculului, coroborat cu identificarea celor două tipuri de volume vibroacustice ale compartimentului motor.

INTRODUCERE

Sunetele și vibrațiile sunt parte integrantă din mediul înconjurător și, din acest motiv, involuntar, fiecare specie și-a dezvoltat un sistem specific de percepție, filtrare și analiză a acestora. Un exemplu elocvent îl reprezintă ecolocația (din limba greacă *echo* = ecou /sunet și din limba latină *locare* = a localiza): o metodă de orientare în mediu și de detectare a obiectelor și obstacolele în timpul deplasării (Schenkman & Gidla, 2020).

Unul din domeniile de referință ar fi medicina, unde s-a ajuns la dezvoltarea unei metode și a unui sistem de valori ce permite receptarea și analiza informației vibroacustice de interes pentru afecțiunea care este monitorizată. De fapt, creierul uman, prin învățare, ajunge să folosească simțurile proprii persoanei ce diagnostichează (auzul & simțul tactil) pentru prelevarea informațiilor, pentru ca, apoi, printr-un mecanism intern complex, să realizeze filtrarea pe informație utilă și evaluarea acesteia din punct de vedere al mărimii amplitudinii.

Atributul actual al industriei autovehiculului este factorul timp, observându-se în consecință tendința de sistematizare și eficientizare a metodelor și tehnologiilor ce țin atât de exploatarea autovehiculelor, cât și de întreținerea și reparația acestora ce sunt în continuă evoluție. Evoluția constă în elaborarea unor strategii complexe ce au la bază faptul că la momentul actual, în industria de profil, există un deficit puternic de personal cu înaltă calificare și pregătire, iar soluția o reprezintă substituirea parțială a abilităților acestora cu soluții software&hardware care să necesite o intervenție minimă și nu de foarte înaltă pregătire a factorului uman. Tot ținând cont de factorul timp se observă orientarea industriei de autovehicule spre metode de diagnosticare neinvazive astfel încât autovehiculul să fie imobilizat în principal doar pentru operațiile de întreținere și reparație, rezultând astfel eficientizarea costurilor totale de operare (TCO).

Dacă este să analizăm din punct de vedere economic, anual, principalii producători de autovehicule trebuie să suporte costuri semnificative, de ordinul miliardelor de dolari USD, datorate procesului de garanție a produselor vândute (Worldwide Auto Warranty Expenses, 2020), costuri ce se împart între producătorul autovehiculului ca produs finit cu pondere de 85% și furnizorii de componente de prim montaj cu pondere de 15 % (Automotive Warranty Report, 2013). Una din cauzele costurilor cu garanția o reprezintă diagnoza inexactă pe timpul procesului de întreținere și reparații, cu o pondere de 25% din motivele totale de garanție (Bearing Point, 2009).

Având în vedere că există două tendințe contrarii (parcul auto este în continuă creștere, concomitent cu creșterea poluării fonice a mediului înconjurător), diagnosticarea defectelor autovehiculelor prin metode vibroacustice este de dorit, întrucât oferă posibilitatea unei analize eficiente și rapide a comportării lor dinamice, putând să determine cauzele de defectare (Deulgaonkar et al., 2020).

În concluzie, cercetările privind zgomotele și vibrațiile care apar în autovehicule reprezintă o direcție de cercetare de viitor și un subiect de interes pe care l-am dezvoltat în această lucrare.

CAPITOLUL 1. EVALUAREA SURSELOR GENERATOARE DE ZGOMOT ȘI VIBRAȚII ÎN AUTOVEHICULE

1.1 Zgomotul

Sunetul poate fi asimilat ca fiind o formă de energie ce se propagă sub formă de unde de presiune printr-un mediu, cum ar fi aerul, apa sau alte materiale. În fizică, sunetul este definit ca o serie de fluctuații periodice ale presiunii într-un mediu, care creează variații de presiune ce se propagă în formă de unde sonore, având drept caracteristici de bază frecvența și amplitudinea.

Clasificarea sunetelor în funcție de frecvență duce la următoarele categorii ce sunt raportate la sensibilitatea urechii umane:

- Sunete joase sau **infrasunete**: ce au o frecvență sub limita inferioară a auzului uman, adică sub 20 Hz. De obicei, aceste sunete sunt resimțite mai degrabă ca vibrații sau senzații decât drept sunete clare;
- Sunete medii sau sunete **perceptibile** de către urechea umană: ce au o frecvență cuprinsă între 20 Hz și 20 kHz;
- Sunete înalte sau **ultrasunete**: ce au o frecvență peste 20 kHz și sunt de obicei în afara auzului uman;
- Sunete foarte înalte sau **hipersunete**: ce au o frecvență în jur de 10^{10} Hz sau mai mare și sunt de asemenea în afara auzului uman.

Pentru diagnosticarea pe cale vibroacustică a autovehiculelor sunt de interes atât nivelul de presiune sonoră (SPL) - mărime scalară ce oferă informații referitor la nivelul limită care, dacă este depășit, poate indica o anomalie (stare de defect), dar și nivelul de intensitate sonoră - mărime vectorială ce oferă informații cu privire la locația sursei de anomalie (stare de defect).

În cazul unui autovehicul se regăsesc atât surse de zgomot cu transmisie prin aer, cât și zgomote cu transmisie prin structură (cum ar fi, de exemplu, sistemul de alimentare cu combustibil sau blocul motor). Tabelul 1.1 exemplifică tipurile de zgomot (atât cu transmisie prin aer, cât și prin structură) uzuale defectelor ce se pot manifesta pe durata de viață a autovehiculelor, asociat cu domeniul de frecvență caracteristic.

Tabelul 1.1. Tipuri de zgomot asociate cauzelor de defect ale autovehiculelor

Tip de zgomot	Domeniu de frecvență	Posibile cauze
Huruît (rumbling)	450 – 590 Hz (Lee et al., 2019)	<ul style="list-style-type: none"> • neetanșeități în sistemul de evacuare • sistem de aprindere defect în cazul motorului pe benzină; • funcționarea incorectă a post-tratării gazelor de evacuare
Zbârnâit (droning)		<ul style="list-style-type: none"> • țevă de eșapament îndoită, • echipamente auxiliare, • arbore cardanic îndoit,
< 50 km/h	30 – 60 Hz	
50 – 80 km/h	60 – 100 Hz	

Tip de zgomot	Domeniu de frecvență	Posibile cauze
> 80 km/h	100 – 200 Hz (Student Workbook, 2005)	<ul style="list-style-type: none"> • braț de suspensie avariat, • sistem de admisie a aerului defect.
Bătaie (knocking)	5 kHz – 7 kHz (Thomas, 1995)	<ul style="list-style-type: none"> • setarea incorectă a sistemului de distribuție sau a lanțului / curelei de distribuție uzate; • bujii defecte sau tip incorect; • joc termic mare la supape; • lagăre uzate de arbore cotit, arbore cu came sau bielă.
Șuierat (hissing)	4500 – 5000 Hz (Paiman et al., 2018)	<ul style="list-style-type: none"> • aer în sistemul hidraulic (cum ar fi sistemul de răcire, sistemul de alimentare cu combustibil sau sistemul de servodirecție); • pompă de lichid de răcire gripată • patinarea sau deteriorarea curelei de accesorii; • sistem de evacuare a motorului neetanș.

1.2 Vibrația

Vibrația este un fenomen fizic care constă în mișcarea oscilatorie în jurul unei poziții de echilibru a unui obiect sau a unui sistem. Această mișcare oscilatorie poate fi periodică sau neregulată și poate avea frecvențe diferite. Vibrația poate fi generată de o varietate de surse, cum ar fi grupul motopropulsor, trenul de rulare, mecanismul de direcție sau suspensia autovehiculului (Xin Q., 2011).

Frecvența armonicii fundamentale (de ordin I) a motorului, care este direct legată de turația arborelui cotit, ar putea fi calculată folosind ecuația (1):

$$f_e = \frac{rpm}{60} [Hz] \quad (1)$$

unde:

f_e = frecvența armonicii fundamentale a motorului; rpm = turația motorului (în rotații pe minut).

Direct legat de armonica fundamentală a motorului este arborele cotit care este mai puțin probabil să fie dezechilibrat (Alaci et al., 2023), dar mult mai probabil ar putea fi vorba de o defecțiune a volantei cu masă dublă.

Pentru frecvența armonicilor de ordin multiplu ale motorului trebuie aplicată ecuația (2):

$$f_{ez} = f_e \times z [Hz] \quad (2)$$

unde:

f_{ez} = frecvența armonicii „z” a motorului; z = factor de multiplicare; f_e = frecvența armonicii fundamentale a motorului.

Cele mai cunoscute sunt armonicile de ordinul 2 și 3 ale motorului. Armonica motorului de ordinul 2 este generată de translația pistoanelor în cămășile cilindrilor. Pe de altă parte armonica de ordinul 3 poate avea drept sursă o articulație cu viteză constantă.

Pentru a obține o armonică de ordine fracționată a motorului trebuie aplicată ecuația (3):

$$f_{ey} = \frac{f_e}{y} [Hz] \quad (3)$$

unde:

f_{ey} = frecvența ordinului fracției armonicii motorului; y = factorul de fracție; f_e = frecvența armonicii fundamentale a motorului.

1.3 Surse generatoare de zgomot în autovehicule

În utilizarea curentă a unui autovehicul, ca grupe componente generatoare de zgomote, atât în stare de bună funcționare, cât și în stare de defect, sunt următoarele: grupul motopropulsor, trenul de rulare, sistemul de direcție, sistemul de frânare, suspensia autovehiculului, elemente de caroserie.

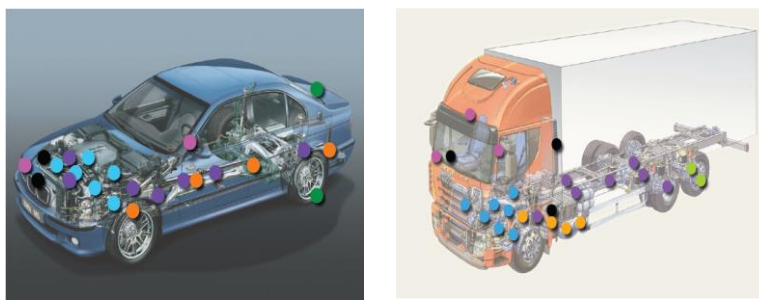


Figura 1.1. Distribuția surselor generatoare de zgomot pe autovehicul

În literatura de specialitate se remarcă tendința de clasificare a surselor de zgomot în autovehicul coroborat cu zona din volumul acestuia unde se manifestă, rezultând următoarele grupuri de elemente, corespunzătoare codului de culori aferent cele două cazuri prezentate în Figura 1.1 (European Automobile Manufacturers Association, 2012):

- *Motorul cu ardere internă* ce include: turbina de supraalimentare, compresorul sistemului de climatizare, galeriile de aspirație / evacuare, blocul motor, chiulasa, capacul de chiulasă, alternatorul, etc.
- *Sistemul de aspirație a aerului* compus din: suprafețele utile, tubulatura de inducție, filtrele de aer, furtunuri de distribuție, etc.
- *Grupul motopropulsor* reprezentat de: transmisie (manuală / automată), arbori planetari / cardanici, diferențiale, transmisia finală din butuc, etc.
- *Sistemul de evacuare* definit de principalele suprafețe de radiație: tubulatură frontală, convertor catalitic, amortizor de zgomot median / posterior, etc.
- *Anvelope* ce se manifestă atât prin zgomotul direct dependent de rulare, cât și prin cel dependent de sarcină.
- *Nenominal* ce acoperă: efectul aerodinamic al caroseriei, suspensia cabinei (zgomotele funcționale acolo unde este cazul), efectul acustic al servodirecției hidraulice la capete de cursă, mai ales atunci când autovehiculul este încărcat la capacitate nominală sau peste, etc.

Factorul de impact asupra comportamentului acustic al grupelor de mai sus variază în funcție de clasa de vehicul (Parlamentul European și Consiliul Uniunii Europene, 2018) la care ne referim și anume:

M = autovehicul destinat transportului de persoane;

N = autovehicul destinat transportului de mărfuri.

În cazul defalcării ponderii diferitelor surse de zgomot din nivelul total al autovehiculului, după cum este prezentat în Tabelul 1.2 (Deulgaonkar et al., 2020), se observă că motorul cu

ardere internă corelat cu auxiliarele sale (sistemul de aspirație și respectiv de evacuare) ocupă prima poziție, undeva în jur de 65 %.

Tabelul 1.2. Contribuția procentuală a diferitelor surse de zgomot la nivelul total al autovehiculului

Număr sursă	Sursă	Contribuție %
1.	Motor cu ardere internă	22 - 30
2.	Sistem evacuare	25 - 35
3.	Sistem aspirație	05 - 15
4.	Ventilator și sistem de răcire	07 - 15
5.	Transmisie	12 - 15
6.	Anvelope	09 - 15

1.4 Surse generatoare de vibrații în autovehicule

În domeniul autovehiculelor vibrația este privită ca un efect nedorit ce poate genera multe dificultăți de genul: creșterea consumului de carburant, vibrația clădirilor adiacente părții carosabile unde rulează un autovehicul cu elemente componente defecte. Din sfera vibrațiilor, vibrația de rezonanță este cea care amplifică răspunsul la vibrații mai mult decât nivelul de deformare, stress și tensiune cauzat de încărcarea statică. Rezonanțele sunt determinate de proprietățile materialului, cum ar fi: masa, rigiditatea, proprietățile de amortizare, condițiile limită ale structurii (Burdzik & Dolecek, 2012).

În utilizarea curentă a unui autovehicul se întâlnesc următoarele situații de evoluție a vibrațiilor prezentate în Tabelul 1.3:

Tabelul 1.3. Tipuri de vibrații manifestate pe autovehicul

<p>Vibrații datorate unor dezechilibre</p> <p>F = forța centrifugă D = axa de rotație S = axa centrului de gravitație r = distanța de la axa de rotație la masa centrului de gravitație e = distanța de la axa centrului de gravitație la axa de rotație m = masa m_{ges} = masa totală (Produkt Service Woerth, 2003)</p>	
<p>Vibrații datorate unor deformări</p> <p>Aici se încadrează atât componentele în mișcare de rotație, cât și cele fără rotație, cum ar fi tubulatura de aspirație a aerului în autovehicul sau ansamblul motor / cutie de viteze (Produkt Service Woerth, 2003)</p>	
<p>Vibrații torsionale</p> <p>Acestea apar, de exemplu, la rotația descentrată a unui arbore, cum ar fi, de exemplu, mișcarea alternativă a pistonului în cilindru din componenta motorului cu ardere internă, ce se transferă la caroserie / șasiu (Produkt Service Woerth, 2003)</p>	
<p>Vibrații datorate fluctuațiilor regulate de presiune</p> <p>Apar în sistemele hidraulice ce lucrează cu presiune și debite variabile (Stosiak, 2011); aici avem în vedere sistemul de alimentare cu combustibil și, respectiv, sistemul de servodirecție hidraulică</p>	

Tehnologiile nou dezvoltate în domeniul autovehiculelor impun luarea în considerare a contribuției sistemelor de propulsie alternativă asupra nivelului de zgomot și vibrații al autovehiculelor. Sistemele de propulsie alternativă constau în următoarele soluții constructive:

1. Sisteme de propulsie hibridă în care se utilizează o mașină electrică reversibilă (cu rol de motor și generator) pentru a susține funcționarea motorului cu ardere internă, montată atât în serie, cât și în paralel cu acesta. Această soluție se regăsește în literatura de specialitate drept *hybrid electric vehicles* HEV și este prezentată în Figura 1.2 (Qin et al., 2020);
2. Sistemele de propulsie pur electrică sunt fie bazate pe stocarea în baterii a energiei electrice necesară pentru propulsie *battery electric vehicles* BEV, fie bazate pe sistem de pile de combustie pentru generarea la bord a energiei electrice necesare pentru propulsie *fuel cell electric vehicles* FCEV (Kittner et al., 2020).



Montare în serie a mașinii electrice

Montare în paralel a mașinii electrice

Figura 1.2. Soluțiile constructive de autovehicule hibride

Surselor de vibrații datorate sistemelor hibride sau electrice de propulsie a autovehiculelor pot fi grupate astfel:

- Motoarele electrice de propulsie, ce generează vibrații mecanice datorate lagărelor mașinilor electrice (Qin et al., 2020) și respective vibrații electromagnetice (Xu et al., 2018)
- Sistemele auxiliare cum ar fi pompele de agent de răcire a sistemului de înaltă tensiune (baterii, schimbătoare de căldură, etc.), compresorul de aer comprimat în cazul autovehiculelor cu sistem de frânare pneumatic, sau compresorul sistemului de climatizare (Hua et al., 2021)

Cercetările din această lucrare se focusează doar pe problematica vibroacustică raportată la motoarele cu ardere internă, care sunt numeroase și nu vor dispărea prea curând.

1.5 Impactul generat de zgomotele și vibrațiile autovehiculelor

Zgomotele și vibrațiile generate de autovehicule sunt tratate în literatura internațională de specialitate sub abrevierea NVH (Noise Vibration and Harshnesses = zgomote, vibrații și duritate) (Festa et al., 2021) și fac obiectul unor programe de certificare a specialiștilor în acest domeniu (<https://umdearborn.edu/ccs/graduate-programs/certificates/automotive-noise-vibration-harshness-nvh>).

O analiză complexă scoate în evidență faptul că impactul generat de NVH se clasifică în următoarele ramuri (De Roo et al., 2011):

- *Impact social:* afectează atât populația ce își desfășoară existența în zona unde se manifestă NVH generat de autovehicule, cât și conducătorii / deservenții autovehiculelor;
- *Impact asupra mediului înconjurător:* se reflectă atât asupra ființelor, cât și asupra construcțiilor naturale sau cele realizate de către om;
- *Impact economic:* afectează costurile directe cu îngrijirea medicală a persoanelor a căror stare de sănătate este afectată de NVH, cât și cele cu reabilitarea infrastructurii rutiere și cu repararea autovehiculelor defectate ca urmare NVH.

1.6 Necesitatea diagnosticării autovehiculului

Tema diagnosticării autovehiculelor a apărut odată cu actul de naștere al acestora, materializat prin brevetul “*DRP 37435: Vehicle with gas operation*” al lui Carl Benz din 29 Ianuarie 1886 (<https://en.unesco.org/mediabank/25010/>), prezentat în Figura 1.3 (<https://group-media.mercedes-benz.com/marsMediaSite/en/instance/ko/Carl-Benzs-patent-application-on-29-January-1886-Birth-of-the-automobile-130-years-ago.xhtml?oid=9919252#prevId=7557363>).

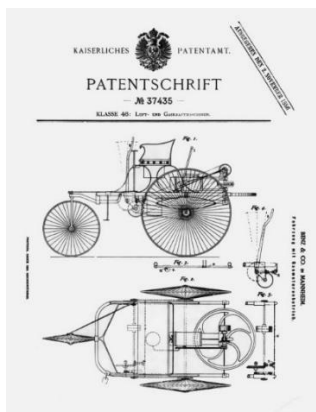


Figura 1.3. Brevetul DRP 37435 al domnului Carl Benz

Odată cu nașterea autovehiculului s-au definit termeni noi la acea vreme (<https://group.mercedes-benz.com/company/tradition/founders-pioneers/bertha-benz.html>):

- noțiunea de prim autovehicul: triciclul brevetat de Carl Benz;
- primul șofer: Bertha Benz, soția lui Carl Benz;
- prima călătorie cu autovehiculul pe distanțe lungi: 100 km în direcția Pforzeim;
- prima alimentare cu carburant: „10 litres of ligroin” de la o farmacie (<https://www.mercedes-benz.com/en/classic/bertha-benz/>);
- primii pasageri: Eugen și Richard Benz, copiii soților Benz;
- prima depanare: cureaua ce transmitea mișcarea la roți (o transmisie finală rudimentară) s-a rupt și a fost înlocuită cu o piesă din vestimentația doamnei Bertha Benz.

La momentul actual, conform unui studiu J.D. Power (Hawley, 2021), percepția generală privind diagnosticarea autovehiculelor constă într-o analiză digitală cu un soft specializat a diferitelor sisteme computerizate și a componentelor acestora, vizând următoarele aspecte:

- probleme la motor sau la componente individuale;
- reclamații privind funcționarea și răspunsul transmisiei;
- probleme cu eficiența sistemului de frânare;
- potențiale colmatări sau defecte la sistemul de evacuare al autovehiculului;
- uzură și îmbătrânire sau defectare a componentelor, ca, de exemplu, injectorul de combustibil, bobina sistemului de aprindere sau clapeta de accelerație.

Tot în cadrul acestui studiu sunt evidențiate principalele puncte luate în considerare atunci când se discută despre diagnosticarea autovehiculului:

- ce componente sunt supuse testării;
- cât de des este necesară realizarea diagnosticării autovehiculului;
- cât durează diagnosticarea autovehiculului;
- cât costă diagnosticarea autovehiculului;
- ce beneficii oferă diagnosticarea autovehiculului.

Ca o concluzie generală, diagnosticarea autovehiculelor ține atât de siguranța traficului și de poluare, cât și de aspecte economice ce se regăsesc în exploatarea eficientă a autovehiculelor, cu predilecție în sfera autovehiculelor comerciale.

1.7 Concluzii. Obiectivele tezei de doctorat

Defectele ce se manifestă pe durata de utilizare a unui autovehicul sunt clasificate, după natura lor, în următoarele tipuri principale (Nițu et al., 2021a):

- defecte de natură mecanică (arbori ruți, alungiri de elemente de fixare ce provoacă joc funcțional anormal sau arcuri cu caracteristica elastică ieșită din plaja acceptată);
- defecte de natură hidraulică (neetanșeități, pierderea calităților fluidului de lucru, precum viscozitate sau manifestarea higroscopiei);
- defecte de natură electrică (scurtcircuitări ale sistemelor, senzori și elemente de acționare cu caracteristici electrice ieșite din domeniul normal acceptat - rezistența electrică modificată datorită îmbătrânirii);
- defecte de natură pneumatică (neetanșeități sau umiditate în sistem).

Cauzele principale de defect pot fi grupate după cum urmează:

- suprasolicitare mecanică / electrică;
- lipsa sau efectuarea tardivă și eventual cu piese neconforme a operațiunilor de întreținere și reparație;
- deservire defectuoasă ca urmare a necunoașterii modului de operare a agregatului respectiv;
- uzură;
- îmbătrânire;
- deficiențe tehnologice de proiectare constructivă;
- perturbații electromagnetice;
- erori de software intern al sistemului respectiv care pot să se manifeste ca urmare a unei scăderi a tensiunii de alimentare;

- folosirea abuzivă a unor proceduri de urmat doar în caz de avarie (scoaterea mecanică de urgență de sub tensiune la autovehiculele electrice sau hibride);
- calibrări incorecte ale unor componente electromecanice.

Pornind de la faptul că principalele sisteme și agregate ale autovehiculului se constituie în principalele surse generatoare de zgomot și vibrații pe autovehicul, identificăm potențialul de a cerceta și dezvolta o metodă neinvazivă de evaluare a stării de funcționare a acestora prin intermediul unui sistem de monitorizare prin care să se realizeze etapele de achiziție, procesare și analiză a datelor vibroacustice, cu capacitatea de a evidenția starea de defect. Avantajele acestei metode comparativ cu cele tradiționale rezidă din posibilitatea de a evidenția defectele de natură mecanică / hidraulică / pneumatică ce sunt foarte puțin acoperite de metodele actuale de diagnosticare care se bazează în principal pe monitorizarea defectelor de natură electrică.

Lucrarea se focalizează pe soluții convenționale de propulsie a autovehiculelor, și, din punct de vedere al obiectivelor prezentei teze de doctorat, principalele puncte sunt următoarele:

1. determinarea modelelor matematice ce pot fi aplicate în procesarea semnalelor de zgomote și vibrații pentru a se putea determina și evalua anomaliile vibroacustice caracteristice stării de defect;
2. studiul soluțiilor de diagnosticare existente;
3. identificarea factorilor de mediu ce influențează procesul de înregistrare experimentală a zgomotelor și vibrațiilor țintă;
4. stabilirea matricei de senzori, accelerometre și microfoane ce trebuie integrate în sistemul de înregistrare experimentală coroborată cu selectarea tipului de autovehicul ce urmează a fi studiat din punct de vedere al manifestărilor vibroacustice caracteristice atât funcționării normale, cât și celei de defect indus;
5. selectarea soluției software și dezvoltarea rutinelor de lucru în acest mediu de programare pentru achiziția, procesarea și analiza semnalelor vibroacustice țintă, completată cu definirea etapelor de achiziție experimentală a datelor vibroacustice de interes;
6. realizarea de măsurători experimentale a semnalelor de zgomote și vibrații corespunzătoare unor scheme multiple de amplasare a senzorilor și regimurilor de funcționare corespunzătoare etapelor de lucru;
7. prelucrarea și procesarea semnalelor brute de zgomote și vibrații pentru identificarea parametrilor caracteristici specifici stării de bună funcționare și de defect;
8. validarea rezultatelor și stabilirea direcțiilor de cercetare ulterioară.

CAPITOLUL 2. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR PRIVIND ANALIZA ȘI DIAGNOSTICAREA ZGOMOTELOR ȘI VIBRAȚIILOR AUTOVEHICULELOR

2.1 Studii teoretice și modele matematice

2.1.1 Scopul studiului privind procesul de diagnosticare vibroacustică a autovehiculelor

Scopul studiului din acest capitol este de a identifica modelele matematice de interes pentru studiul parametrilor vibroacustici funcționali ai principalelor componente ale autovehiculului, asemănător cu ceea ce realizează operatorul uman, modele care să constituie baza noastră pentru definirea unui sistem de monitorizare vibroacustică, având posibilitatea evidențierii stării de defect.

De asemenea, tot în cadrul acestui capitol va fi studiat stadiul actual al tehnicilor de diagnosticare a autovehiculului, inclusiv pe cale vibroacustică.

2.1.2 Secvențierea vehiculului pe zone de interes vibroacustic

Atunci când discutăm de vibroacustica autovehiculelor ne referim la două categorii principale de NVH (*Noise and Vibration Harshness*) și anume cele transmise prin aer și, respectiv, transmise prin structura componentei studiate, cu limita acceptată de 300-500 Hz. Sub această limită dominantă este vorba de NVH transmise prin structura și, respectiv, peste limita dominantă este vorba de NVH transmise prin aer (Young, 2014). Acest lucru înseamnă că tehnicianul va folosi, pentru diagnosticarea vibroacustică, nu numai simțul său auditiv, ci va face apel și la simțul tactil. În cazul înlocuirii operatorului uman cu un sistem de monitorizare, va fi necesară utilizarea unei game combinate de senzori care vor include microfoane pentru înregistrarea semnalului NVH transmis prin aer și accelerometre pentru semnalul NVH transmis prin structură.

După cum se știe, sunetul este complementar cu semnalul de vibrație, iar în industria auto pentru diagnosticarea vehiculelor prin metoda vibroacustică cu operator uman, limitele utile sunt, în general, următoarele (Wang, 2010):

- sunet în intervalul de frecvență sonoră de la 30 la 4.000 Hz;
- vibrații în intervalul de frecvență tactilă de la 30 la 200 Hz.

Principalele surse generatoare de zgomote și vibrații ale vehiculului sunt prezentate în Tabelul 2.1 (Harrison, 2004), corespunzător cu limita țintă în conformitate cu legislația 9297/CEE.

Tabelul 2.1. Nivelul de zgomot pentru componenta vehiculului

	Vehicul de pasageri	Autocamion ușor	Autocamion greu
	Nivelul țintă la 7,5 m, test de accelerare (dBA)		
Motor	69	72	77
Evacuare	69	70	70
Aspirație	63	63	65
Anvelope	68	69	75
Transmisie	60	63	66
Altele	60	72	65
Nivel combinat	74,2	77,3	80,1

Vibrația globală a vehiculului este resimțită de pasageri și de șofer pe diferite niveluri de lipsă de confort. În regim de funcționare normală a autovehiculului, conducătorul auto și pasagerii sunt obișnuiți cu un anumit nivel de mediu NVH care, dacă depășește o anumită limită, este afectată percepția prin simptomele descrise în Tabelul 2.2 (Campbell, 2009).

Tabelul 2.2. Răspunsul uman în reacție de confort la diferitele vibrații ale vehiculului

Frecvență ponderată Magnitudinea vibrațiilor	Reacția umană la bordul vehiculului
$.315 \text{ m/s}^2 <$	Nici un efect asupra confortului
$.315 \text{ m/s}^2 - .63 \text{ m/s}^2$	Ușor inconfortabil
$.5 \text{ m/s}^2 - 1 \text{ m/s}^2$	Moderat inconfortabil
$.8 \text{ m/s}^2 - 1,6 \text{ m/s}^2$	Incomod
$1,25 \text{ m/s}^2 - 2,5 \text{ m/s}^2$	Foarte inconfortabil
$> 2 \text{ m/s}^2$	Extrem de inconfortabil

2.1.3 Studii pe modele matematice

Colectarea datelor prin intermediul plăcilor de achiziție, în formă analogică sau numerică, urmată de procesarea și analiza acestora apelând la soluții software dedicate, permite dezvoltarea și simularea unor sisteme virtuale de control, diagnosticare și monitorizare. Acestea pot fi ușor configurate și adaptate pentru a satisface anumite cerințe specifice. Astfel principalele tehnici de interes pentru noi în analiza zgomotelor și vibrațiilor sunt următoarele:

- analiza în domeniul frecvență;
- analiza în domeniul timp;
- analiza în domeniul amplitudine.

În cele ce urmează vor fi studiate modelele matematice și caracteristicile acestor tehnici de analiză ce urmează a se constitui în punctul de plecare pentru elaborarea modelului software utilizat. Practic, acest proces poate fi asimilat cu transpunerea metodei umane empirice de diagnosticare vibroacustică într-o metodă științifică.

2.1.3.1 Analiza în frecvență

Analiza în domeniul frecvență presupune studiul spectrului semnalului prin metoda înfășurătoarei (anvelopa), coroborat cu transformarea rapidă Fourier (FFT – Fast Fourier Transform). Apelarea la analiza înfășurătoarei spectrului vibrațiilor se face pentru observarea componentelor repetitive ale unui semnal dinamic, ce permite identificarea proactivă a deteriorării condițiilor de funcționare a componentelor autovehiculului supuse stării de defect (Isermann, 2005).

Autovehiculul, din punct de vedere vibroacustic, este un generator complex de zgomote într-un interval variat de frecvențe și astfel face sens să luăm în calcul noțiunea de densitate spectrală de frecvențe, deoarece ne confruntăm cu o fluctuație a cantității fizice p asociată cu o sumă de perturbații (sinusoidale), unde componenta de ordin n este dată de ecuația (4) (Pierce, 2014):

$$p_n = A_n \cos(2\pi f_n - \phi_n) \quad (4)$$

În cadrul modelului matematic ce se conturează pentru diagnosticarea vibroacustică, este util a se monitoriza densitatea spectrală coroborat cu limitele (de amplitudine) specifice funcționării normale. Astfel, dacă aceste limite sunt depășite se trece la descompunerea semnalului astfel încât să se identifice frecvența semnalului ce a depășit limita normală caracteristică defectării unei anumite componente a autovehiculului.

Formula generală pentru seria Fourier a unui semnal periodic $f(t)$ este dată de ecuația (5) (Rao, 2011):

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos \omega_0 n t + b_n \sin \omega_0 n t) \quad (5)$$

unde:

a_0 este componenta de frecvență de bază, adică valoarea medie a semnalului; a_n și b_n sunt coeficienții Fourier, care reprezintă amplitudinile armonicelor componente de frecvență; $\omega_0 = 2\pi/T$ este frecvența fundamentală a semnalului, T fiind perioada semnalului.

Pentru semnale neperiodice se poate utiliza transformata Fourier, care transformă semnalul din domeniul timpului în domeniul frecvenței. Transformata Fourier a unui semnal $f(t)$ este definită în ecuația (6) (Pierce, 2014):

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt \quad (6)$$

unde:

$F(\omega)$ este spectrul de frecvență al semnalului; ω este frecvența, măsurată în radiani pe secundă; $e^{-i\omega t}$ este funcție complexă exponențială.

Transformata Fourier inversă convertește semnalul din domeniul frecvenței înapoi în domeniul timpului, și este dată de ecuația (7) (Pierce, 2014):

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (7)$$

Studiul sunetelor și vibrațiilor prin intermediul transformatei Fourier ne interesează pentru a obține spectrul de frecvență al semnalului măsurat, ceea ce permite identificarea și caracterizarea componentelor de frecvență ce contribuie la zgomotele și vibrațiile anormale. Acest lucru este util în diagnosticarea și monitorizarea stării componentelor autovehiculului, deoarece diferitele frecvențe (se poate întâlni situația când manifestarea unui fenomen vibroacustic pe o anumită frecvență să apară doar în caz de defect) și amplitudini pot indica defecțiuni sau deteriorări.

2.1.3.2 Analiza în timp

Analiza în domeniul timp se utilizează pentru supravegherea semnalelor nestaționare tranzitorii sau staționare aleatorii, pentru identificarea frecvențelor dominante. Acest tip de analiză permite stabilirea parametrilor statistici utili pentru depistarea defectelor în fază incipientă de natură mecanică sau hidraulică. Procedeele de lucru uzuale sunt: analiza factorilor de vârf (*crest factor*), analiza Cepstrum, și *kurtosis* (Lakis, 2007). Punctul critic al metodei de analiză în timp îl constituie imposibilitatea de a detecta stările de defect aflate în stadiu accentuat.

Tehnica CEPSTRUM este definită ca o analiză a spectrului de putere, al logaritmului spectrului de putere al semnalului de vibrație sau zgomot din domeniul timp (Drăgan, 2003). Având definită cu $X(f)$ transformata directă Fourier a unei funcții de timp $x(t)$, spectrul de putere $S_x(f)$ este descris în ecuația (8) (Drăgan, 2003; Hartmann & Candy, 2014):

$$S_x(f) = |X(f)|^2 = |\mathfrak{F}[x(t)]|^2 = \left| \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-2\pi ift} dt \right|^2 \quad (8)$$

și CEPSTRUMUL $C_x(\tau)$ este definit prin ecuația (9) (Drăgan, 2003; Smith & Randal, 2014):

$$C_x(\tau) = |\mathfrak{F}\{\ln[S_x(f)]\}|^2 = \left| \int_{-\infty}^{\infty} \ln S_x(f) e^{-2\pi ift} dt \right|^2 \quad (9)$$

CEPSTRUMUL manifestă sensibilitate redusă la caracteristicile dinamice ale ansamblului autovehiculului care influențează relația răspuns-excitație, comparativ cu spectrul de frecvențe. Pentru aceeași excitație, CEPSTRUMUL are o sensibilitate redusă la modificarea punctului de măsură, comparativ cu spectrul de frecvențe ce depinde semnificativ de poziția în care se amplasează senzorul pe componenta studiată (Drăgan, 2003).

Ca variantă complementară analizei Fourier se poate apela la analiza Wavelet a vibrațiilor și zgomotelor. Aceasta este o metodă matematică și de procesare a semnalelor folosită pentru a descompune diverse tipuri de semnale, cum ar fi vibrațiile și zgomotele, în componente mai mici, cunoscute sub numele de wavelets. Astfel, transformata Wavelet poate fi asimilată drept un instrument ce permite vizualizarea simultană atât a domeniului timp, cât și a celui de frecvență a semnalului studiat și pentru a extrage informații detaliate din semnale complexe și a identifica caracteristicile acestora la diferite scări (Giurgiuțiu et al., 2001).

Formula de bază utilizată în cadrul analizei Wavelet este cea din ecuația (10) (Akansu & Haddad, 2001):

$$\psi(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (10)$$

unde:

$\psi(t)$ este funcția Wavelet; a este factor de scalare; b este factor de translație; t este variabila temporală sau spațială.

Transformatele Wavelet pot fi împărțite în două tipuri principale:

1. Transformata Wavelet continuă (Continuous Wavelet Transform CWT);
2. Transformata Wavelet discretă (Discrete Wavelet Transform DWT).

Expresia matematică ce definește translatarea și scalarea unei funcții Wavelet de bază într-o familie de funcții multiple este descrisă de ecuația (11) (Aguiar-Conraria & Soares, 2011):

$$\psi_{\tau,s}(t) := \frac{1}{\sqrt{|s|}} \psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right) \quad (11)$$

unde:

$\psi_{\tau,s}(t)$ este familia de funcții Wavelet; ψ este funcția Wavelet de bază; s este factorul de scalare; τ este parametrul de translație; t este variabila temporală.

Transformata continuă Wavelet poate fi definită prin funcția $W_{x,\psi}(\tau,s)$ conform ecuației (12) (Aguiar-Conraria & Soares, 2011):

$$W_{x,\psi}(\tau,s) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \frac{1}{\sqrt{|s|}} \psi^*\left(\frac{t-\tau}{s}\right) dt \quad (12)$$

unde:

$x(t)$ este semnalul studiat; ψ este funcția Wavelet de bază; s este factorul de scalare; τ este parametrul de translație; t este variabila temporală.

Atât transformata continuă CWT, cât și transformata discretă DWT servesc pentru a oferi o reprezentare timp-frecvență a semnalului, permițând analiza componentelor sale care nu sunt ușor de detectat în forma originală. Acest lucru face ca transformatele Wavelet să fie un instrument puternic în diverse aplicații, cum ar fi procesarea semnalului, compresia datelor și extragerea de caracteristici.

2.1.3.3 Analiza în amplitudine

Tehnica de analiză în amplitudine are la bază pe faptul că, în marea majoritate a cazurilor există un mod tipic de evoluție în timp a defectărilor datorate fenomenelor de uzură. În primă fază survin defecte cu manifestare locală singulară, ce apoi generează excitații de tip impuls, sau de tip șoc, a căror frecvență se amplifică în timp și generează apariția unor vârfuri în răspunsul ansamblului autovehiculului (Drăgan, 2003).

Determinarea distribuției globale sau filtrate a amplitudinilor într-un interval de timp prestabilit, reprezintă o abordare simplă pentru analiza, în domeniul amplitudine, a semnalului. Echipamentele corespunzătoare facilitează procesarea rezultatelor în scopul reprezentării grafice prin intermediul histogramelor sau a curbelor de distribuție. Procesarea semnalelor în formă digitală permite obținerea schemelor de distribuție simplă sau cumulată procentual, asigurând astfel simplificarea evaluării rezultatelor supuse analizei. Acest procedeu se pretează a fi utilizat pentru achiziția de semnale de zgomote și vibrații cu diferite rate de măsurare pe unitatea de timp (Drăgan, 2003).

2.1.4 Concluzii parțiale

În urma studierii modelelor matematice prezentate în cadrul acestui capitol se observă următoarele avantaje în cadrul metodei de analiză a zgomotelor și vibrațiilor autovehiculului:

- Analiza în frecvență permite identificarea componentelor dominante de frecvență a semnalului vibroacustic studiat, componente ce se comportă ca o semnătură vibroacustică în caz de anomalii datorate existenței unei stări de defect.
- Analiza în timp permite identificarea anomaliilor de amplitudine a semnalului vibroacustic studiat, anomalii ce apar atunci când sunt depășite valorile de prag caracteristice unor stări de defect de tip sporadic. Analiza Wavelet este eficientă în detectarea și studiul caracteristicilor tranzitorii sau a variațiilor rapide dintr-un semnal vibroacustic.
- Analiza în amplitudine permite identificare fenomenelor locale singulare, înainte de a afecta ansamblul autovehiculului.

De reținut este faptul că fiecare din aceste trei metode de analiză oferă avantaje care nu prezintă suprapunere și astfel fiecare din ele vor fi luate în calcul la elaborarea metodei noastre de analiză a zgomotelor și vibrațiilor autovehiculelor în scop de diagnosticare. Însă accentul va fi pus pe analiză în frecvență prin intermediul transformatei Fourier.

2.2 Echipamente și soluții tehnice existente pentru analiza zgomotelor și vibrațiilor autovehiculului

Evoluția ascendentă a gradului de complexitate al industriei autovehiculelor provine atât din partea de cercetare și proiectare, cât și din cea de servicii post vânzare ce cuprinde atât exploatarea curentă, cât și procesele de planificare și execuție a operațiilor de întreținere și reparație.

În cele ce urmează vor fi prezentate soluții tehnice existente de diagnosticare prin analiza zgomotelor și vibrațiilor în industria autovehiculelor.

2.2.1 Senzorul de detonație

O soluție implementată în mod activ pe autovehicul o reprezintă acest tip de senzor, care poate fi perceput atât drept o sursă de informații pentru corectarea în timp real a funcționării motoarelor cu ardere internă (de exemplu, adaptarea la calitatea diferită a carburantului utilizat), cât și drept o sursă de informații utilizată pentru diagnosticarea pe baza analizei vibrațiilor la motoarele cu ardere internă din echiparea autovehiculelor.

Pe lângă rolul de protejare a motorului cu ardere internă, informația furnizată de senzorul de detonație ajută la realizarea unei economii de carburant de până la 9% și respectiv o îmbunătățire a cuplului motor cu până la 5% (Bosch – Engine management, 2016).

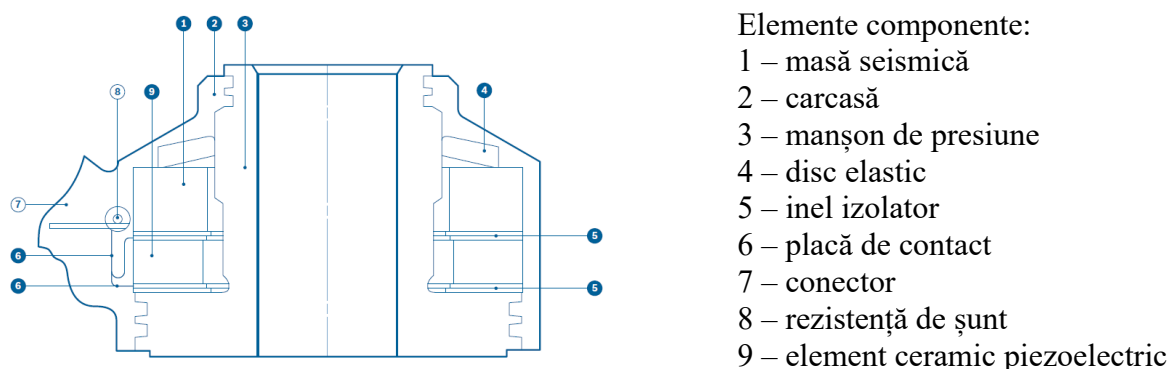


Figura 2.1. Construcția senzorului de detonație

Funcționarea senzorului se bazează pe principiul piezoelectricității ce constă în generarea de către elementul piezoelectric a unei sarcini electrice ca răspuns la o presiune mecanică aplicată asupra acestuia (Zhang & Hoshino, 2018), având detaliile constructive prezentate în Figura 2.1 (Bosch – Engine management, 2016). În cazul de față, sarcina mecanică se datorează vibrațiilor funcționale transmise către senzor prin intermediul blocului motor.

2.2.2 Diagnosticarea acustică a sistemului audio

Industria de autovehicule manifestă preocupări pentru diagnosticarea pe cale vibroacustică atât în faza de exploatare, cât și în cea de producție a acestora.

În cazul sistemelor audio din echiparea autovehiculelor, cercetările în domeniu au scos în evidență nevoia clară de testare / diagnosticare a acestora pe linia de fabricație / asamblare a autovehiculului, suplimentar pe lângă procedurile interne de testare / verificare / diagnosticare ale furnizorilor componentelor sistemului audio (Irrgang, 2017).

Motivul pentru care testele furnizorilor de componente audio nu acoperă provocările de mai sus țin de următoarele:

- procesul de montaj: difuzoare, panouri și clipsuri de montaj;
- componente: difuzoare, capitonaje de izolare / etanșare și elemente de asamblare.

Procesul evidențiat în Figura 2.2 (Irrgang, 2017), este afectat de subiectivism în cazul prezenței operatorilor umani pe linia de asamblare:

- nevoia de operatori școlarizați care să fie mult mai sensibili comparativ cu utilizatorul final al autovehiculului;
- timp suficient pentru inspecția realizată de operatorul uman ce necesită cicluri de timp lungi și flexibile;
- protecția la oboseală a aparatului auditiv al operatorului uman (pauze regulate și nivel scăzut de presiune sonoră).

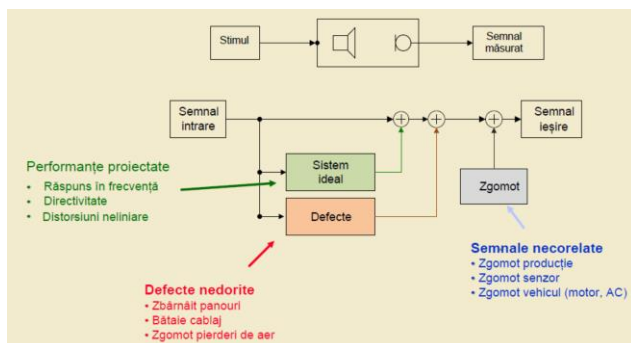


Figura 2.2. Generarea semnalelor de distorsiune în sistemul audio al autovehiculului

Rezultă din cele prezentate concluzia că testarea cu operatori umani este scumpă și nu foarte de încredere, deoarece este afectată de un grad ridicat de subiectivism.

Soluția constă în automatizarea acestui proces de diagnosticare / testare acustică ce prevede generarea unor semnale de testare și înregistrarea răspunsului acustic la acești stimuli a sistemului audio cu analiza în frecvență.

Pentru automatizarea procesului se folosesc un set de surse de semnal audio și microfoane gestionate de un computer ce are la dispoziție baze de date pentru a putea realiza comparațiile în mod corespunzător și a se obține rezoluții cât mai obiective, proces descris în Figura 2.3 (Irrgang, 2017).

Rezultatul acestei diagnosticări / testări acustice a sistemului audio pe linia de fabricație a autovehiculului constă în clasificarea defectelor, identificarea loturilor de autovehicule afectate de acestea ce necesită remediere și, nu în ultimul rând, modificarea design-ului sistemului de așa natură încât să fie înlăturată posibilitatea apariției acelor defecte.

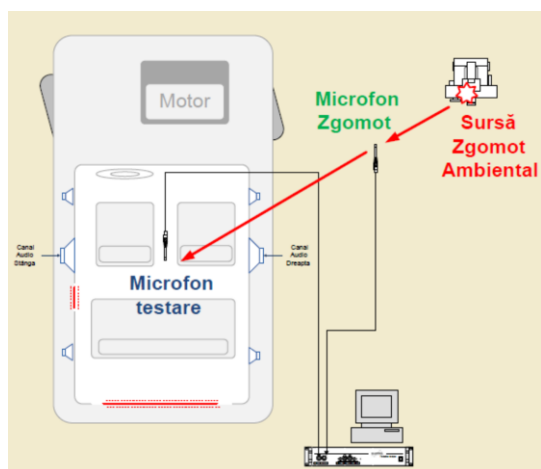


Figura 2.3. Testare automatizată a sistemului audio al autovehiculului

2.2.3 Echipamente complementare pentru evaluarea vibroacustică a autovehiculelor

Opțiunile disponibile pentru analiza și evaluarea zgomotelor și vibrațiilor autovehiculelor se referă la senzorii utilizați pentru captarea semnalelor, complementar cu partea de achiziție de date, necesitând a se lua în considerare și soluțiile software ce permit procesarea informației prelevate.

Se pot utiliza fie soluții complete, ca de exemplu placa de achiziție de date și software-ul să provină de la același furnizor, sau, în funcție de criteriile de selecție, se poate apela la producători specializați în plăci de achiziție, respectiv soluții software pentru procesarea semnalelor, și aici facem referire la producătorul National Instruments (<https://www.ni.com/ro-ro/shop/data-acquisition-and-control/what-are-c-series-sound-and-vibration-input-modules.html>), ce poate furniza soluția completă, după cum este prezentat în Figura 2.4 (<https://www.ni.com/ro-ro/shop/data-acquisition-and-control/what-are-c-series-sound-and-vibration-input-modules.html>), sau la producători ca MathWorks (<https://www.mathworks.com>), ce oferă soluții software, iar placa de achiziție de date poate proveni inclusiv de National Instruments.



Figura 2.4. Plăci de achiziție și software pentru analiza vibroacustică

Accelerometrele și microfoanele utilizate ca senzori de captare a semnalelor sunt proiectate să funcționeze în regimuri variate de solicitare termică și mecanică. Acestea sunt clasificate în funcție de dimensiuni, domeniul de frecvență, modul de fixare (corespunzător zonelor unde trebuie amplasate), defectele țintă pentru care au fost proiectate sau toleranță funcțională la factorii de mediu la care sunt expuse, după cum sunt prezentate în Tabelul 2.3 (Murphy, 2020).

Tabelul 2.3. Caracteristicile utile în alegerea senzorilor pentru monitorizare vibroacustică

Măsurare	Senzor	Informație cheie	Defecte țintă
Vibrație	Piezo accelerometru	Zgomot redus, frecvențe până la 30 kHz	Starea lagărelor, calitatea angrenajelor, cavitația pompelor, dezechilibre, nealiniere, condiții de încărcare
Vibrație	MEMS accelerometru	Cost / putere / dimensiune reduse, frecvențe până la 20 kHz+	Starea lagărelor, calitatea angrenajelor, cavitația pompelor, dezechilibre, nealiniere, condiții de încărcare
Presiune sonoră	Microfon	Cost / putere / dimensiune reduse, frecvențe până la 20 kHz	Starea lagărelor, calitatea angrenajelor, cavitația pompelor, dezechilibre, nealiniere, condiții de încărcare
Presiune sonoră	Microfon ultrasonic	Cost / putere / dimensiune reduse, frecvențe până la 100 kHz	Vârfuri de presiune, starea lagărelor, calitatea angrenajelor, cavitația pompelor, dezechilibre, nealiniere

După cum se remarcă, microfoanele și senzorii trebuie să prezinte caracteristici dimensionale cât mai reduse și rezistență la factorii de mediu, lucru exemplificat și în Figura 2.5 (Murphy, 2020) și, respectiv, Figura 2.6 (<https://vespermems.com/>).



Figura 2.5. Accelerometru MEMS cu circuit imprimat pe placă



Figura 2.6. Microfon MEMS rezistent la factorii de mediu (praf, apă, etc.)

2.2.4 Concluzii parțiale și direcții de urmat în cadrul cercetărilor proprii

Pornind de la cele de studiate în cadrul acestui capitol, se observă existența unor metode și soluții cu caracter local în abordarea analizei zgomotelor și vibrațiilor autovehiculelor în scop de evidențiere a unor defecte țintă. Ceea ce nu se regăsește în metodele și soluțiile actuale de diagnosticare, este o metodă de tip neinvaziv, capabilă să studieze comportamentul întregului autovehicul atât în stare de bună funcționare, dar și în stările de defect de natură mecanică / hidraulică / pneumatică, defecte ce nu sunt acoperite de sistemele actuale de diagnosticare care sunt capabile în principal să sesizeze defectele de natură electrică.

Metoda pe care ne propunem să o cercetăm și să o dezvoltăm, este o metodă științifică de tip neinvaziv ce se bazează pe analiza zgomotelor și vibrațiilor autovehiculului în stare de bună funcționare și în stare de defect, astfel încât să se poată stabili modele matematice și soluții software capabile să identifice valorile de prag între cele două stări și să sesizeze aceste anomalii funcționale specifice stării de defect.

În primă fază se întrevide necesitatea studiului pe cale experimentală al comportamentului vibroacustic al unui autovehicul de studiu, atât în stare de bună funcționare, cât în stare de defect indus controlat, defect despre care se cunosc exact cauzele și comportamentele, pe cât posibil utilizând o a doua metodă deja existentă, capabilă să evidențieze științific starea de defect indusă. Studiul experimental poate fi privit și drept prim pas în stabilirea unei așa numite baze de date care să conțină manifestarea vibroacustică a autovehiculului pe diferite stări de defect ale principalelor agregate ale autovehiculului astfel încât să putem defini valorile de prag.

Pentru a putea trece la achiziția experimentală de informație vibroacustică este necesară definirea matricei de senzori prin selecția riguroasă a acestora, astfel încât să îndeplinească necesitățile proiectului. Se diferențiază astfel avantajele oferite de construcția de tip MEMS (Micro Electronic Mechanical Systems) atât pentru accelerometre, cât și pentru microfoane:

- *Dimensiuni reduse;*
- *Consum redus de energie;*
- *Sensibilitate și precizie;*
- *Robustețe;*
- *Integrare ușoară cu alte tehnologii;*
- *Costuri decente.*

Complementar matricei de senzori, placa de achiziție de date necesită îndeplinirea următoarelor criterii:

- *Rezoluție și precizie;*
- *Frecvența de eșantionare;*
- *Numărul și tipul canalelor;*
- *Gama de intrare a semnalului;*
- *Conectivitate și interfață;*
- *Compatibilitate cu software;*
- *Rezistența la mediul înconjurător.*

Pentru a defini sistemul de monitorizare este nevoie să se realizeze selecția soluției software ce va fi utilizată pentru achiziția și procesarea semnalelor de zgomote și vibrații prelevate pe cale experimentală, ținându-se cont de următoarele criterii:

- *Compatibilitatea cu componentele hardware;*
- *Ușurința în utilizare;*
- *Funcționalități de configurare și analiză;*
- *Support pentru diferite tipuri de semnale;*
- *Flexibilitate și scalabilitate.*

Cercetarea și dezvoltarea modelului matematic poate avea ca bază seriile Fourier pentru analiza semnalelor vibratorii periodice (Delvechio et al., 2018). Analiza Wavelet poate prezenta interes pe măsură ce se dezvoltă metoda de lucru și eventual principiul superpoziției (Hartmann & Candy, 2014) ce poate fi redus de la complex la simplu prin analogie cu sfera muzicală, unde ne putem închipui o orchestră complexă în care pornind de la acest principiu se urmărește identificarea instrumentului care nu funcționează corect.

CAPITOLUL 3. CONTRIBUȚII TEORETICE PRIVIND REALIZAREA UNUI SISTEM DE MONITORIZARE A ZGOMOTELOR ȘI VIBRAȚIILOR AUTOVEHICULELOR

3.1 Recunoașterea semnalelor de zgomot și vibrație

Punctul de pornire pentru studiul privind dezvoltarea unui sistem de monitorizare a zgomotelor și vibrațiilor autovehiculelor, cu posibilitatea evidențierii stării de defect, constă în analiza metodelor existente privind cercetarea și recunoașterea surselor de zgomote și vibrații, aspect tratat în cadrul acestui capitol.

Identificarea sursei de informație vibroacustică, în funcție de componenta sau ansamblul studiat și de procedeul utilizat, poate fi realizată prin metodele ce urmează:

Metode tradiționale: de exemplu analiza intensității sonore sau a vibrației de suprafață prin diferite procedee:

- a. Clasicul procedeu de realizare prin intermediul simțurilor tactil și auzului unor tehnicieni antrenați în acest sens, dar ce implică un grad ridicat de eroare datorită unor factori variați, precum starea de sănătate sau supraexpunerea la mediul vibroacustic;
- b. Procedeul plăcii de material fonoabsorbant ce anulează toate sursele de sunet cu excepția unor ferestre de dimensiuni reduse ce permit analiza unor surse țintă, ce se pretează analizei unor surse de zgomot de frecvențe medii și înalte;
- c. Procedura funcționării parțiale ce presupune înregistrarea informației vibroacustice cu toate sursele funcționale, pentru ca mai apoi să fie toate oprite cu excepția uneia dintre ele și astfel se poate face o bibliotecă de date caracteristică atât la nivel global al tuturor surselor, cât și la nivel parțial caracteristic diferitelor surse activate individual.

Metode de vizualizare a câmpului vibroacustic: ce presupun procesarea semnalului înregistrat și identificarea prin tehnică imagistică. Printre procedee de lucru exemplificăm:

- a. Analiza formării semnalului de undă (Beamforming) ce este o tehnică de procesare a semnalului, utilizată pentru a identifica locația unei surse de zgomot prin analiza semnalelor primite de la o serie de senzori. În această tehnică, mai mulți senzori sunt aranjați într-o anumită geometrie, cum ar fi o matrice liniară sau circulară, iar semnalele primite la fiecare senzor sunt procesate pentru a extrage locația sursei de zgomot;
- b. Holografia acustică este o tehnică de identificare a locației și a caracteristicilor surselor de zgomot prin analiza undelor sonore pe care le produc. Această tehnică implică utilizarea unei serii de microfoane pentru a capta undele sonore care emană de la sursă și apoi utilizarea algoritmilor matematici complecși

pentru a reconstrui o imagine tridimensională sau „hologramă” a câmpului sonor (Hou et al., 2022).

3.2 Analiza propagării zgomotelor și vibrațiilor

În acest subcapitol se realizează acest tip de analiză, deoarece ne facilitează schițarea matricei de senzori pornind de la tipurile țintă de unde propagate, precum și de la influența factorilor perturbatori de mediu.

Nivelul semnalului vibroacustic într-un punct dat este dependent de distanța față de sursă, mărimea sursei, directivitatea sursei, mediul de propagare (aer sau structură), interferența cu orice fel de bariere de propagare.

Un rol important în propagarea semnalului vibroacustic îl joacă tipul de suprafețe de lucru:

- a. *Suprafețe reflective;*
- b. *Suprafețe de absorbție;*
- c. *Suprafețe difuzive.*

Tipurile de propagare a undelor vibroacustice întâlnite sunt următoarele:

- I. *Unde plane:* pot fi asimilate unor unde de presiune prin conducte (de exemplu, lichidul de la servodirecție sau carburantul prin tubulatura de alimentare). Caracteristica acestui semnal este faptul că frontul de undă are aceeași amplitudine la distanțe diferite. Figura 3.1 (Vardaxis, 2021), reprezintă transpunerea grafică a ecuației (13) ce definește reprezentarea matematică a unei unde plane sinusoidale în care amplitudinea, frecvența unghiulară și lungimea de undă ale undei sunt determinate de valorile parametrilor A , ω și, respectiv k (Vardaxis, 2021):

$$p(t, x) = A \sin(\omega t - kx) \quad (13)$$

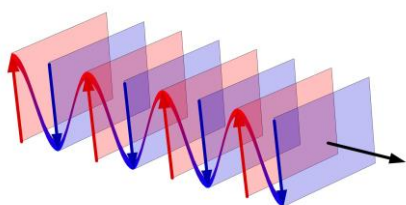


Figura 3.1. Propagare vibroacustică prin unde plane

- II. *Unde cilindrice:* un exemplu de undă acustică cilindrică în automobile este sunetul generat de sistemul de evacuare al motorului. Pe măsură ce motorul arde amestecul combustibil, generează gaze de înaltă presiune care sunt expulzate prin țevile de evacuare. Aceste gaze creează o undă acustică cilindrică care se deplasează pe lungimea sistemului de evacuare și în cele din urmă iese prin țeava de eșapament. Reprezentarea matematică se regăsește în ecuațiile (14) și (15) (Pierce, 2014):

$$p(r, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{f[t - (R/c)]}{R} dz_0 \quad (14)$$

unde

R este definit de ecuația (24) ai cărei factori sunt descriși grafic în Figura 3.2 (Pierce, 2014):

$$R = [w^2 + (z - z_0)^2]^{1/2} \quad (15)$$

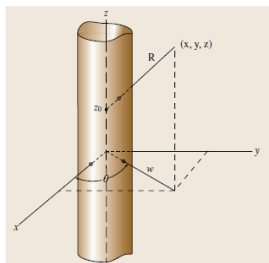


Figura 3.2. Propagare vibroacustică prin unde cilindrice

- III. *Unde sferice*: ce sunt de tip sferă pulsatorie, ca de exemplu, sunetul produs de motorul autovehiculului. Pe măsură ce pistoanele se mișcă în sus și în jos în cilindri, ele creează unde de presiune care se propagă prin aer și generează o undă acustică sferică. Această undă poate fi percepută ca sunet caracteristic motorului, care variază în funcție de tipul motorului, dimensiunea și condițiile de funcționare. Din punct de vedere matematic, ecuația (16) este cea care caracterizează acest tip de undă (Pierce, 2014).

$$p(r, t) = \frac{f(r - ct)}{r} \quad (16)$$

unde

„ p ” reprezintă presiunea sau amplitudinea undei, „ r ” reprezintă distanța de la punctul de origine, „ t ” reprezintă timpul, „ c ” reprezintă viteza undei și „ f ” reprezintă forma undei. Termenul „ $(r - ct)$ ” din ecuație reprezintă distanța pe care unda a parcurs-o de la origine la un moment dat. Această distanță este împărțită la „ r ” pentru a ține seama de faptul că unda se răspândește uniform în toate direcțiile de la punctul său de origine. Raportul rezultat este apoi trecut prin funcția „ f ”, care determină forma undei prezentată în Figura 3.3.

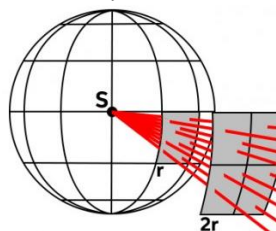


Figura 3.3. Propagare vibroacustică prin unde sferice

Dependența variației nivelului de intensitate sonoră de distanța unde este măsurată este descrisă în Tabelul 3.1 (Vardaxis, 2021), pentru toate cele trei tipuri de propagare a undelor sonore.

Tabelul 3.1. Legea de distanță a tipurilor de propagare a undelor vibroacustice

Propagare sferică (sursă punctiformă)	$\Delta L = L(r_2) - L(r_1) = -20 \log \left(\frac{r_2}{r_1} \right)$
	dublând distanța $\Delta L = L(2r_1) - L(r_1) = -6 \text{dB}$
Propagare cilindrică (sursă liniară)	$\Delta L = L(r_2) - L(r_1) = -10 \log \left(\frac{r_2}{r_1} \right)$
	dublând distanța $\Delta L = L(2r_1) - L(r_1) = -3 \text{dB}$

Propagare cu undă plană	$\Delta L = L(r_2) - L(r_1) = 0$
	dublând distanța
	$\Delta L = L(2r_1) - L(r_1) = 0$

3.3 Modelul uman al percepției zgomotelor și vibrațiilor

Înțelegerea modelului uman de percepție a zgomotelor și vibrațiilor ne permite să identificăm potențiale șabloane de lucru pe care să le materializăm în modele tehnice de bază în cadrul metodei noastre de diagnosticare, prin asimilarea simțului auzului cu microfoanele și respectiv simțului tactil cu accelerometrele.

Dacă este să privim modelul uman de percepție a zgomotelor și vibrațiilor, de bază ar fi utilizarea a două simțuri din cele cinci, și anume:

- Auzul - simțul care ne permite să auzim sunetele din jurul nostru și are drept instrument sistemul auditiv, ca parte a sistemului nervos, ce preia informația de energie acustică din mediul înconjurător și o transmite creierului sub formă de influx nervos (Psatta & Matei, 2021). Acest simț este utilizat de operatorul uman pentru diagnosticarea autovehiculelor, metodă compusă din procesul de recepție, propagare și prelucrare a informației acustice sub formă de manifestări electrice.
- Simțul tactil - cunoscut și sub numele de simțul pipăitului sau al atingerii, este capacitatea organismului de a percepe senzații de contact fizic cu obiecte sau suprafețe. Acest simț este responsabil pentru percepția texturii, temperaturii, presiunii, durității și alte caracteristici ale obiectelor cu care vine în contact corpul. Simțul tactil este realizat prin intermediul receptorilor tactili (numiți și corpusculi tactili) din piele și alte țesuturi ale corpului care transmit informații nervoase către creier pentru a fi interpretate ca senzații tactile. Din punct de vedere al diagnosticării vibroacustice a autovehiculelor, palma operatorului uman este un instrument de bază ce are receptorii încorporați în piele și sunt definiți prin terminația receptorului, viteza de acțiune sau canal psihofizic (Tabelul 3.2) (Mansfield, 2005).

Tabelul 3.2. Receptorii tactili ai palmei umane

Viteza de adaptare	Terminație receptor	Mărimea câmpului receptor	Interval frecvență (Hz)
Reacție rapidă I	Meissner	Mic	5-60
Reacție rapidă II	Pacinian	Mare	40-400
Reacție încetă I	Merkel	Mic	0-5
Reacție încetă II	Ruffini	Mare	100-500

Modelul uman de percepție ne ajută înțelegem importanța alegerii corecte a tipului de senzor raportat la categoria de informație vibroacustică studiată, precum și importanța amplasării eficiente a senzorilor utilizați raportat la zona țintă generatoare de informație vibroacustică. Mai exact, semnalul vibroacustic transmis prin aer este de interes a fi studiat prin intermediul microfoanelor și, respectiv, cel transmis prin structură să fie studiat prin intermediul accelerometrelor.

3.4 Localizarea bidimensională a surselor de zgomot și vibrație

Localizarea bidimensională a sunetelor și vibrațiilor se referă la procesul de determinare a poziției unei surse de sunet sau vibrații într-un spațiu bidimensional, cum ar fi o suprafață plană sau o hartă. Acest lucru implică analiza semnalelor vibroacustice în funcție de intensitate, frecvență, timp și direcție.

Modelul de localizare bidimensională este util a fi aplicat în cadrul metodei noastre de diagnosticare vibroacustică în scopul de a se realiza o identificare primară a zonei de proveniență a semnalului trigger pentru manifestarea de stare de defect a unei componente. Figura 3.4 (Hamdi, 2008), prezintă o divizare a ansamblului autovehiculului în zone primare de interes vibroacustic:

1. Compartimentul motor, cu referire la partea frontală a autovehiculului (doar în cazuri particulare aici se face referire la partea posterioară): unde avem ca surse de defect motorul cu ardere internă (împreună cu sistemele complementare) și transmisia (incluzând aici ambreiajul / hidrotansformatul, cutia de viteze și eventual arborii planetari împreună cu diferențialul în cazul unor soluții de organizare de tipul totul față / spate). În cazul autovehiculului cu propulsie modernă aici intră și partea de motor electric utilizat atât la propulsie hibridă, cât și la propulsie complet electrică;
2. Zona orizontală inferioară mediană situată în apropierea podelei autovehiculului: unde sunt vizate suspensia autovehiculului, mecanismul de direcție (în cazul autovehiculelor moderne echipate cu direcție integrală sau al autocamioanelor cu punte spate viratoare suplimentară trasă / împinsă), sistemul de depoluare / evacuare al motorului cu ardere internă (fiind vizate componente cum ar fi pompa de AdBlue) sau transmisia cardanică;
3. Habitaclul autovehiculului: având drept surse de defect atât sisteme ce nu sunt amplasate integral aici, fiind vizat în acest caz sistemul de climatizare a aerului (de exemplu, suflanta de distribuție a aerului în habitaclu), mecanismul de direcție (cu referire la caseta de direcție sau coloana de direcție), sistemul de frânare (fiind vizată pompa de frână și blocul electrohidraulic din componența sistemelor de asistență pentru controlul stabilității / tracțiunii / blocării roților la frânare), cât și componentele echipamentului interior cu referire la închiderea centralizată, sistemul audio, suspensia și reglajul scaunelor;
4. Zona posterioară unde sunt vizate elementele suspensiei și sistemului de frânare din acea zonă (de precizat că în cazul sistemului de frânare și suspensiei punctele de interes sunt înglobate atât în zona posterioară, cât și în compartimentul motor), sau componentele punților nemotrice și respectiv punților motrice (în cazul unor soluții de organizare cu tracțiune spate sau integrală).

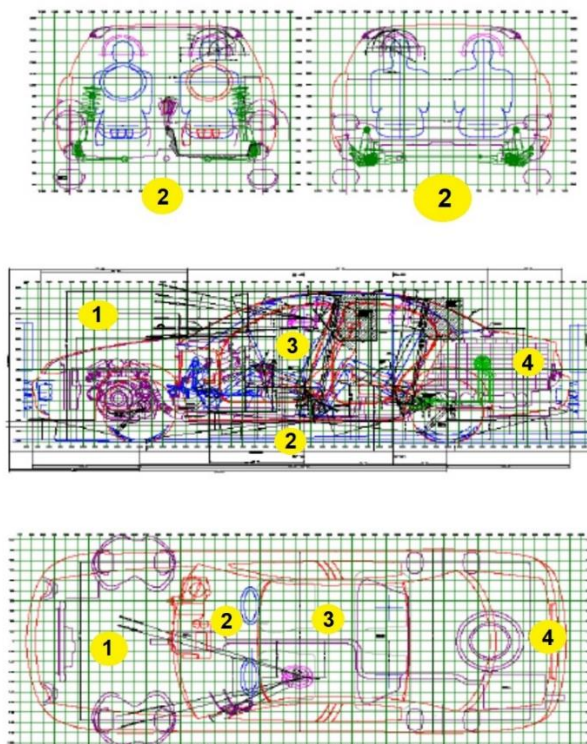


Figura 3.4. Exemplu de divizare pe zone vibroacustice a autovehiculului

Criteriile și, implicit, metodele aplicate pentru localizarea sursei vibroacustice sunt:

- Timpul de recepție a semnalului (Time of Arrival – TOA);
- Diferența de timp de recepție a semnalului (Time Difference of Arrival – TDOA);
- Direcția de recepție a semnalului (Direction of Arrival – DOA);
- Tăria semnalului recepționat (Received Signal Strength – RSS).

Pentru integrarea semnalului într-un instrument de calcul se poate apela la instrumente consacrate cum ar fi MathWorks ce permite, de exemplu, localizarea prin metoda TDOA a sursei de zgomot, după cum este exemplificat în ecuațiile (17) – (20), pornind de modelul simplificat al prelevării cu doi senzori similari (microfon sau accelerometru):

$$t_1 = t_e + \frac{r_1}{c} \quad (17)$$

$$t_2 = t_e + \frac{r_2}{c} \quad (18)$$

$$\sqrt{(x_t - x_1)^2 + (y_t - y_1)^2} - \sqrt{(x_t - x_2)^2 + (y_t - y_2)^2} = c(t_1 - t_2) \quad (19)$$

$$TDOA_{12} = TOA_2 - TOA_1 \quad (20)$$

unde:

t_e = timpul (momentul) emiterii semnalului vibroastic; t_1 = timpul (momentul) recepției semnalului vibroastic de către senzorul 1 (TOA_1); t_2 = timpul (momentul) recepției semnalului vibroacustic de către senzorul 2 (TOA_2); c = viteza de propagare; r_1 = poziția senzorului 1 față de sursă; r_2 = poziția senzorului 2 față de sursă; $TDOA_{12}$ = diferența de timp de recepție între senzorul 1 și 2 (<https://www.mathworks.com>).

În concluzie, localizarea bidimensională a sunetelor și vibrațiilor implică identificarea poziției acestora într-un plan bidimensional folosind diferite metode și concepte, precum diferențele interaurale, triangulația, beamforming-ul, spectrogramele și analiza vibrațiilor.

3.5 Localizarea tridimensională a surselor de zgomot și vibrație

Scopul pentru care studiem acest tip de localizare rezidă în faptul că asigură un grad ridicat de precizie în determinarea sursei de anomalie vibroacustică, evitându-se astfel pe cât posibil confuziile tehnice datorate factorilor de mediu de propagare, dar și posibilelor asemănări ale amprente vibroacustice între agregate diferite din componența autovehiculului.

De asemenea, utilizarea acestui tip de localizare în cadrul metodei noastre permite dimensionarea matricei de senzori cu un număr mai redus de componente.

3.5.1 Localizarea tridimensională în mediu omogen

Localizarea tridimensională a sunetelor și vibrațiilor în mediu omogen se referă la modul în care acestea se propagă și sunt percepute într-un mediu cu proprietăți fizice uniforme și constante în toate direcțiile.

Într-un spațiu tridimensional, sunetul se propagă în toate direcțiile în jurul sursei, acest fenomen purtând numele de difuzie sferică. În cazul vibrațiilor, acestea sunt mișcări oscilante ale particulelor unui mediu, care pot fi transmise prin intermediul unui solid, lichid sau gaz. Vibrațiile se pot propaga, de asemenea, într-un mediu omogen sub formă de unde elastice longitudinale sau transversale. În cazul sunetului, intensitatea scade pe măsură ce ne îndepărtăm de sursă, datorită dispersiei sferice și a atenuării datorate absorbției în mediul de propagare. În general, sunetul se va auzi mai slab la distanțe mai mari de sursă.

Într-un mediu omogen, sunetele și vibrațiile se propagă, într-o manieră uniformă, cu viteza lor de propagare, aceasta fiind direct proporțională cu rădăcina pătrată a raportului dintre elasticitatea mediului și densitatea acestuia. Aceasta înseamnă că într-un mediu cu o densitate și elasticitate constantă, undele sonore și vibrațiile se vor răspândi în mod egal în toate direcțiile.

Ecuția (21) de propagare a sunetelor și vibrațiilor într-un mediu omogen este o ecuație diferențială parțială care descrie modul în care undele acustice se propagă printr-un mediu elastic, precum aerul, apa sau un solid. Această ecuație este cunoscută sub numele de ecuația undelor și poate fi folosită pentru a analiza și modela fenomene acustice în cadrul metodei noastre de studiu a zgomotului și vibrațiilor autovehiculului.

Într-un mediu omogen, ecuația undelor se poate scrie conform relației (21) (Cotté, 2020):

$$\omega^2 p = c^2 \left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \right) \quad (21)$$

unde:

$p(x, y, z, t)$ reprezintă presiunea acustică în punctul (x, y, z) și la momentul t ; c este viteza sunetului în mediul respectiv; $\partial^2/\partial t^2$ și $\partial^2/\partial x^2$, $\partial^2/\partial y^2$, $\partial^2/\partial z^2$ reprezintă derivatele de ordinul al doilea în raport cu timpul și coordonatele spațiale.

Localizarea tridimensională implică identificarea sursei sunetului sau a vibrațiilor și determinarea poziției acesteia într-un sistem de coordonate X/Y/Z. Pentru a realiza acest lucru, se pot utiliza aceleași criterii și, implicit, metode aplicate pentru localizarea sursei vibroacustice în spațiu bidimensional:

- Timpul de recepție a semnalului (Time of Arrival – TOA);
- Diferența de timp de recepție a semnalului (Time Difference of Arrival – TDOA);
- Direcția de recepție a semnalului (Direction of Arrival – DOA);
- Tăria semnalului recepționat (Received Signal Strength – RSS).

Astfel pornind de la localizarea prin metoda TDOA, în care se va ține cont și de a treia dimensiune va rezulta ecuația (22):

$$\sqrt{(x_t - x_1)^2 + (y_t - y_1)^2 + (z_t - z_1)^2} - \sqrt{(x_t - x_2)^2 + (y_t - y_2)^2 + (z_t - z_2)^2} = c(t_1 - t_2) \quad (22)$$

În concluzie, localizarea tridimensională a sunetelor și vibrațiilor într-un mediu omogen implică analiza modului în care acestea se propagă și interacționează cu mediul înconjurător. Într-un astfel de mediu, sunetul și vibrațiile se propagă într-o manieră previzibilă, iar localizarea lor poate fi determinată prin utilizarea coordonatelor spațiale și a unor concepte precum difuzia sferică, atenuarea și absorbția.

3.5.2 Localizarea tridimensională în mediu neomogen

Localizarea tridimensională a sunetelor și vibrațiilor într-un mediu neomogen se referă la determinarea poziției și direcției unei surse de sunet sau vibrație într-un spațiu tridimensional, în condițiile în care mediul de propagare nu prezintă proprietăți uniforme și constante.

Mediile neomogene pot prezenta variații ale densității, compoziției, temperaturii, vitezei de propagare a undelor și a altor proprietăți fizice, ceea ce poate influența și modifica comportamentul undelor sonore și al vibrațiilor. În astfel de medii, undele se pot deforma, refracta, difracta sau disipa în moduri nepredictibile.

Elaborarea modelului pentru localizarea tridimensională a sunetelor și vibrațiilor implică următorii factori principali:

- Propagarea undelor;
- Geometria spațiului;
- Sursa de sunet și vibrații;
- Tehnici de localizare;

- Procesarea semnalului;
- Estimarea poziției și direcției.

Figura 3.5 (Firoozabadi et al., 2022) prezintă un exemplu de monitorizare acustică a unor surse multiple în mediu neomogen, fiind definită prin ecuația (23):

$$x_t^I(t) = \sum_{q=1}^Q x_{m,q} = \sum_{q=1}^Q \frac{1}{d_{m,q}} s_q(t - \tau_{m,q}) + v_m(t) \quad (23)$$

unde:

$x_t^I(t)$ = semnalul ideal recepționat de microfonul numărul m ; $s_q(t)$ = semnalul acustic emis de sursa q ; $\tau_{m,q}$ = întârzierea semnalului emis de sursa q și recepționat de microfonul m ; $d_{m,q}$ = distanța dintre sursa q și microfonul m ; $v_m(t)$ = zgomotul cumulativ Gaussian în microfonul m . (Firoozabadi et al., 2022)

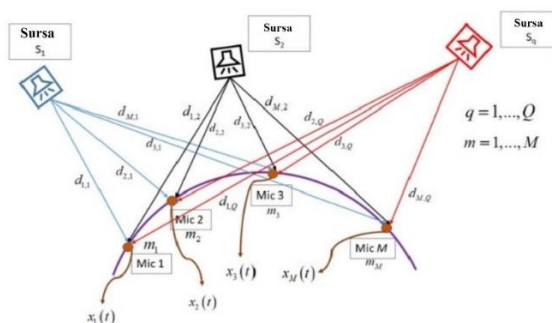


Figura 3.5. Exemplu de monitorizare acustică unor surse multiple

Modelul de localizare tridimensională a sunetelor și vibrațiilor în mediu neomogen este mult mai apropiat de cel pentru analiza amprentei vibroacustice a defectelor în structura componentelor autovehiculului, dar utilizând o rețea combinată de senzori constând în microfoane și accelerometre.

3.6 Reflexia zgomotelor și vibrațiilor

Cunoașterea acestui fenomen din punct de vedere al manifestărilor, precum și a influenței în cadrul măsurătorilor are rol important atât asupra amplasării senzorilor precum și asupra elaborării algoritmului de lucru în etapa de înregistrare a comportamentului vibroacustic al autovehiculului pentru situații variate de funcționare.

Reflexia zgomotelor și vibrațiilor se referă la fenomenul în care undele sonore sau vibrațiile se întâlnesc cu o suprafață sau un obstacol și sunt redirecționate în mediul de propagare, în loc să fie absorbite sau transmise prin suprafață.

Pentru o înțelegere corectă a fenomenului trebuie definite cele trei tipuri de unde enunțate în ecuațiile undelor plane (24), (25) și (26), respectiv ecuația (27) ce definește interdependența celor trei tipuri de undă:

$$p_i = A_i \sin(k_1 x - \omega t) \quad \text{undă incidentă} \quad (24)$$

$$p_r = -A_r \sin [-(k_1 x - \omega t)] \quad \text{undă reflectată} \quad (25)$$

$$p_t = A_t \sin (k_2 x - \omega t) \quad \text{undă transmisă} \quad (26)$$

$$p_i + p_r = p_t \quad (27)$$

unde:

A = amplitudinea semnalului; ω = frecvența unghiulară: $\omega = 2\pi f$; f = frecvența semnalului;
 k = argumentul lungimii de undă: $k = 2\pi/\lambda$; λ = lungimea de undă.

3.7 Atenuarea zgomotelor și vibrațiilor

Asemenea reflexiei, fenomenul de atenuare afectează atât amplasarea și alegerea senzorilor, cât și elaborarea etapelor de înregistrare a comportamentului vibroacustic al autovehiculului.

Atenuarea zgomotelor și vibrațiilor este un fenomen în care amplitudinea și energia acestora sunt reduse pe măsură ce se propagă într-un mediu. Fenomenul de atenuare a zgomotelor și vibrațiilor alături de celelalte trei se încadrează în categoria deviațiilor de la viteza de propagare c , care se manifestă în mod diferit:

1. Atenuare: $c = c' + ic''$ fiind o componentă complexă ce ține cont și de schimbările de fază;
2. Dispersie: $c = c(\omega)$ variind cu frecvența;
3. Neliniaritate: $c = c(p)$ depinde de amplitudinea presiunii sonore;
4. Refracție: $c = c(x, y, z)$ variază în spațiu. (Holm, 2024)

Deși nu există o ecuație universală care să descrie toate tipurile de zgomote și vibrații, ecuațiile utilizate în general pentru a modela atenuarea sunt bazate pe legile fizice care guvernează propagarea undelor. Pentru a descrie atenuarea zgomotelor și vibrațiilor, putem examina ecuația de atenuare a undelor, care este o formă modificată a ecuației undelor (28):

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \nabla^2 u - 2\alpha \frac{\partial u}{\partial t} \quad (28)$$

unde:

u reprezintă câmpul undei (presiunea, deplasarea etc.); t este timpul; c este viteza de propagare a undei; α este coeficientul de atenuare; ∇^2 este operatorul Laplacian, care reflectă curburile câmpului undei în spațiu.

Coeficientul de atenuare α este legat direct de proprietățile mediului și de frecvența undei. Acesta poate depinde de caracteristicile materiale (precum densitatea și elasticitatea), de viscozitatea aerului sau a fluidului și de impedanța acustică. În general, cu cât α este mai mare, cu atât zgomotele și vibrațiile vor fi atenuate mai rapid pe măsură ce se propagă prin mediu.

Atenuarea zgomotelor și vibrațiilor poate fi, de asemenea, modelată în termeni de intensitate acustică, care scade odată cu creșterea distanței de la sursa zgomotului sau vibrației. Această scădere poate fi descrisă de Legea pătratului invers din ecuația (29):

$$I = \frac{P}{4\pi r^2} \quad (29)$$

unde:

I este intensitatea acustică la distanța r ; P este puterea acustică a sursei; r este distanța de la sursa zgomotului sau vibrației.

Aceste ecuații și modele pot fi folosite pentru a înțelege și controla influența fenomenului de atenuare a zgomotelor și vibrațiilor în cadrul metodei noastre de diagnosticare vibroacustică, prin simplu fapt de a porni de la premise corecte, cum ar fi să nu se încerce supravegherea acustică prin amplasarea în acest sens a unui microfon în habitacul având drept element țintă de studiat o componentă aflată în compartimentul motor și care este ecranată acustic de acesta.

3.8 Filtrarea zgomotelor și vibrațiilor parazite

Filtrarea zgomotelor și vibrațiilor parazite reprezintă procesul de atenuare sau eliminare a zgomotelor nedorite și a vibrațiilor care apar în sistemele mecanice, electrice sau electronice. Aceste zgomote și vibrații pot afecta performanța și funcționarea corectă a sistemului și pot provoca disconfort utilizatorilor. În cadrul metodei noastre de analiză vibroacustică putem considera semnal parazit cel provenit de la factori externi cum ar fi rugozitatea sau denivelările drumurilor ce pot induce vibrații sau zgomote care se combină cu cele proprii ale componentelor autovehiculului, îngreunând astfel procesarea corectă a semnalului.

Filtrarea poate fi realizată prin utilizarea unor metode și tehnici variate, precum:

- Filtrare pasivă: implică utilizarea de materiale absorbante, bariere și structuri care reduc zgomotul și vibrațiile prin proprietățile lor fizice și mecanice. Exemplele includ materialele fonoabsorbante, montarea de amortizoare și izolatoare antivibrații. De interes pentru metoda noastră de diagnosticare este a se ține cont de amplasarea acestor filtre pentru a nu interfera cu senzorii de monitorizare ce pot fi viciați;
- Filtrare activă: se referă la utilizarea de tehnologii avansate, cum ar fi controlul activ al zgomotului și vibrațiilor (ANVC), care utilizează senzori și actuatori pentru a măsura și anula zgomotele și vibrațiile nedorite. Acest lucru se face prin generarea unui semnal opus care se combină cu zgomotul sau vibrația inițială, anulând efectul lor. Pentru noi acest mod de filtrare poate pune ceva semne de întrebare în cazul în care se plasează senzori în habitacul sau, eventual, în cazul sistemelor de modificarea a caracteristicii vibroacustice a sistemului de evacuare al motorului cu ardere internă.
- Filtrare electronică: sistemele electronice pot utiliza filtre analogice sau digitale pentru a elimina zgomotele și vibrațiile parazite. Aceste filtre pot fi proiectate să permită trecerea semnalelor dorite într-un anumit interval de frecvență și să blocheze semnalele nedorite.

În funcție de aplicație și de natura zgomotului și a vibrațiilor, se pot folosi una sau mai multe metode de filtrare pentru a obține cele mai bune rezultate în reducerea zgomotelor și vibrațiilor parazite.

3.9 Considerații asupra detecției tridimensionale de zgomot și vibrație în autovehicule

Din cele prezentate în acest capitol se identifică următoarele aspecte:

- nevoia de a se utiliza senzori cu referire la accelerometre, capabili să măsoare pe trei axe;
- elaborarea algoritmului de prelucrare a informației vibroacustice, furnizată de senzori, să se execute astfel încât să se ofere detalii amănunțite atât asupra comportamentului vibratoriu pe una din cele trei axe ale sistemului cartezian de măsurare, dar și detalii referitoare la rezultanta semnalului accelerometrului individual, pentru a se putea realiza comparația acestora per ansamblu;
- stabilirea hărții de amplasare trebuie realizată luând în calcul fenomenele parazite ce apar, cum ar fi reflexia și atenuarea semnalului vibroacustic urmărit a fi studiat;
- stabilirea unei rutine inițiale prin care să se reducă influența zgomotului și a vibrațiilor de fond în cadrul procesului de prelevare a informației de zgomote și vibrații analizată, această rutină putând fi asimilată cu o calibrare inițială a semnalului înregistrat de microfoane și accelerometre.

Pentru a simplifica procesul de analiză experimentală a zgomotelor și vibrațiilor autovehiculului, se va proceda la înregistrarea, în primă fază, cu vehiculul în regim staționar, a comportamentului vibroacustic în principalele zone de interes cu componentele țintă, astfel încât să se definească două baze de date distincte:

1. Înregistrare comportamentului vibroacustic în regim de funcționare în parametrii normali ai principalelor componente țintă (motor, auxiliare, transmisie, suspensie, etc.);
2. Înregistrare comportamentului vibroacustic în regim de funcționare în parametrii corespunzători stării de defect a principalelor componente țintă (injector de carburant defect, componentă mecanică defectă, etc.)

Odată stabilite cele două baze de date relevante în cadrul procesului real de diagnosticare, atunci când se face înregistrarea trebuie să se țină cont doar de elementele ce sunt caracteristice funcționării anormale (stare de defect), iar restul informației poate fi percepută ca zgomot de fond și ignorată pentru că nu este relevantă din punct de vedere al diagnosticării.

Pentru a se putea valida algoritmi de lucru și de prelucrare a semnalelor vibroacustice stabiliți prin funcționarea autovehiculului în regim staționar, este de interes a realiza în mod similar studiul și în regim de funcționare dinamică a autovehiculului, pentru a se putea trage concluzii și eventual a se realiza ajustări atât asupra algoritmilor de lucru, cât și asupra celor de prelucrare și, eventual, a se valida buna selecție a senzorilor sau a se găsi soluții noi.

CAPITOLUL 4. CONTRIBUȚII EXPERIMENTALE PRIVIND DEZVOLTAREA UNUI SISTEM DE MONITORIZARE ȘI ANALIZĂ A ZGOMOTELOR ȘI VIBRAȚIILOR AUTOVEHICULELOR

4.1 Perspective privind cercetarea experimentală a modelului de echipament de monitorizare a zgomotelor și vibrațiilor autovehiculelor

Cercetarea experimentală a metodei și sistemului de analiză pe cale vibroacustică implică aspecte diverse care trebuie luate în calcul, cum ar fi:

- A. Stabilirea matricei de senzori în mod optim pentru sursele vibroacustice studiate;
- B. Selectarea plăcii de achiziție de date ce urmează a fi utilizată: printre criteriile de selecție este important și aspectul porturilor disponibile pentru conectarea senzorilor.
- C. Determinarea soluției software optime pentru procesarea și analiza datelor înregistrate pe cale experimentală. Această soluție software trebuie să permită optimizarea rutinei software cu caracteristicile senzorilor și a plăcii de achiziție de date, cu referire, spre exemplu, la rata de măsurare pe unitatea de timp și posibilitatea de procesare prin intermediul modelelor matematice, cum ar fi transformata Fourier.

Procesul de selecție a microfoanelor și accelerometrelor utilizate pentru studiul vibroacustic al vehiculului trebuie să ia în considerare caracteristicile specifice cerute, adaptate la componenta studiată a vehiculului (expunere la temperatură ridicată, interval de frecvență joasă / înaltă, lățime de bandă sau expunere la șocuri / praf / umiditate). Caracteristicile senzorilor și achiziția de date hard și soft trebuie să fie compatibile. În plus, trebuie să țină cont de tipul de utilizare pentru testarea zgomotului și vibrațiilor, dacă măsurătorile sunt efectuate în laborator, pe teren sau mixt. Toate aceste cerințe conduc la obținerea și procesarea corectă a semnalelor pentru a crea o bază de date vibroacustică pentru autovehicule. Este o sarcină dificilă, iar cercetările noastre intenționează să aplice acest studiu pe clasele mai puțin facile de autovehicule pentru a determina amprentele lor vibroacustice.

În funcție de zona vibroacustică a autovehiculului, amplasarea rețelei de senzori pentru înregistrare (microfoane și accelerometre) se va face ținându-se cont și de caracteristicile vibroacustice ale zonelor studiate:

- Zone cu suprafețe de reflexie;
- Zone cu suprafețe de absorbție;
- Zone cu suprafețe de difuzie.

Figura 4.1 și, respectiv, Figura 4.2 (Nițu et al., 2021b) prezintă o posibilă amplasare inițială a plăcii de achiziție de date, precum și a microfoanelor și accelerometrelor în cadrul procesului

de înregistrări experimentale de date pentru a se stabili schema optimă pentru achiziția de semnale vibroacustice de referință (stare normală și de defect).

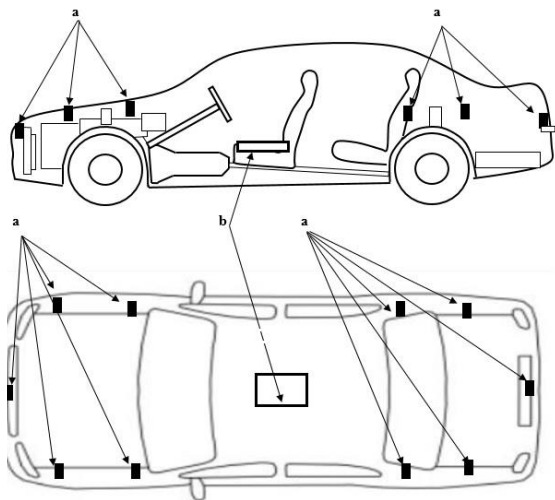


Figura 4.1. Amplasarea senzorilor (a) și a plăcii de achiziție de date (b) pe autovehicul – vedere orizontală

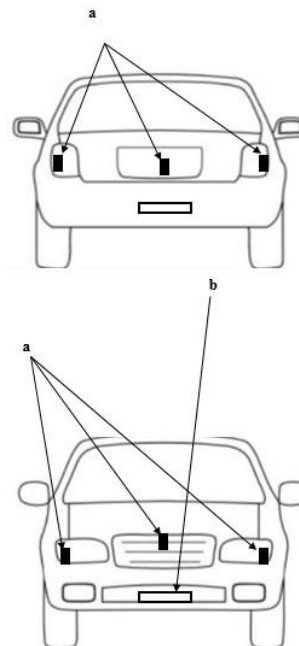


Figura 4.2. Amplasarea senzorilor (a) și a plăcii de achiziție de date (b) pe autovehicul – vedere verticală

Odată stabilită matricea inițială de senzori, coroborat cu amplasarea acestora, se trece la etapa de achiziție experimentală de date, care are două etape de bază:

1. Etapa de achiziție de date în condiții de laborator, atât pentru starea de bună funcționare, cât și pentru starea de defect;
2. Etapa de achiziție de date în condiții reale de trafic ce permite corectarea informațiilor de laborator cu influența factorilor perturbatori, cum ar fi reflexiile datorate mediului ambiant (clădiri, rugozitatea drumului, panouri izolatoare fonice pe drumuri de viteză, etc.), factori de climă (cum ar fi sezon ploios sau cu temperatură scăzută și prezența zăpezii pe carosabil care se poate comporta ca un material absorbant de semnale vibroacustice). Tot în cadrul acestei etape se pot realiza corecții inclusiv la matricea de senzori, atât din punct de vedere al componentei, cât și din punct de vedere al amplasării eficiente și eficiente pe autovehicul.

4.2 Modelul de detecție tridimensională utilizat în cadrul studiului

4.2.1 Selectarea plăcii optime de achiziție de date

Pe baza analizei datelor tratate în Capitolul 3, am luat decizia de a opta pentru modelul de detecție tridimensională, aici cu referire în special la accelerometre cu capacitatea de măsurare pe trei axe, dar și la microfoane, care în funcție de zona studiată a autovehiculului se vor utiliza cu preponderență.

Studiul experimental al comportamentului vibroacustic al autovehiculului presupune identificarea soluției optime de configurație pentru achiziția datelor. Un parametru important îl reprezintă selecția plăcii de achiziție de date în corelație cu senzorii utilizați și mediul software de achiziție și prelucrare a datelor.

În urma unei analize a soluțiilor disponibile pentru achiziția experimentală a datelor (Bogdan, 2018), s-au identificat două posibile soluții ce satisfac cerințele proiectului nostru:

- model UNO de la Arduino;
- model 9401 de la National Instruments.

Argumentele celor două plăci de achiziție de date sunt următoarele:

a. Arduino UNO

- Nu necesită sursă externă de alimentare;
- Ușor de conectat pe USB;
- Soluția software implicită de la Arduino nu necesită costuri suplimentare;
- Driveri incluse în MatLab;
- Accelerometrele și microfoanele sunt ușor de conectat prin porturi simple și cu costuri decente;
- Permite conectarea atât a senzorilor alimentați cu 5V (în cazul accelerometrelor uzuale, cât și a celor cu 3.5 V (în cazul microfoanelor uzuale ST) (Gonzales et al., 2018).

b. NI 9401

- Construcție robustă;
- Soluția software LabView al National Instrument necesită costuri ridicate ce pun semne de întrebare în decizia de selecție și achiziție;
- Necesită auxiliare suplimentare cum ar fi placă suport (Watjanatepin, 2018) (prezentată în Figura 4.3) pentru alimentare și partea de conectare, placă suport ce poate oferi avantajul conectării de module multiple de plăci de achiziție prin aceeași conexiune USB la laptop;
- Necesită sursă externă de tensiune fapt ce complică schema de măsurare și induce limitări din punct de vedere al amplasării pe auto pentru achiziție statică de date și eventual dinamică.



Figura 4.3. Exemplu de placă suport pentru conectarea NI 9401

Decizia finală este de a se opta pentru utilizarea plăcii Arduino UNO R3, datorită argumentelor mai sus enunțate, cum ar fi de exemplu posibilitatea de alimentare a senzorilor atât pe 5.5 Volți, cât și pe 3.5 Volți sau lipsa necesității unor componente auxiliare. Schema funcțională a acestuia este descrisă în Figura 4.4.

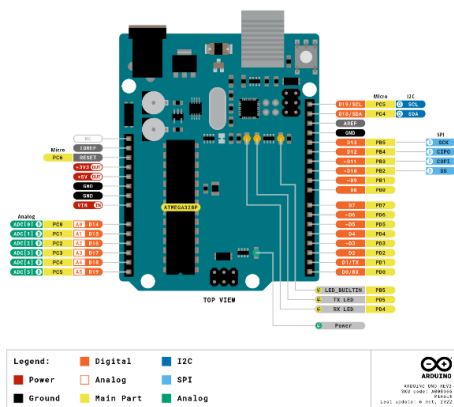


Figura 4.4. Schema funcțională a Arduino UNO R3

4.2.2 Stabilirea modelului de accelerometru utilizat

Selecția senzorilor ce urmează a fi utilizați se va face luând în calcul o schemă ce presupune utilizarea mixtă de accelerometre și microfoane astfel încât să se monitorizeze cât mai vast semnalele vibroacustice transmise pe cele două căi:

- Prin structura agregatului sursă sau a agregatelor conjugate, incluzând aici și structura sau șasiul autovehiculului;
- Prin aerul din mediul înconjurător agregatului, sursă de zgomote și vibrații al autovehiculului (Wang, 2010).

În urma analizei soluțiilor de accelerometre disponibile, rezultă clar necesitatea apelării la accelerometre de tip MEMS (Microelectromechanical System).

În procesul de selectare a accelerometrelor, am ținut cont, pe lângă parametri tehnici ai acestora, și de ușurința interconectării acestora cu placa de achiziție de date, precum și cu software-ul utilizat pentru prelucrarea rezultatelor măsurătorilor într-o variantă utilă și ușor interpretabilă.

Pe baza specificațiilor de la producători am stabilit un sumar al principalilor parametri constructivi de interes pentru studiul nostru, prezentat în Tabelul 4.1, sumar ce ne permite selecția obiectivă a senzorilor stabiliți a fi utilizați în cadrul schemei noastre de înregistrare.

Tabelul 4.1. Principalii parametri tehnici ai accelerometrelor selectate

Model	ADXL345	MPU6050
Aspect exterior		
Tip	<ul style="list-style-type: none"> • capacitiv 	<ul style="list-style-type: none"> • capacitiv
Tip semnal	<ul style="list-style-type: none"> • digital 	<ul style="list-style-type: none"> • digital
Tensiune de alimentare	<ul style="list-style-type: none"> • 3÷6 Volți 	<ul style="list-style-type: none"> • 3÷5 Volți
Consum	<ul style="list-style-type: none"> • 23 μA în lucru • 0,1 μA în standby 	<ul style="list-style-type: none"> • 500 μA în lucru • 10 μA în standby
Măsurare pe trei axe	<ul style="list-style-type: none"> • da (X-, Y-, Z-) 	<ul style="list-style-type: none"> • da (X-, Y-, Z-)

Model	ADXL345	MPU6050
Scala de măsurare	• $\pm 2g, \pm 4g, \pm 8g$ și $\pm 16g$	• $\pm 2g, \pm 4g, \pm 8g$ și $\pm 16g$
Magistrală comunicație	• I2C	• I2C
Condiții limită de funcționare	- $40^{\circ}\text{C} \div 85^{\circ}\text{C}$	- $40^{\circ}\text{C} \div 85^{\circ}\text{C}$
Utilizare	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Aplicații industriale ✓ Gaming ✓ Navigație (https://www.analog.com)	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Aplicații industriale ✓ Realitate augmentată ✓ Navigație (https://invensense.com)

Având în vedere capacitatea accelerometrelor de măsurare pe trei axe, trebuie avut în vedere faptul că valorile brute pe care le furnizează sunt raportate la accelerația gravitațională: de exemplu, dacă un senzor ar fi amplasat cu axa X perpendiculară pe suprafața pământului, accelerația măsurată pe această axă va fi g , respectiv 9.81 m/s^2 , iar valorile măsurate pe axele Y și Z ar fi nule. În realitate, senzorii de accelerație nu pot fi amplasați în pozițiile ideale pentru o măsurătoare. Astfel, în funcție de poziționare, accelerația gravitațională va fi descompusă pe cele 3 axe X, Y și Z. Acesta este motivul pentru care va fi nevoie să se stabilească un nivel de zero al accelerației măsurate, de aici reieșind nevoia de calibrare (Shankar et al., 2022). De aceea, după amplasarea acestora pe autovehicul, va trebui să fie înregistrate accelerațiile furnizate de senzori pe fiecare axă într-un interval prestabilit și să fie calculată o valoare medie pentru fiecare dintre cele 3 axe – aceste valori fiind valorile de calibrare la care ne raportăm în timpul măsurătorilor ulterioare. Practic, din valoarea instantanee măsurată pentru fiecare axă va fi scăzută valoarea de calibrare aferentă axei respective.

Frecvența de eșantionare, este unul din parametrii ce influențează acuratețea rezultatelor obținute, fiind absolut necesar a fi luat în calcul atunci când se elaborează rutina software de prelucrare și analiză a semnalului brut înregistrat de accelerometre. În literatura de specialitate, acest parametru poartă denumirea de *sampling frequency rate*, și dacă ne referim la înregistrări utilizate pentru o procedură de diagnosticare în scop medical, o frecvență de 22 Hz permite o acuratețe foarte ridicată de 97% conform referinței (Santoyo-Ramon et al., 2022).

În urma analizei performanțelor senzorilor utilizați, am observat că în cazul realizării măsurătorilor cu un singur senzor, utilizând Arduino Uno, valoarea maximă a frecvenței de eșantionare este de aproximativ 200 Hz corespunzând frecvenței de 78 Hz a semnalului măsurat. Atunci când măsurătorile se execută cu patru senzori simultan, am preferat o frecvență de eșantionare de 4 Hz pentru a putea studia vârfurile de amplitudine ale evoluției în timp a semnalului de accelerație. Evaluând informațiile disponibile la nivel de literatură de specialitate, s-a confirmat că rata noastră de înregistrare de 78 Hz, pentru un studiu științific, constituie o valoare acoperitoare raportat la intervalul uzual, descris în literatura de specialitate, ce cuprinde valori pornind de la 20 Hz (Zheng et al., 2020) și respectiv 51 Hz (Anton et al., 2011) pentru domeniul autovehiculelor, cu vârfuri de 100 Hz pentru aplicațiile specializate din domeniul medical (Butt et al., 2020), corespunzător unor soluții hardware ce nu presupun costuri ridicate.

Decizia finală este de a se opta pentru utilizarea ambelor modele de accelerometru, adică ADXL345 și, respectiv, MPU6050, din motive de similaritate a tipului de informație studiat și al magistralei de comunicație, dar și prin prisma posibilității de verificare a rezultatelor


obținute, și, în plus, datorită faptului că modelul MPU6050 are încorporată și funcția de giroscop ce poate fi utilă într-o dezvoltare ulterioară a proiectului.

4.2.3 Stabilirea modelului de microfon utilizat

Corespunzător cu selecția accelerometrelor, alegerea variantei optime de microfon pentru aplicația din acest proiect pleacă de la premisa că se va utiliza un dispozitiv din clasa sistemelor micro electromecanice (MEMS).

Din oferta disponibilă, am selectat a utiliza microfonul MEMS model STEVAL-MIC007V1 (<https://www.st.com>) de la producătorul **STMicroelectronics N.V.**, ce are atributele tehnice descrise în Tabelul 4.2.

Tabelul 4.2. Principalele atribute tehnice de interes ale microfonului utilizat

Model	STEVAL-MIC007V1
	
Tip	• capacitiv
Tip semnal	• analogic
Tensiune de alimentare	• 1.52÷3.6 Volți
Consum	• 150 μ A
Senzitivitate direcțională	• omnidirecțional
Scala de măsurare	• 130 dB SPL (punct de suprasarcină acustică)
Lungimea de bandă	• max. 80 kHz
Senzitivitate	• -38 dBV \pm 1 dB
Magistrală comunicație	• analogic
Condiții limită de funcționare	• - 40°C ÷ 85°C
Utilizare	• Aplicații industriale

Asemenea procedurii de eliminare a influenței factorilor perturbatori din mediul ambiant realizată prin calibrarea inițială de a accelerometrelor, și în cazul microfoanelor MEMS trebuie avut în vedere aspectul privind calibrarea microfonului în cadrul procedurii de achiziție de date, ce presupune înregistrarea valorii de „liniște” a mediului ambiant, măsurată în volți, pentru ca apoi să se calculeze media aritmetică a acestor valori ce se va scădea din valoarea instantanee măsurată.

Procesul de selecție a microfoanelor utilizate a constat în achiziționarea și testarea experimentală a mai multor produse din această categorie, dar decizia finală a fost de a se opta pentru modelul STEAVL-MIC0071 deoarece, pe lângă atributele menționate mai sus, acest senzor s-a dovedit a avea cele mai bune performanțe raportat la proiectul nostru ce presupune și lucrul în condițiile factorilor externi perturbatori din mediul ambiant al autovehiculului de studiu.

4.2.4 Stabilirea soluției software utilizată pentru procesarea și analiza semnalelor de zgomote și vibrații

Definitivarea sistemului nostru de monitorizare a zgomotelor și vibrațiilor autovehiculului nu este completă fără a selecta și soluția software care să permită atât integrarea ca drivere a plăcii de achiziție de date utilizată, precum și a senzorilor folosiți (accelerometre și microfoane), dar în același timp să ofere posibilitatea de a procesa semnalele de așa natură pentru a obține informațiile dorite. Aici ne referim la posibilitatea de prelucrare a semnalelor prin intermediul unor modele și calcule matematice cum ar fi transformatele Fourier și de a se furniza rezultatele sub formă tabelară și respectiv sub formă grafică ușor de interpretat.

Cerințele acoperitoare nevoilor noastre în cadrul proiectului sunt enunțate mai jos:

1. Interfață intuitivă și ușor de utilizat: soluția software trebuie să dispună de o interfață grafică prietenoasă cu utilizatorul care să faciliteze vizualizarea datelor și prelucrarea semnalelor;
2. Biblioteci extinse: care să includă o gamă largă de instrumente și funcții predefinite pentru procesarea semnalelor, care permit utilizatorilor să efectueze operațiuni complexe de filtrare, analiză spectrală, reducere a zgomotului de fond etc., fără a se confrunța cu dificultăți majore la scrierea liniilor cod;
3. Analiza și vizualizarea avansată a datelor: capacitățile de vizualizare să permită utilizatorilor inspectarea unor semnale în diferite moduri (de exemplu, prin reprezentări temporale, frecvențiale și spectrograme), ceea ce este crucial în înțelegerea caracteristicilor zgomotelor și vibrațiilor;
4. Flexibilitate și personalizare: soluția software să permită personalizarea algoritmilor și a proceselor, ceea ce înseamnă ca utilizatorul să poată adapta și optimiza metodele de procesare a semnalelor pentru cerințele specifice proiectului nostru;
5. Integrare cu alte instrumente și hardware: soluția software să se poate integra ușor cu alte soluții software și hardware, inclusiv instrumente de achiziție a datelor, ceea ce este esențial pentru experimente și testări în timp real;
6. Suport și resurse comunitare: să fie o soluție software larg utilizată care să aibă o comunitate extinsă de utilizatori și o gamă largă de resurse online, tutoriale și forumuri, care să faciliteze rezolvarea problemelor specifice care vor apărea pe măsură ce evoluăm cu dezvoltarea studiului și împărtășirea de cunoștințe.

Studiind soluțiile disponibile, s-au evidențiat două variante compatibile cu proiectul nostru:

- a. Furnizorul MathWorks (<https://www.mathworks.com>) oferă soluția software MatLab cu care se pot realiza liniile de cod pentru achiziția de semnale și prelucrarea datelor în cadrul proiectului nostru;
- b. Soluția furnizorului National Instruments (<https://www.ni.com/ro-ro/shop/data-acquisition-and-control/what-are-c-series-sound-and-vibration-input-modules.html>) conține soluția software LabVIEW în care se pot scrie liniile de cod (oferă și posibilitatea de realizare pe cale grafică) pentru achiziția de semnale și prelucrarea datelor în cadrul proiectului nostru. National Instruments este furnizor atât pentru soluția software LabVIEW, cât și pentru module de achiziție de date cum ar fi modelul 9401 descris în Capitolul 4.2.1.

Decizia finală a fost de a se opta pentru MatLab datorită ușurinței programării, compatibilității mărite cu senzorii utilizați, precum și a costurilor decente.

4.3 Algoritmul de studiere al comportamentului vibroacustic al autovehiculului

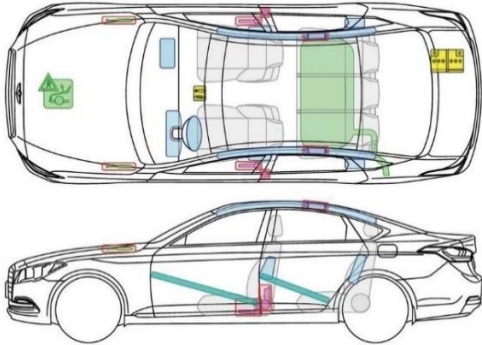
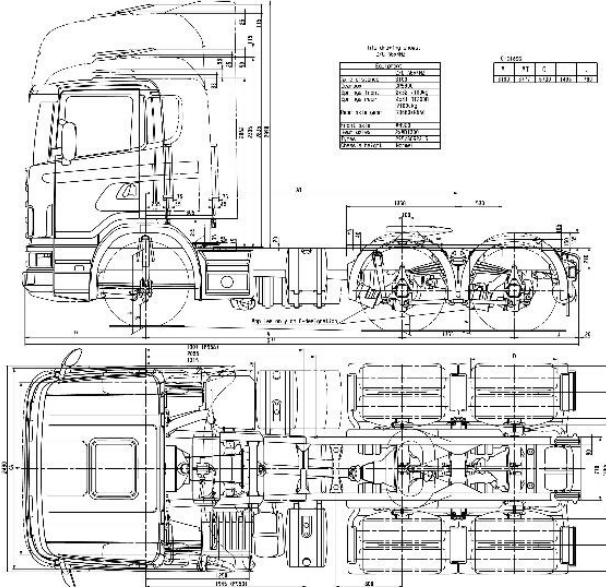
Pe baza analizei informațiilor din literatura de specialitate referitor la elaborarea algoritmilor de studiu, am identificat nevoia de a aduce *contribuția personală*, prin identificarea clasificării volumelor (incintelor) vibroacustice generate de principala sursă de zgomote și vibrații ale autovehiculului ce se materializează în zona compartimentului motor. Mai exact am identificat diferențierea a două tipuri și anume *volum vibroacustice de tip închis* și, respectiv, *volum vibroacustice de tip deschis* din punct de vedere al monitorizării acestora și al propagării către exteriorul autovehiculului. Cele două tipuri de volume vibroacustice necesită o abordare diferită din punct de vedere al definirii matricei de senzori utilizați, precum și al amplasării acestora în raport cu influența factorilor perturbatori de mediu, după cum este descris în cele ce urmează în acest capitol.

Volumele vibroacustice de tip închis și respectiv deschis sunt detaliate și explicate în Tabelul 4.3, și sunt caracteristice soluțiilor constructive de autovehicule după cum urmează:

1. **Autoturism:** este caracterizat de compartimentul motor închis (de genul unui volum relativ etanș din punct de vedere vibroacustic) ce îl face pe cât posibil izolat vibroacustic de restul autovehiculului, atât ca transmitere spre exterior, cât și ca influențe perturbatoare;
2. **Autocamion:**
 - a. Cu cabină retrasă al cărui compartiment motor se comportă relativ asemănător cu cel al autoturismului din punct de vedere al transmiterii vibroacustice în exterior, și respectiv al factorilor perturbatori;
 - b. Cu cabina avansată – constructiv, compartimentul motor are multe zone de interferență vibroacustică cu exteriorul, și, ceea ce este mai important de subliniat, este faptul că nu se poate vorbi de un volum etanș vibroacustic atât ca emiter, cât mai ales ca interferențe cu factori vibroacustici perturbatori externi, din punct de vedere al monitorizării și analizei vibroacustice.

Pornind de cele enumerate mai sus, se remarcă faptul că în cazul unui compartiment motor închis se poate utiliza o schemă mixtă de monitorizare cu accelerometre și microfoane, pe când în cazul unui compartiment motor deschis zgomotul de fond (ca, de exemplu, cel datorat funcționării motorului cu ardere internă al agregatului frigorific, utilizat în cazul semiremorcilor frigorifice) poate influența negativ măsurătorile într-o manieră semnificativă și astfel într-o primă etapă face sens utilizarea preponderent a accelerometrelor plasate corespunzător, iar microfonul / microfoanele să fie utilizate inițial pentru validare.

Tabelul 4.3. Variantele de volume vibroacustice la autovehicul

Compartiment motor de tip volum închis	Compartiment motor de tip volum deschis
<i>Autoturism</i>	<i>Autocamion – autotractor</i>
	

Dacă este să realizăm o ierarhizare a senzorilor propuși a fi utilizați în această etapă a proiectului rezultă următoarele:

- rolul principal în achiziția de date îl vor ocupa accelerometrele, iar pentru acuratețe se vor folosi ambele modele de accelerometre prezentate anterior ce se vor monta atât pe componente ce au legătură mecanică directă cu sursa de zgomote și vibrații, dar și pe elemente ale autovehiculului ce sunt expuse filtrelor vibroacustice (ca de exemplu elementele elastice de fixare pe caroserie-șasiu: cum ar fi lagărele de fixare din cauciuc);
- microfoanele vor fi utilizate, în această fază a proiectului, pentru validare, atât cu amplasare în imediata apropiere a sursei de zgomot, cât și în zone cu expunere mai scăzută (în cazul autocamioanelor, scuturile de reducere a emisiilor fonice ale grupului motopropulsor în exterior).

Soluția generală de amplasare a senzorilor este prezentată în Figura 4.5 și respectă următoarea codificare:

- săgețile de culoare verde reprezintă accelerometrele fixate pe elemente supuse amortizării față de sursa de vibrații, mai exact pe cadrul șasiului și pe structura de bază a cabinei;
- săgețile de culoare roșie reprezintă accelerometrele fixate pe elemente în legătură mecanică directă cu sursa de zgomote și vibrații, mai exact pe structura de bază a chiulasei și pe capacul spate al cutiei de viteze;
- romburi de culoare verde reprezintă microfonul amplasat în afara zonei de expunere directă la sursa de zgomote și vibrații, mai exact în spatele părții inferioare din spate a cabinei;

- rombul de culoare roșie reprezintă microfonul amplasat în zona de expunere directă la sursa de zgomote și vibrații, mai exact sub cabină, înspre partea din spate.

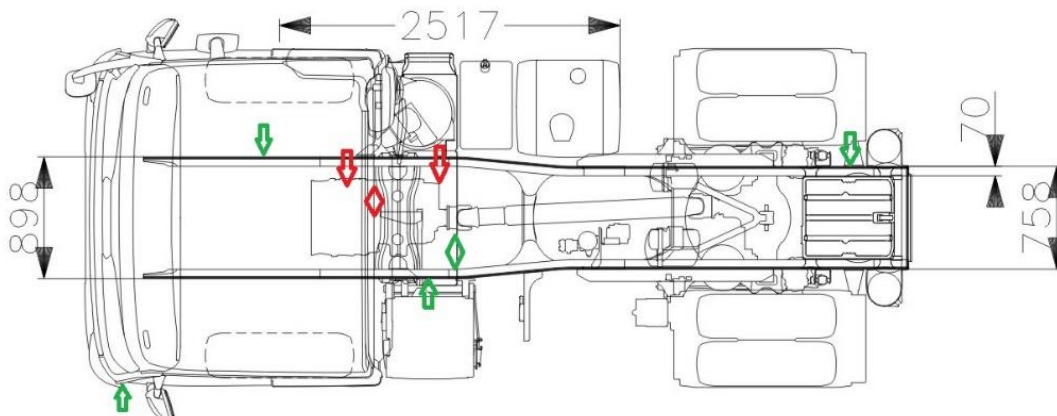


Figura 4.5. Pozițiile de amplasare a senzorilor pentru achiziția de date vibroacustice

Pornind de la cele descrise în Figura 4.5 se pune problema alegerii soluției de fixare a accelerometrelor pe suprafețele de lucru. Astfel pe baza analizei studiilor științifice disponibile în legătură cu acest subiect, au rezultat următoarele posibilități:

- Montare cu șurub sau bolt;
- Montare cu adeziv;
- Montare magnetică;
- Montare cu cleme sau suspendare;
- Montare prin lipire cu ceară;
- Montare cu benzi velcro sau autoadezive.

Studiind posibilitățile de montare prezentate mai sus, am optat utilizarea de benzi dublu adezive pentru fixarea accelerometrelor pe suprafețele țintă ale autovehiculului. Acest tip de bandă utilizat este realizat dintr-un strat cu material spongios (aproximativ 2 mm grosime) ce permite, într-o manieră rezonabilă, filtrarea posibilelor interferențe vibratorii parazite (Bruel & Kjaer, 1982), după cum este prezentat în Figura 4.6. Suplimentar este de precizat faptul că banda dublu adezivă a fost utilizată atât pentru fixarea pe suprafețele de interes a plăcii suport a senzorului, cât și pentru fixarea senzorului pe placa suport, în condițiile în care montajul doar prin intermediul pinilor de conectare permitea grade de libertate ce pot afecta în sens negativ măsurătorile.

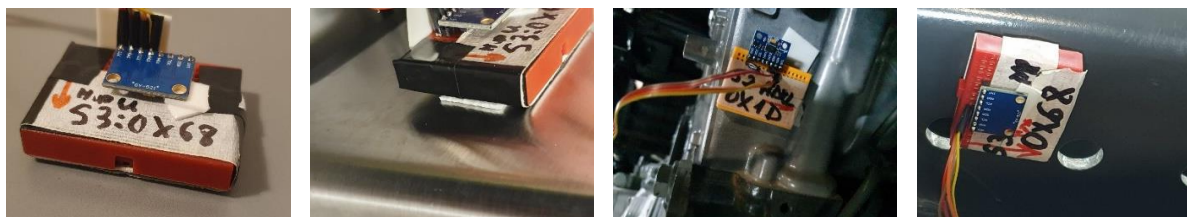


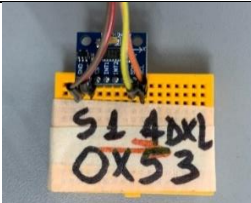
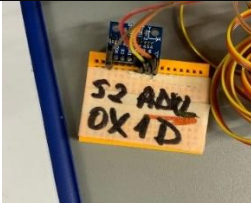


Figura 4.6. Exemple de fixare a accelerometrelor utilizând bandă dublu adezivă cu rol și de filtru la interferențe

În această etapă a proiectului am stabilit utilizarea următoarelor componente destinate înregistrării experimentale a comportamentului vibroacustic al autovehiculului:

- 2 x accelerometre ADXL345;
- 2 x accelerometre MPU6050;
- 1 x microfon STEVAL-MIC007V1 (cu posibilitatea extinderii la 4 microfoane atunci când acest lucru este util studiului nostru).

Deoarece ambele tipuri de accelerometre sunt conectate la placa de achiziție de date prin magistrala de date I2C (protocolul I2C este reprezentat de conexiunile SDA și respectiv SCL) (Plachno et al., 2012), a fost nevoie ca acestora să le fie alocat câte un ID individual prin codarea acestora în tensiune, după cum este prezentat în Tabelul 4.4. Prin alocarea ID-ului individual fiecărui senzor din schema de măsurare se evită posibilele confuzii datorate măsurătorilor cu scheme multiple de amplasare ce au drept scop identificarea pozițiilor optime.

Tabelul 4.4. Explicarea codării în tensiune a accelerometrelor utilizate

Model accelerometru – număr curent în schemă	ID	Alocarea pinilor placă → senzor	Schemă cablare accelerometru
ADXL345 – S1	0X53	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 5 V → VCC ➤ 0 V → GND ➤ SDA → SDA ➤ SCL → SCL 	
ADXL345 – S2	0X1D	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 5 V → SD0 ➤ 0 V → GND ➤ SDA → SDA ➤ SCL → SCL 	
MPU6050 – S3	0X68	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 5 V → VCC ➤ 0 V → GND ➤ SDA → SDA ➤ SCL → SCL 	
MPU6050 – S4	0X69	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 5 V → AD0 ➤ 0 V → GND ➤ SDA → SDA ➤ SCL → SCL 	

Din punct de vedere al alimentării cu tensiune, atât cele patru accelerometre, cât și microfonul sau microfoanele utilizate nu necesită un consum mare de electricitate și astfel nu a fost nevoie de apelarea la o sursă externă de tensiune, fiind suficientă cea furnizată de placa de achiziție de date Arduino UNO R3 ce se alimentează de la laptop prin cablul USB consacrat, după cum este prezentat în Figura 4.7.



Figura 4.7. Schema de rutare a senzorilor din placa de achiziție de date

4.4 Studiul experimental al comportamentului vibroacustic al autovehiculului în condiții variate de funcționare

4.4.1 Stabilirea criteriilor de selecție eficace a autovehiculului de studiu

Criteriul de bază, urmat în alegerea autovehiculului de studiu, a fost caracterul acoperitor al comportamentelor vibroacustice, în sensul de a oferi posibilitatea manifestării unor situații cât mai defavorabile din punct de vedere al achiziției de date. Astfel am selectat pentru studiu un autocamion de tip autotractor cu cabină avansată ce se încadrează în categoria celor cu compartiment motor de tip volum deschis, prezentat în Capitolul 4.3. Prin aceasta se asigură existența fenomenelor vibroacustice parazite ce ajută la stabilirea unor concluzii cât mai eficiente și realiste.

Pe lângă faptul că autotractorul satisface criteriul de bază menționat mai sus, el mai oferă un avantaj major măsurătorilor, în sensul că se pot simula în mod controlat anumite defecte funcționale ce pot fi evidențiate cu aparatul de diagnostic dedicat, printr-o serie de parametri ce urmăresc întocmai defectul simulat, cum ar fi accelerația pistoanelor descrisă în Figura 4.8.

Decuplarea cilindrului

- Porniți motorul cu ardere internă și lăsați să funcționeze la ralanti.
- Verde = Injecție ACTIVĂ
- Roșu = Injecție OPRITĂ

1 2 3 4 5 6

Toate valorile reale trebuie să fie aproximativ identice.

- Prin decuplarea unui cilindru scade valoarea de referință corespunzătoare.

Nume	Valoare reală
Valoare de referință Cilindru1	21m/s ²
Valoare de referință Cilindru2	20m/s ²
Valoare de referință Cilindru3	20m/s ²
Valoare de referință Cilindru4	20m/s ²
Valoare de referință Cilindru5	20m/s ²
Valoare de referință Cilindru6	20m/s ²

→ Mai departe

Figura 4.8. Exemplu de monitorizare cu aparatura dedicată de diagnostic a defectelor simulate

Un alt criteriu ce a stat la baza optării pentru un autotractor a constat în posibilitățile multiple de amplasare a accelerometrelor și microfoanelor, datorită varietății de suprafețe și poziții cu caracteristici vibroacustice variate (reflective / absorbitive / difuzive) astfel încât să putem stabili schema optimă de amplasare pentru o achiziție de date cât mai eficientă din punct

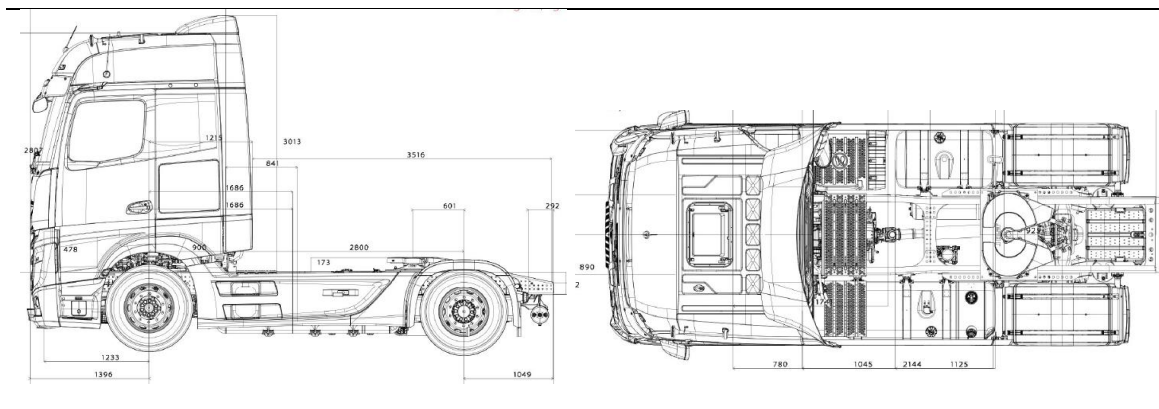
de vedere al diagnosticării pe cale vibroacustică a defectelor simulate. Pe de altă parte aceste încercări succesive de amplasare permit dobândirea de experiență în acest domeniu, pentru ca în cadrul unor măsurători ulterioare cu cerință ridicată de precizie, să se evite situațiile nedorite generate de acest aspect.

Faptul că un motor de cilindree mare este o sursă potentă de zgomote și vibrații, se constituie într-un criteriu de alegere a autocamionului, deoarece permite optimizarea schemei de senzori utilizată, precum și amplasarea eficace a acestora.

Având în vedere cele enumerate mai sus, decizia finală a fost de a se studia un model de autotractor cu caracteristici tehnice și respectiv dimensiuni de gabarit ce sunt descrise în Tabelul 4.5. Studiul pe acest model de autocamion, fiind gândit a fi executat pe mai multe unități din același model constructiv, identice din punctul de vedere al caracteristicilor și stării tehnice, dar cu date de fabricație diferite, în ideea de a se evalua și compara eventualele diferențe în comportamentul vibroacustic raportat la gradul de uzură normală datorată exploatarea uzuală, dacă este cazul.

Tabelul 4.5. Caracteristicile tehnice ale autocamionului de studiu

Informații generale	
Model constructiv	Autotractor
Masa totală autorizată	18 tone
Serie de fabricație	2021 - 2023
Motorizare	
Capacitate cilindrică	12800 cm ³
Putere	350 kW / 476 CP
Cuplu motor	2300 Nm
Clasa de poluare	Euro VI, E
Arhitectură	6 cilindri în linie
Tip carburant	Diesel
Arbori cu came	2 arbori cu came în chiulasă: 1 x aspirație 1 x evacuare
Supape pe cilindru	2 x Aspirație 2 x Evacuare
Sistem de alimentare	Rampă comună și amplificarea presiunii în injector / injecție directă în camera de ardere
Frâne de decompresie	Da – prin întredeschiderea supapelor de evacuare pe cursa de comprimare, după ce în prealabil este inhibată injecția de carburant
Transmisie	
Ambreiaj	Mono disc uscat acționat electropneumatic
Cutie de viteze	Acționată electropneumatic 12 trepte de mers înainte 4 trepte de mers înapoi
Formula roților	4x2, tracțiune spate
Șasiu	
Suspensie	Față – arcuri lamelare din oțel Spate – perne de aer
Șasiu	Cadru tip scară
Cabină	Avansată
Dimensiuni de gabarit	



4.4.2 Etapele achiziției experimentale de date prin monitorizarea zgomotelor și vibrațiilor autovehiculului de studiu

Procesul de achiziție de date prin studierea și înregistrarea comportamentului vibroacustic al autocamionului selectat se împarte pe etape gândite de așa natură încât să se poată stabili setul inițial de parametri de bază ce trebuie să definească două situații de bază:

- starea de „liniște” din punct de vedere vibroacustic. Aceasta presupune că înregistrarea se va face cu motorul oprit, singurele valori de zgomot și vibrații provenind de la factorii de mediu înconjurător;
- stare de „funcționare normală” ce presupune ca autovehiculul să funcționeze cu toate componentele funcționale. Astfel parametri vibroacustici caracteristici acestei stări de funcționare vor fi înregistrați cu funcționarea la mers încet în gol a motorului cu ardere internă.

Odată stabiliți parametri de bază menționați mai sus, se procedează la înregistrarea comportamentului vibroacustic al autovehiculului pentru diferite stări de funcționare în avarie, simulate cu aparatul de diagnoză dedicat, situații ce permit monitorizarea unor parametri esențiali corespunzători acelei stări induse.

Etapele complete ale procesului de achiziție de date sunt următoarele:

1. Calibrarea accelerometrelor și microfonului / microfoanelor în regim staționar (după amplasarea acestora pe autocamion);
2. Regim normal de funcționare la mers încet în gol a motorului cu ardere internă;
3. Se decuplează injecția de carburant la cilindrul numărul 1, simulându-se un defect pe acest cilindru care poate fi de natură mecanică (segmenti uzați), de natură hidraulică (neetanșeități la injector) sau de natură electrică (cablajul electric al injectorului cu rezistență tranzitorie).

Pentru a se obține informația cuprinzătoare, această etapă este divizată în două proceduri complementare:

- 3.1 Injecția de carburant a cilindrului numărul 1 a fost decuplată în mod continuu pe durata înregistrării,
- 3.2 Injecția de carburant a cilindrului numărul 1 a fost decuplată în mod alternativ, pe durata înregistrării;

4. Se decuplează injecția de carburant la doi cilindri, ținându-se cont de ordinea de aprindere. Similar cu etapa 3 s-au dezvoltat cele două măsurători complementare:
 - 4.1 Injecția de carburant a cilindrilor numerele 1 și 3 a fost decuplată în mod continuu pe durata înregistrării,
 - 4.2 Injecția de carburant a cilindrilor numerele 1 și 3 a fost decuplată în mod alternativ, pe durata înregistrării;
5. Se decuplează injecția de carburant la trei cilindri, de asemenea luându-se în considerare ordinea de prindere: se vor decupla cilindrii numerele 1, 3 și 5. Implicațiile acestui proces se disting atât prin valorile de accelerație ale pistoanelor identificate cu aparatul de diagnoză dedicat, dar mai ales cu accelerometrele care se presupune că identifică vârfuri multiple ale factorilor de defect. Similar cu etapa 3 s-au dezvoltat cele două măsurători complementare:
 - 5.1 Injecția de carburant a cilindrilor numerele 1, 3 și respectiv 5 a fost decuplată în mod continuu pe durata înregistrării,
 - 5.2 Injecția de carburant a cilindrilor numerele 1, 3 și respectiv 5 a fost decuplată în mod alternativ, pe durata înregistrării;
6. Se acționează succesiv frâna de decompresie pe treapta I în tren de impulsuri, aceasta presupunând admisia presiunii de ulei prin acționarea electrosupapei Y624, funcție ce este prezentată în Figura 4.9. Acest pas simulează atât defect de natură mecanică (scaune de supape neetanșe în cadrul mecanismului de distribuție al motorului cu ardere internă), cât și de natură pneumatică datorat curgerii inverse a gazelor de ardere pe tubulatura de evacuare a motorului cu ardere internă;
7. Se acționează succesiv frâna de decompresie pe treapta II în tren de impulsuri, aceasta presupunând admisia presiunii de ulei prin acționarea electrosupapei Y625.

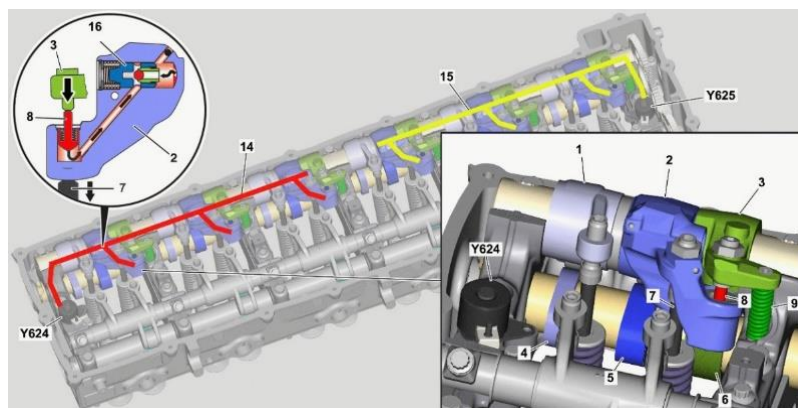


Figura 4.9. Modul de acționare a frânei de decompresie pe treapta I prin electrosupapa Y624

Etapele preliminare, în special etapa de calibrare a accelerometrelor, ajută printre altele și la eliminarea unei etape laborioase și dificil de realizat, constând în amplasarea senzorilor pe autovehicul cât mai aproape de poziția de zero pe fiecare din cele trei axe X/Y/Z. Poziția de zero pe cele trei axe ar fi periclitat amplasarea senzorilor în poziții eficiente, deoarece sistemul de prindere fie nu permitea acest lucru, fie se puteau induce vibrații parazite.

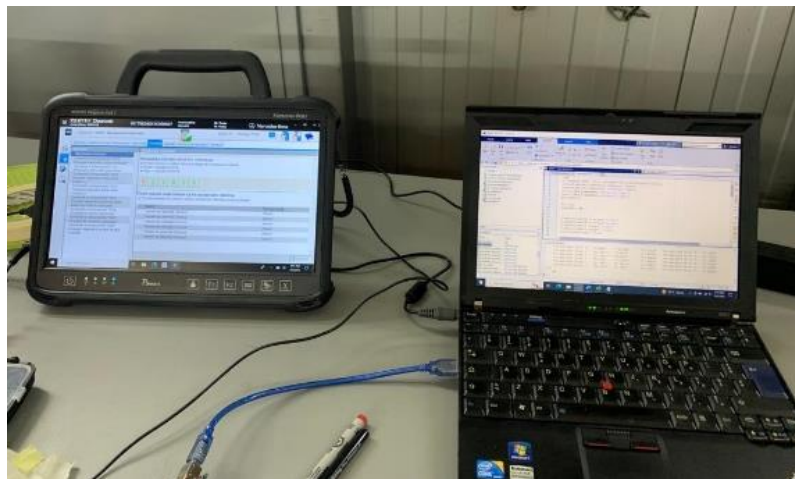


Figura 4.10. Schema de simulare a defectelor cu aparatul de diagnoză urmată de achiziție de date prin MatLab

De precizat că toate acțiunile se fac prin intermediul aparatului de diagnoză dedicat urmată de declanșarea procesului de înregistrare în MatLab prin intermediul schemei de patru accelerometre și un microfon / microfoane, după cum este prezentat și în Figura 4.10.

Într-o primă fază procesului de achiziție de date vibroacustice se vor repeta complet pentru fiecare schemă diferită de amplasare a accelerometrelor și microfonului, apelând la fiecare din cele 7 etape ale algoritmului de măsurare. Pe măsură ce dobândim experiență cu achiziția experimentală de date este posibil ca în funcție de informația vibroacustică țintă să se omită anumite etape ce se pot dovedi redundante ca relevanță.

CAPITOLUL 5. REZULTATE EXPERIMENTALE PROPRII ȘI VALIDAREA LOR

Odată definită latura teoretică a studiului, acest capitol vine să prezinte latura experimentală de achiziție propriu-zisă a informației vibroacustice de interes, cu procesele succesive de lucru pentru procesarea și interpretarea acesteia în scopul validării metodei pe care o propunem pentru analiza și diagnosticarea zgomotelor și vibrațiilor autovehiculului. După cum a fost prezentat în Capitolul 4.3 contribuția personală referitoare la volum vibroacustic deschis și, respectiv, închis are un rol determinat asupra:

- stabilirii senzorilor utilizați: accelerometre și microfoane;
- stabilirii numărului de componente cu referire atât la senzori (accelerometre și microfoane), cât și la plăcile de achiziție de date;
- stabilirea amplasării senzorilor cu ajustările inerente;
- modelării soluției software utilizată pentru înregistrarea și procesarea semnalelor vibroacustice;
- etapelor de lucru în achiziția datelor vibroacustice, care de asemenea vor suferi ajustări inerente.

În mod clar elementele ce urmează a fi prezentate în cadrul acestui capitol relevă validarea ipotezelor teoretice inițiale, dar scot în evidență și observații și aspecte noi ce au fost identificate odată cu avansarea în cadrul studiului practic experimental.

5.1 Prelucrarea rezultatelor obținute în cadrul experimentelor

Odată cu stabilirea senzorilor și a plăcii de achiziție de date optime pentru studiul vibroacustic al autocamionului, am trecut la elaborarea rutinei de lucru în MatLab. Aici trebuie reținut faptul că valorile brute înregistrate de accelerometre sunt achiziționate în (m/s^2) raportat la unitatea de timp și, respectiv, variația semnalului de tensiune al microfonului în (Volt) raportat, de asemenea, la unitatea de timp.

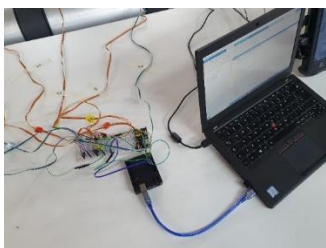


Figura 5.1. Schemă de conectarea a senzorilor la placa suport / placa de achiziție date și respectiv computer

Înainte de a începe orice măsurătoare / înregistrare de semnale vibroacustice trebuie verificată corectitudinea conectării senzorilor la placa suport, respectiv la placa de achiziție de date, precum și setarea corectă a portului de conectare la computer. Fără o rutină software dedicată, acest aspect se poate dovedi greoi (a se vedea Figura 5.1) și poate duce la măsurători viciate. Rezolvarea acestei cerințe a constat în dezvoltarea unei rutine ce am denumit-o *I2C*

Scanner (a se vedea Figura 5.2) care are rolul de verifica prezența pe magistrala de date I2C a tuturor senzorilor ce permit acest tip de conexiune.

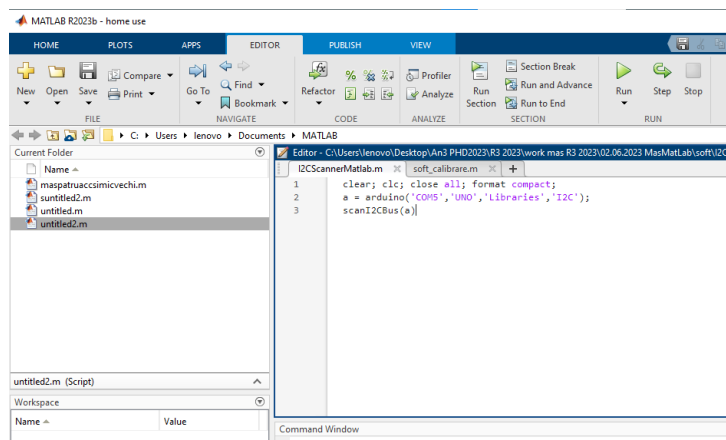


Figura 5.2. Codul software al rutinei I2C scann din MatLab

Prin rutina *I2C Scanner* am securizat măsurătorile, în sensul că nu trecem la măsurătoarea efectivă dacă nu sunt toți senzorii conectați, și atunci când un senzor nu răspunde la funcția de scanare se trece la verificarea conectării acestuia.

Într-un prim pas am elaborat o rutină de achiziție a semnalelor în MatLab care se concentra exclusiv pe înregistrarea datelor brute înregistrate de accelerometre și microfoane. În această rutină factorul timp era înregistrat în valoare absolută, adică monitorizând data calendaristică și ora, aspect util pentru o selecție rapidă a informației vibroacustice achiziționată în diferite etape calendaristice. Această rutină în MatLab genera datele înregistrate exclusiv sub formă tabelară, care apoi erau gândite a fi exportate în Excel, după cum se observă în Tabelul 5.1, unde este prezentată o mostră de valori brute înregistrate de un accelerometru pe cele trei axe și, respectiv, de un microfon.

Tabelul 5.1. Achiziție de date cu variabila timp în valoare absolută

Timp	X1 (m/s ²)	Y1 (m/s ²)	Z1 (m/s ²)	Microfon (V)
6/2/2023 9:50	9.4268	-2.4429	-1.5771	1.4418
6/2/2023 9:50	10.0124	0.63588	-1.8011	1.4272
6/2/2023 9:50	11.8673	1.9028	-1.9196	1.4223

Pe măsură ce au fost realizate o serie de măsurători cu această rutină de lucru, am procedat la realizarea următoarelor etape imediate prioritare:

1. regândirea rutinei de lucru în MatLab pentru a permite procesarea datelor direct în acest mediu de programare, cu evidențierea grafică a rezultatelor;
2. validarea noi rutine software în MatLab prin măsurători de test cu câte un singur accelerometru și respectiv microfon;
3. având validată această rutină software s-a procedat la integrarea mai multor accelerometre și respectiv microfoane în rutina software de achiziție și analiză a semnalelor;
4. stabilirea schemelor de amplasare a accelerometrelor și microfoanelor în concordanță cu tipul deschis / închis de volum acustic studiat și de gradul de dezvoltare a rutinei software în MatLab;

5. optimizarea etapelor de lucru (ce includ generarea de defecte cu aparatul de diagnoză dedicat) în funcție de evoluția procesului de înregistrare vibroacustică și, respectiv, de procesare și analiză a informației;
6. continuarea măsurătorilor pentru validarea ipotezelor de lucru.

Problema calibrării senzorilor accelerometre și microfoane, am rezolvat-o printr-o rutină dedicată (a se vedea Figura 5.3) ce se desfășoară ca achiziție pe o perioadă mai scurtă comparativ cu perioada de timp alocată pentru înregistrarea semnalelor utile de interes. Acest proces se realizează cu adere internă în stare oprită tocmai pentru a capta semnalele de zgomote și accelerație datorate mediului ambiant și respectiv pozițiilor de amplasare pe autovehicul, aici fiind luate în calcul tipurile de suprafețe absorbitive / reflective / difuzive ce pot, de asemenea, influența rezultatele măsurătorilor. În Tabelul 5.2 sunt prezentate rezultatele calibrării pentru patru accelerometre și un microfon, rezultate ce se obțin prin calculul valorii medii a accelerațiilor pe fiecare axă și respectiv tensiunii corespunzătoare presiunii sonore a microfonului. Procedura de calibrare se realizează de fiecare dată când se reiau măsurătorile, astfel încât, în permanență, să fie evaluată influența vibroacustică a factorilor de mediu ambiant.

```

1 clear
2 a = arduino('COM6', 'Uno', Libraries='I2C'); % initializare Arduino
3 %-----
4 %initializare senzori
5 sensor1_adxl345 = adxl345(a, 'I2CAddress', '0x53') %Sensor 1 ADXL345 0x53 cu x1,y1,z1
6 sensor2_adxl345 = adxl345(a, 'I2CAddress', '0x1d') %Sensor 2 ADXL345 0x1d cu x2,y2,z2
7 sensor3_mpu6050 = mpu6050(a, 'I2CAddress', '0x68') %Sensor 3 MPU6050 0x68 cu x3,y3,z3
8 sensor4_mpu6050 = mpu6050(a, 'I2CAddress', '0x69') %Sensor 4 MPU6050 0x69 cu x4,y4,z4
9 %Microfona 'u0'
10 %-----
11 %calibrare senzori
12 %Sensor 1 ADXL345 0x53 cu x1,y1,z1
13 x1_ptcalibrare=[]
14 y1_ptcalibrare=[]
15 z1_ptcalibrare=[]
16 %Sensor 2 ADXL345 0x1d cu x2,y2,z2
17 x2_ptcalibrare=[]
18

```

Figura 5.3. Codul software al rutinei de calibrare din MatLab

Tabelul 5.2. Exemplu de rezultate MatLab pentru procedura de calibrare a senzorilor

Componenta calibrată	Valoarea medie (m/s ²)
val_calibrare_microfon,	1.447973971
val_calibrare_x1,	-0.505716241
val_calibrare_y1,	9.831257984
val_calibrare_z1,	-0.512429288

Și astfel s-a ajuns la regândirea rutinei de lucru în MatLab ce a presupus atât înglobarea procedurii inițiale de calibrare, dar și elaborarea unui algoritm de procesare ce include așa-numite variabile specifice, cum ar valorile de accelerații și presiune sonoră măsurate direct de senzori și grupate sub formă tabelară, după cum se exemplifică în Tabelul 5.3, urmând ca acestea să fie prelucrate ulterior tot în mediul de lucru MatLab.

Tabelul 5.3. Exemplu de achiziție de date cu variabila timp în valoare relativă pentru accelerometrul S2

t_x2 (s)	x2_calibrat (m/s ²)	t_y2 (s)	y2_calibrat (m/s ²)	t_z2 (s)	z2_calibrat (m/s ²)
0.00000000000000	1.36386747262774	0.00000000000000	9.03324446852190	0.00000000000000	7.00702298129562
0.256410256410256	0.444179972627737	0.256410256410256	0.181252281021900	0.256410256410256	2.75346829379562

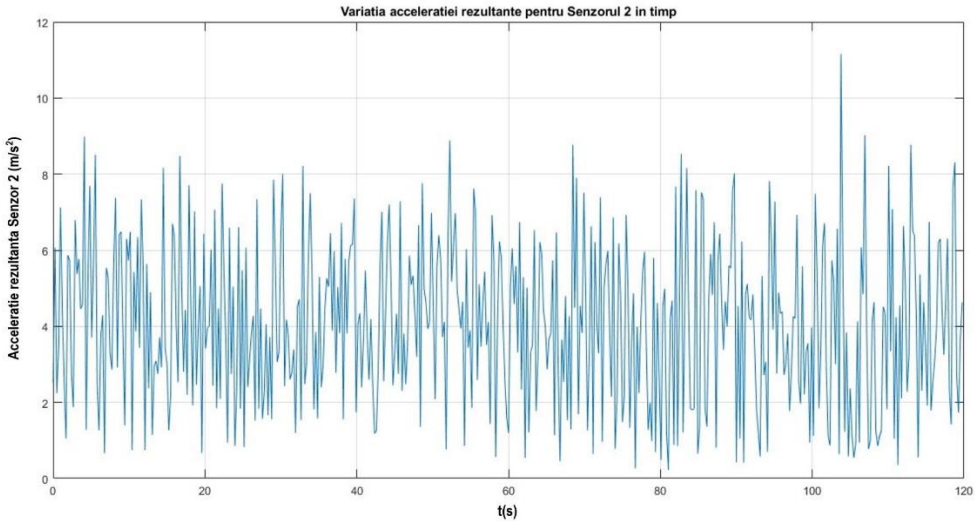
După cum se observă în Tabelul 5.3, variabila timp este în valoare relativă și anume momentul de capăt este cel corespunzător inițierii procedurii de măsurare și astfel se facilitează procesarea rezultatelor achiziționate experimental.

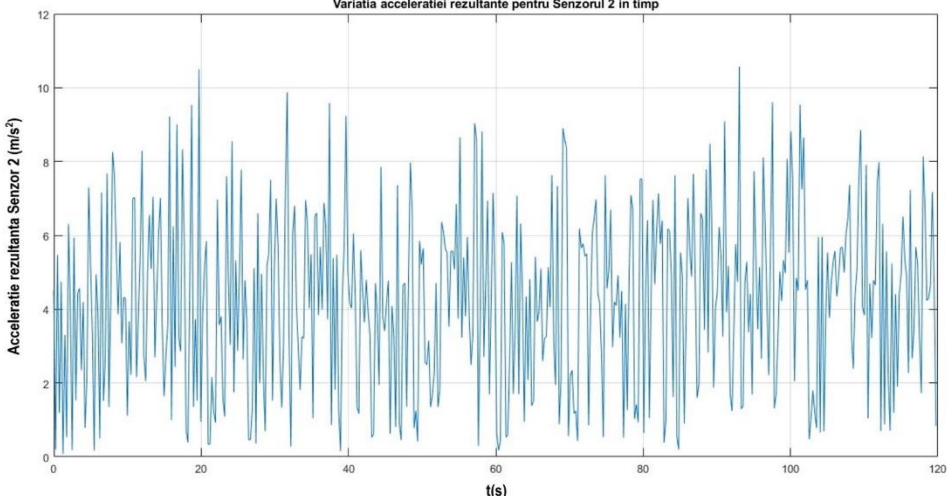
Din punct de vedere al etapelor procesului de achiziție experimentală am constatat că cele două tipuri complementare de acționare continuă / alternativă a decuplării injectiei cilindrilor motorului cu ardere internă, ajută astfel:

- acționarea continuă permite validarea poziționării eficiente a senzorilor;
- acționarea alternativă permite validarea metodei de analiză și diagnosticare, în sensul că se evidențiază anomaliile (vârfurile de amplitudine) ce apar odată cu simularea defectului prin acționarea cu aparatul dedicat de diagnoză.

Confirmarea acestei ipoteze menționată mai sus survine din Tabelul 5.4 unde se prezintă evoluția grafică a valorii rezultante a accelerației, în cazul de față pentru senzorul 2, dar cu diferența ca în primul caz decuplarea injectiei la cilindrii țintă, s-a realizat pe toată durata intervalului de măsurare, pe când în al doilea caz s-a realizat decuplarea alternativă a injectiei la intervale de 30 secunde. Din câte se observă în cazul decuplării alternative, numărul de vârfuri ale amplitudinii ce depășesc valoarea de 8 [m/s^2] sunt prezente în număr semnificativ mai mare comparativ cu decuplarea continuă a injectiei de carburant la aceiași cilindri pe durata aceluiași interval de măsurare, fapt datorat imposibilității computerului de management al motorului cu ardere internă de a compensa nefuncționarea injectiei cilindrilor țintă.

Tabelul 5.4. Exemplu de evoluție a valorii rezultante a Sensorului 2 cu decuplarea diferită a injectiei

Decuplarea injectiei	Evoluția accelerației rezultante a unui senzor în moduri diferite de acționare
1. Continuă	

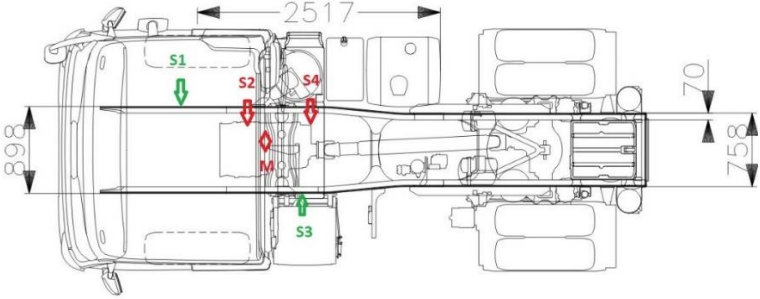
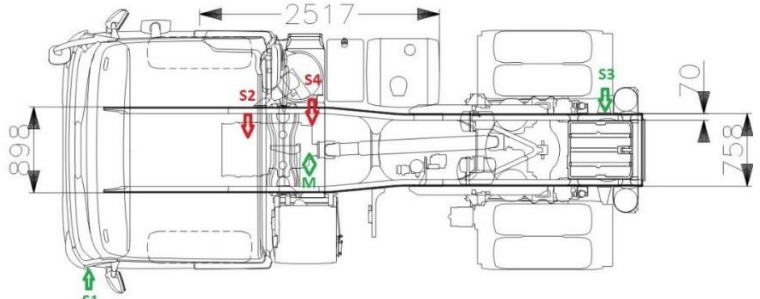
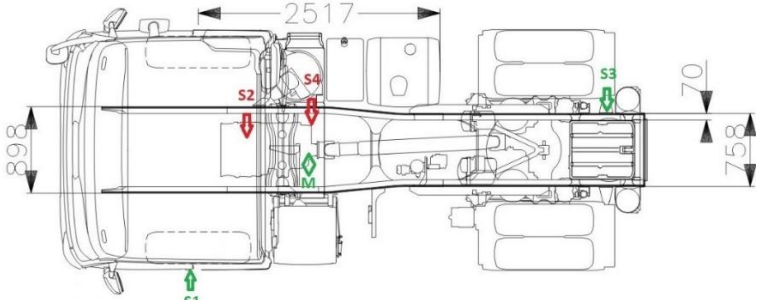
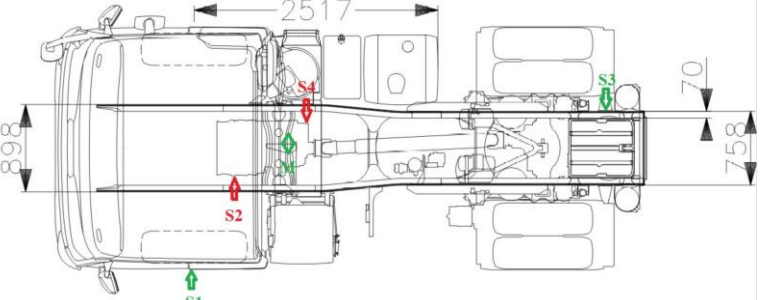
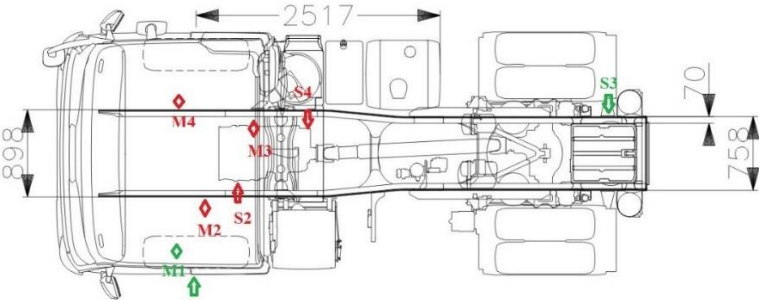
Decuplarea injecției	Evoluția accelerației rezultante a unui senzor în moduri diferite de acționare
2. Alternativă la 30 sec.	

Pe măsură ce s-au derulat sesiunile de înregistrare pe cale experimentală a semnalelor de zgomote și vibrații atât în stare normală de funcționare, cât și în stare de defect indus, schemele de amplasare a senzorilor au suferit modificări și îmbunătățiri atât din punct de vedere al eficacității informației înregistrate, al acurateții, precum și al posibilității dezvoltării unei secțiuni dedicate posibilei detecții a zonei cu anomalii prin intermediul triangulației în cadrul rutinei de analiză din MatLab. Amplasarea senzorilor a ținut cont de următoarele aspecte:

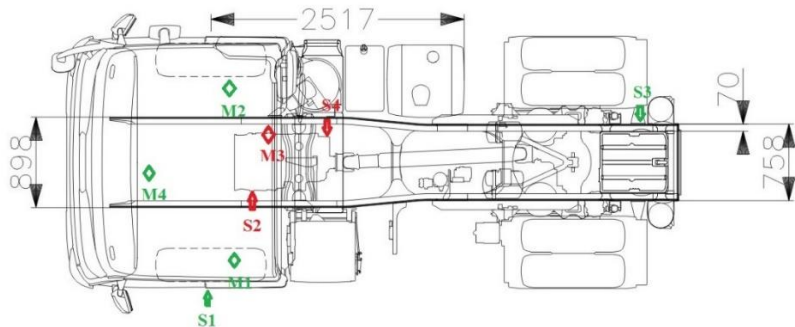
- proximitatea agregatului sursă de anomalii vibroacustice prin acționarea cu aparatul de diagnostică dedicat;
- de contactul direct cu agregatul țintă sau prin intermediul unor elemente de amortizare a vibrațiilor, respectiv în cazul microfoanelor amplasate în zona directă de radiație acustică a agregatului țintă sau în incinte care erau supuse diminuării zgomotelor țintă;
- s-a luat de asemenea în calcul și amplasarea senzorilor echilibrat față de axa longitudinală de simetrie a autovehiculului;
- suplimentar s-a realizat o schemă care să simuleze organele receptoare ale conducătorilor auto în scopul de studiu și modelul uman al percepției și analizei zgomotelor și vibrațiilor, în cazul nostru atunci când subiectul uman se află la volanul autocamionului.

În Tabelul 5.5 sunt prezentate schemele de amplasare a senzorilor cu precizarea că săgețile corespund amplasării accelerometrelor, iar romburile corespund amplasării microfoanelor, respectiv culoarea verde corespunde expunerii indirecte la sursa țintă, iar culoarea culoare roșie corespunde expunerii directe la sursa țintă. Numerotarea schemelor din Tabelul 5.5 ține cont de ordinea cronologică în care au fost dezvoltate și utilizate.

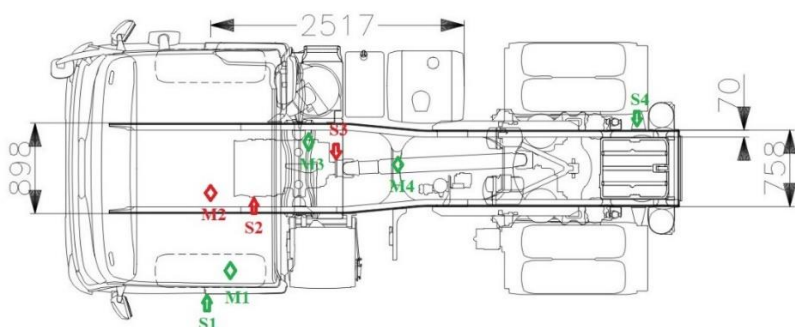
Tabelul 5.5. Schemele de amplasare a senzorilor pe autovehiculul de studiu

Număr Schemă	Amplasare
1	
2	
3	
4	
5	

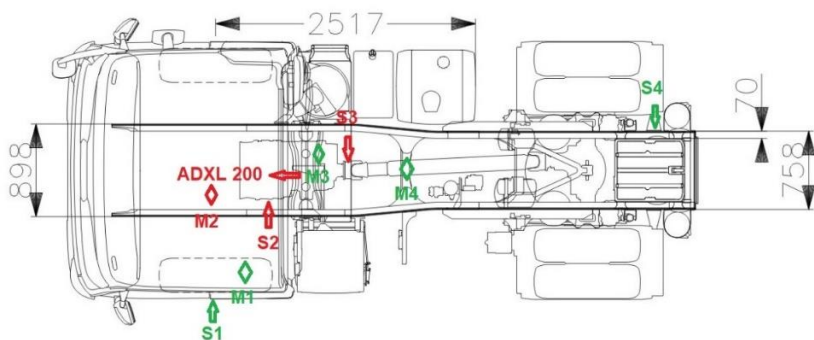
6



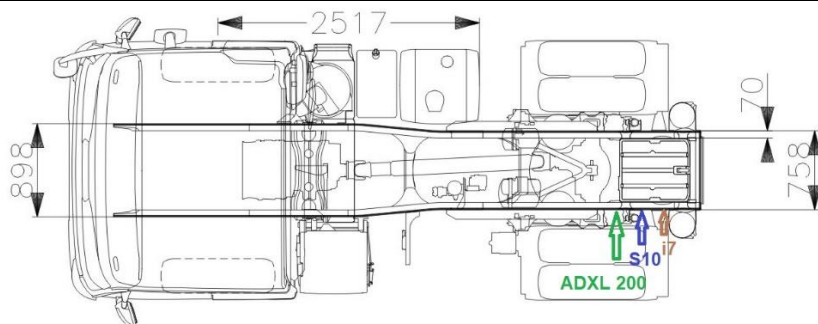
7



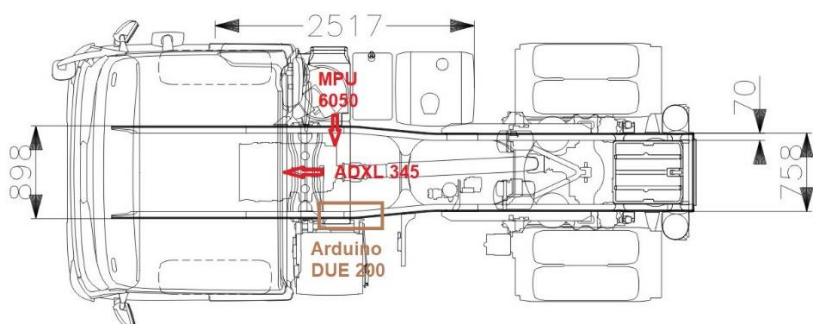
8



9



10



5.2 Prelucrarea rezultatelor brute într-o formă ușor interpretabilă

Evaluarea rezultatelor obținute prin măsurători directe presupune o etapă de procesare și prelucrare a acestora astfel încât să se poată stabili concluzii științifice bazate pe modele matematice consacrate. Și aici am procedat la utilizarea resurselor mediului de programare MatLab pentru a implementa aceste cerințe.

Un prim pas a fost deja atins în Capitolul 5.1, și anume reprezentarea grafică a evoluției valorilor măsurate. În cazul microfoanelor această reprezentare este destul de facil de implementat, însă în cazul accelerometrelor am constatat că nu este suficientă reprezentarea evoluției accelerației pe fiecare din cele trei axe XYZ și astfel a apărut necesitatea calculului vectorului rezultat. Pentru aceasta am dezvoltat rutina de lucru în MatLab pentru a calcula automat vectorul rezultat corespunzător fiecărui set de valori înregistrate pe durata măsurătorii. În literatura de specialitate acest vector rezultat poartă denumirea de SIGNAL VECTOR MAGNITUDE și se calculează conform ecuației (30) (Lai et al., 2016):

$$SVM = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \quad (30)$$

unde:

SVM = vector rezultat al accelerației unui senzor (accelerometru); a_x = valoarea reală înregistrată de accelerometru pe axa X; a_y = valoarea reală înregistrată de accelerometru pe axa Y; a_z = valoarea reală înregistrată de accelerometru pe axa Z.

Având la dispoziție toți cei patru parametri ce caracterizează evoluția accelerației măsurate de un senzor, am trecut la reprezentarea grafică a evoluției acestora, cu funcția PLOT a MatLab, Pentru fiecare senzor, în etapa de procesare a semnalelor înregistrate, am dezvoltat grafice distincte ce definesc evoluția separată a accelerației pe fiecare din cele trei axe XYZ, precum și a vectorului accelerație rezultantă. Am procedat în acest mod pentru a facilita atât analiza globală a vectorului accelerație ce permite identificarea anomaliilor vibratorii, dar, în același timp, am urmărit și evoluția pe fiecare axă în ideea unei dezvoltări ulterioare care să permită detecția tridimensională cât mai precisă a sursei de anomalii vibratorii, respectiv de defect. Un exemplu de reprezentare grafică se regăsește în Figura 5.4 și, respectiv, Figura 5.5.

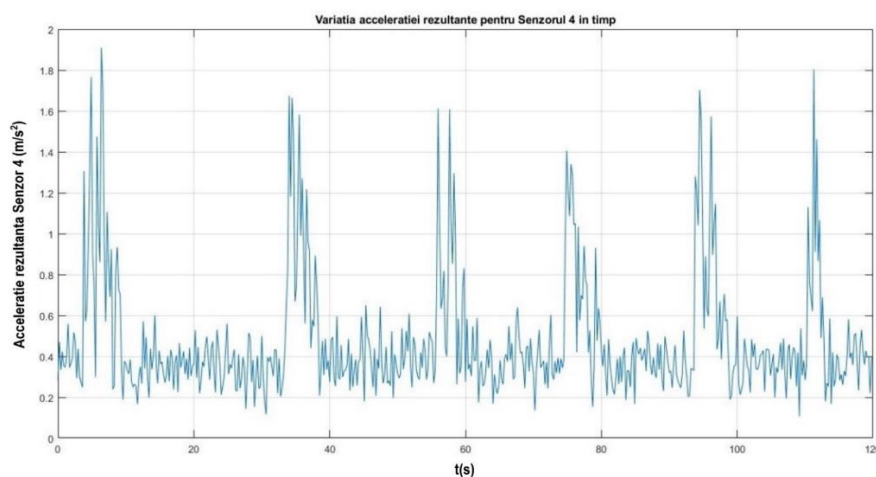


Figura 5.4. Evoluția accelerației rezultante a unui accelerometru

În stadiul incipient al măsurătorilor experimentale era important ca reprezentarea grafică să ajute la confirmarea/infirmitatea amplasării corecte a senzorilor. Astfel am dezvoltat reprezentări ale semnalelor neprelucrate matematic, cum sunt expuse în exemplul din Figura 5.4, menite să permită o analiză rapidă a capacității de sesizare a anomaliilor vibroacustice generate cu testerul de diagnoză al autovehiculului, conform etapelor de achiziție de date descrise în Capitolul 4.4.2. Acest exemplu corespunde unei frecvențe de eșantionare de 4 Hz.

Atunci când am urmărit identificarea frecvențelor dominante din semnalul de accelerație înregistrat de senzor, am apelat la măsurători cu frecvență de eșantionare de 200 Hz, procesate cu rutine de lucru în MatLab prin intermediul transformatei rapide Fourier FFT, lucru ce se observă în exemplul din Figura 5.5.

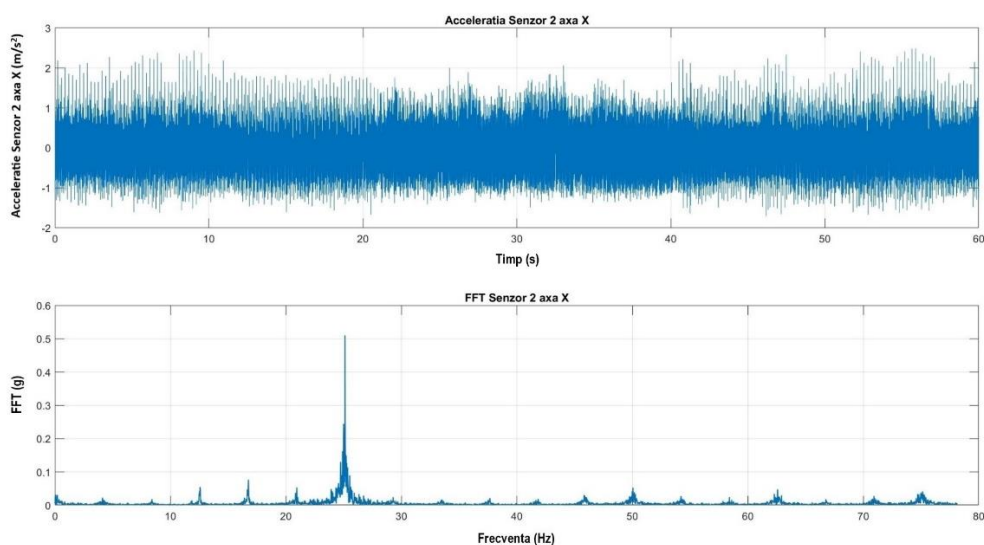


Figura 5.5. Reprezentare grafică a evoluției accelerației unui senzor

Am dezvoltat o rutină de calcul în MatLab a valorilor medii ale vectorului rezultat al accelerației pentru fiecare senzor măsurat. Toate acestea se regăsesc materializate în exemplul grafic din Figura 5.6, unde se observă că senzorii 2 și 3 permit o sesizare cât mai fidelă a anomaliilor vibroacustice induse și astfel se pun bazele așa-numitei detecții bi/tridimensionale a zonei de amplasare a sursei. Suplimentar în rutina de lucru din MatLab se pune o condiționare pe valoare de prag a valorii medii peste care să genereze un mesaj de informare, corespunzător apariției stării de defect.

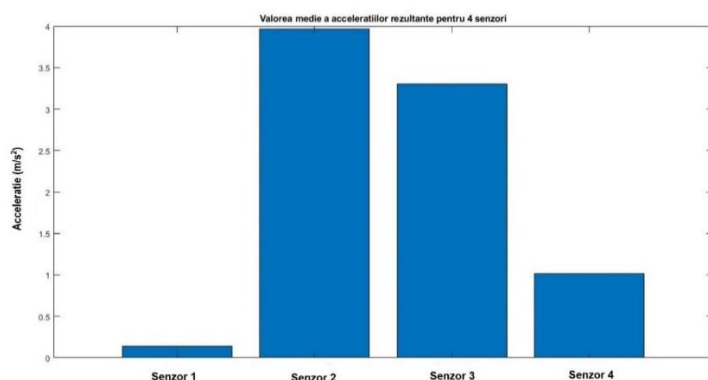


Figura 5.6. Reprezentare grafică a valorilor medii pentru vectorii rezultanți ai accelerațiilor corespunzătoare a patru accelerometre în rutina MatLab

Dacă pe partea de procesare a valorilor brute ale accelerațiilor și presiunii sonore, rutina de lucru în MatLab prinde contur, a survenit nevoia de identificare a frecvențelor ce intervin în cadrul acestor măsurători.

Mai exact în MatLab, funcția pentru calculul *FFT* este definită “*fft()*”. Această funcție acceptă un vector de semnale sau un set de puncte și returnează transformata Fourier corespunzătoare, a cărei sintaxă de bază este definită în ecuația (31):

$$Y = fft(X) \quad (31)$$

unde:

X reprezintă vectorul de semnale sau setul de valori de intrare; *Y* este transformata Fourier calculată a semnalului de intrare (<https://www.mathworks.com>).

Rezultatele Transformatelor Fourier le-am stocat într-o matrice ce înglobează vectorii fiecărei componente a accelerației ce se regăsesc exemplificate în Tabelul 5.6, unde *f_FFT_x* este frecvența și respectiv *A_FFT_x* este amplitudinea semnalului prelucrat în MatLab cu transformata Fourier pentru componenta axei *X* a accelerometrului numerotat S1. Este de menționat că procesarea în MatLab, a valorilor vectorului amplitudine a semnalului se realizează raportat la accelerația gravitațională, acesta fiind motivul pentru care apare (g) ca unitate de măsură.

Tabelul 5.6. Rezultatele prelucrării Fourier a semnalelor accelerometrului S1 în MatLab

<i>f_FFT_x1</i> (Hz)	<i>A_FFT_x1</i> (g)	<i>f_FFT_y1</i> (Hz)	<i>A_FFT_y1</i> (g)	<i>f_FFT_z1</i> (Hz)	<i>A_FFT_z1</i> (g)
0.000105981	0.012586144	0.000105981	0.071315145	0.000105981	0.094181782
0.000114133	0.005133164	0.000114133	0.09653452	0.000114133	0.135289433
0.000122285	0.003961224	0.000122285	0.127734355	0.000122285	0.176535286

Datorită dificultății analizei și interpretării rezultatelor prelucrării Fourier în formă tabelară a semnalelor înregistrate, am dezvoltat o secvență de calcul în cadrul rutinei MatLab ce transpune aceste informații în reprezentare grafică utilizând funcția corespunzătoare a MatLab.

Pentru o analiză mai detaliată a frecvențelor dominante în cazul unor semnale particulare prelevate, am procedat la calculul puterii densității spectrale a semnalelor înregistrate prin intermediul unei secvențe de calcul în cadrul rutinei de lucru în MatLab. Funcția matematică a puterii densității spectrale este definită de ecuația (32) conform (<https://polaridad.es>):

$$PSD(f) = \frac{|F(f)|^2}{\Delta f} \quad (32)$$

unde:

PSD(f) = densitatea de putere spectrală; $|F(f)|^2$ = modulul pătrat al transformatei Fourier în frecvență; Δf = lățimea de bandă a semnalului de frecvență.

Asemenea rezultatelor anterioare prin intermediul rutinei de lucru în MatLab și în acest caz am realizat reprezentarea grafică a rezultatelor procesării cu funcția PSD.

5.3 Analiza comparativă a rezultatelor

O analiză comparativă obiectivă a rezultatelor are în vedere următoarele aspecte:

- a. amplasarea senzorilor cu expunere directă / indirectă la sursa de zgomote și vibrații;
- b. regimurile de funcționare a motorului conform etapelor de măsurare;
- c. erorile de redactare a codului în rutina de lucru MatLab;
- d. valorile pe cele trei axe ale semnalului măsurat;
- e. frecvența de eșantionare;
- f. axa de propagare a vibrațiilor.

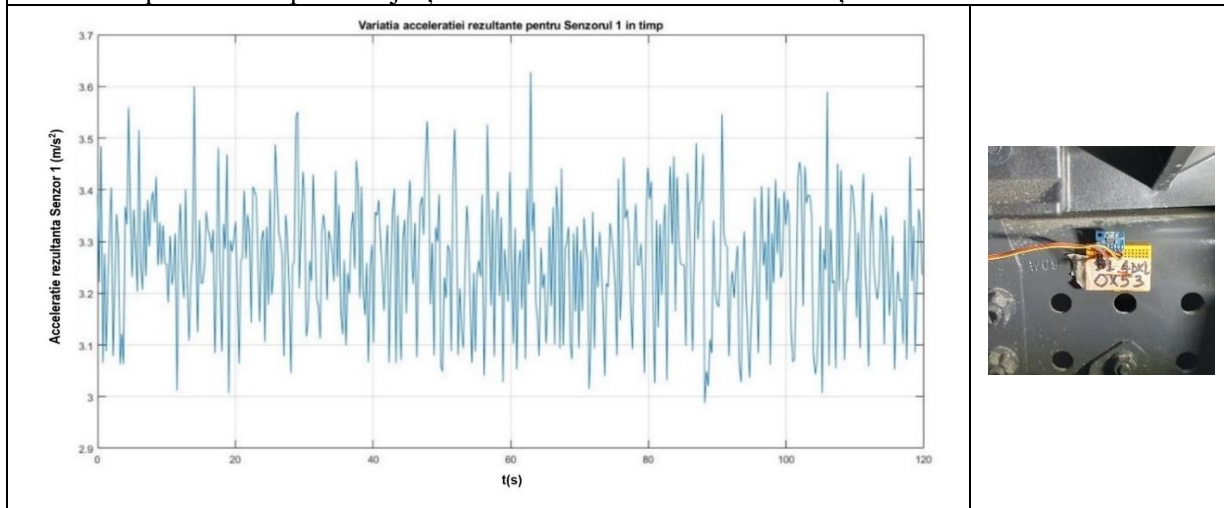
Trecând la analiza detaliată se disting următoarele:

a. Din punct de vedere al amplasării cât mai eficace a senzorilor pe autovehicul se disting cele două situații particulare corespunzătoare amplasării accelerometrelor și, respectiv, microfoanelor.

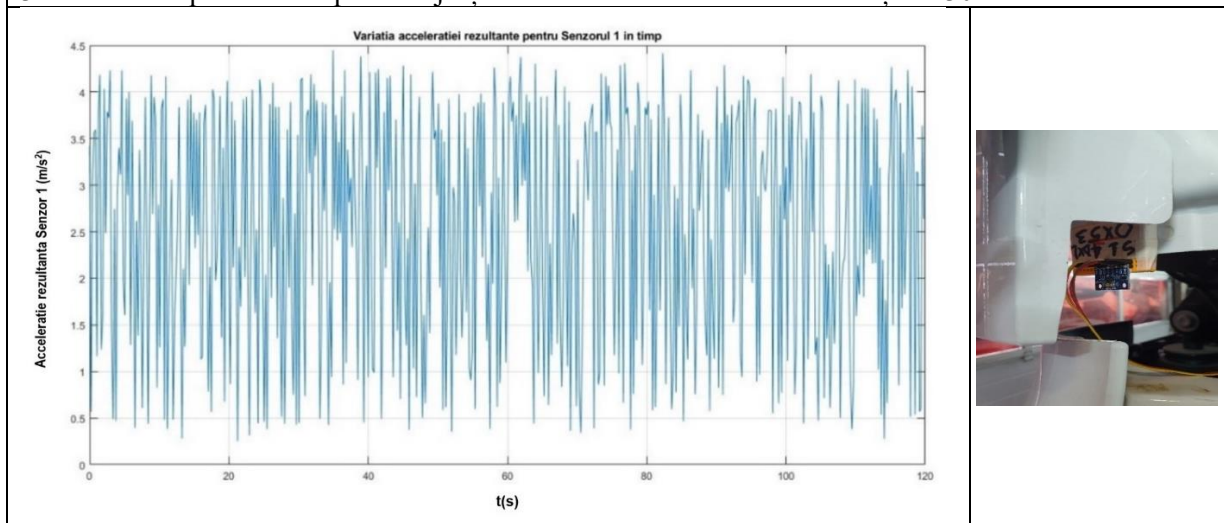
a.1 Evaluând amplasarea accelerometrelor, s-a confirmat diferența de sesizare a perturbațiilor în sensul că același accelerometru S1, atunci când a fost fixat direct pe șasiu dreapta față – cazul I în Tabelul 5.7 – versus fixat în colțul stânga față pe structura de bază a cabinei– cazul II în Tabelul 5.7 – reușește o sesizare mult mai fidelă a aceleiași perturbații generate cu aparatul de diagnostică dedicat.

Tabelul 5.7. Moduri de sesizare a perturbațiilor vibratorii ale accelerometrului S1

I. Accelerometrul S1 montat pe șasiu conform schemei 1 de amplasare. Achiziție de date în etapa 3.2 adică decuplarea / recuplarea injecției cilindrului numărul 1 în secvență de 30 de secunde



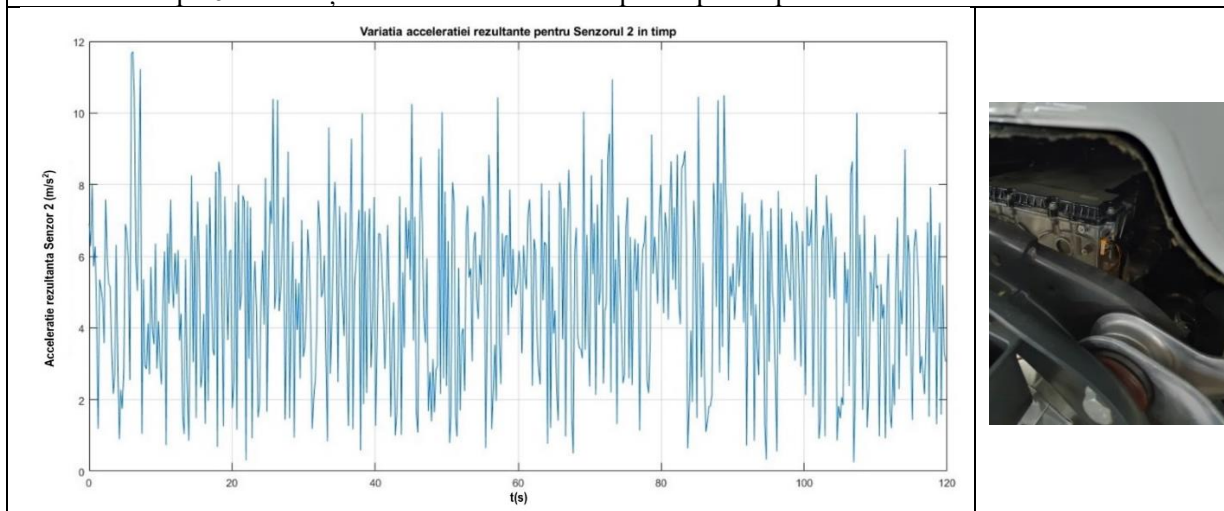
II. Accelerometrul S1 montat pe cabină conform schemei 2 de amplasare. Achiziție de date în etapa 3.2 adică decuplarea / recuplarea injecției cilindrilor numărul 1 în secvență de 30 de secunde



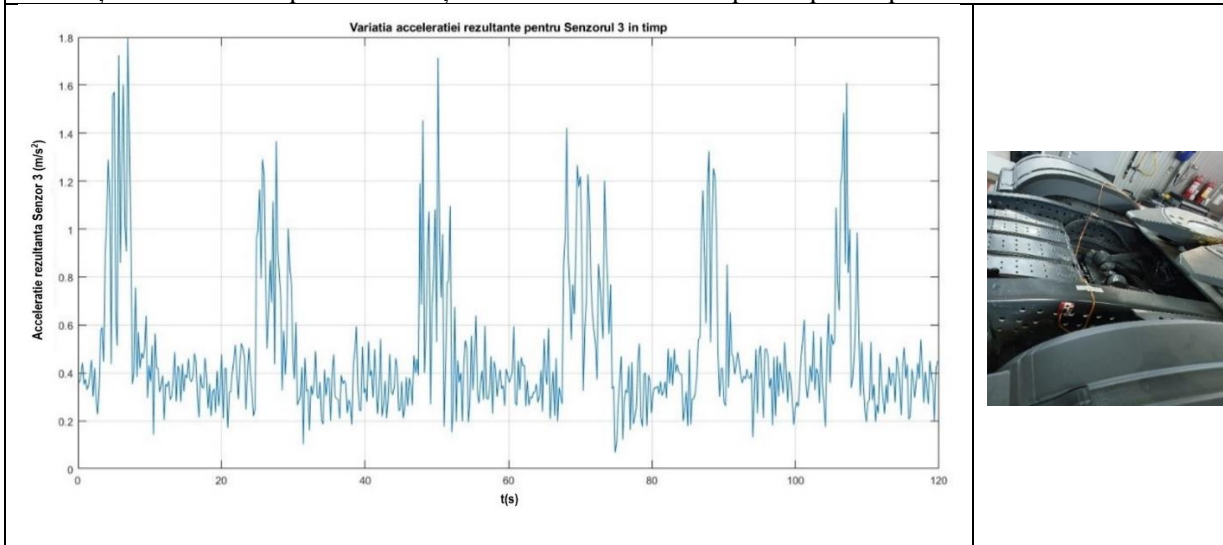
a.2 Un alt mod de abordare a analizei comparative a rezultatelor a plecat de la evaluarea semnalelor a două accelerometre ce au realizat simultan măsurătoare în același regim de funcționare a motorului cu ardere internă. Tabelul 5.8 prezintă rezultatele grafice realizate pe baza evoluției accelerației rezultante atât a senzorului S2 montat pe chiulasa – cazul I în tabel, cât și a senzorului S3 montat în consola spate a șasiului – cazul II în tabel. După cum se observă un avantaj semnificativ în sesizarea anomaliilor vibroacustice îl reprezintă și mediul de transmitere coroborat cu distanța pe care se realizează acest proces. Astfel că senzorul amplasat pe consola spate a șasiului beneficiază de filtrarea și amplificarea semnalului țintă, ceea ce se regăsește foarte clar în evoluția vârfurilor de semnal corespunzătoare momentului de acționare al frânei pe evacuare, lucru ce este mai dificil de sesizat de senzorul S2 ce este amplasat direct pe chiulasă și este printre altele supus compunerii vibrațiilor datorate acționării frânei pe evacuare cu cele normale caracteristice funcționării motorului (cum ar fi echipamente auxiliare, etc.).

Tabelul 5.8. Moduri de sesizare simultană a perturbațiilor vibratorii de către două accelerometre diferite

I. Accelerometrul S2 montat în dreapta spate pe chiulasă, conform schemei 2 de amplasare. Achiziție de date în etapa 6 adică acționarea frânei de decompresie pe treapta I



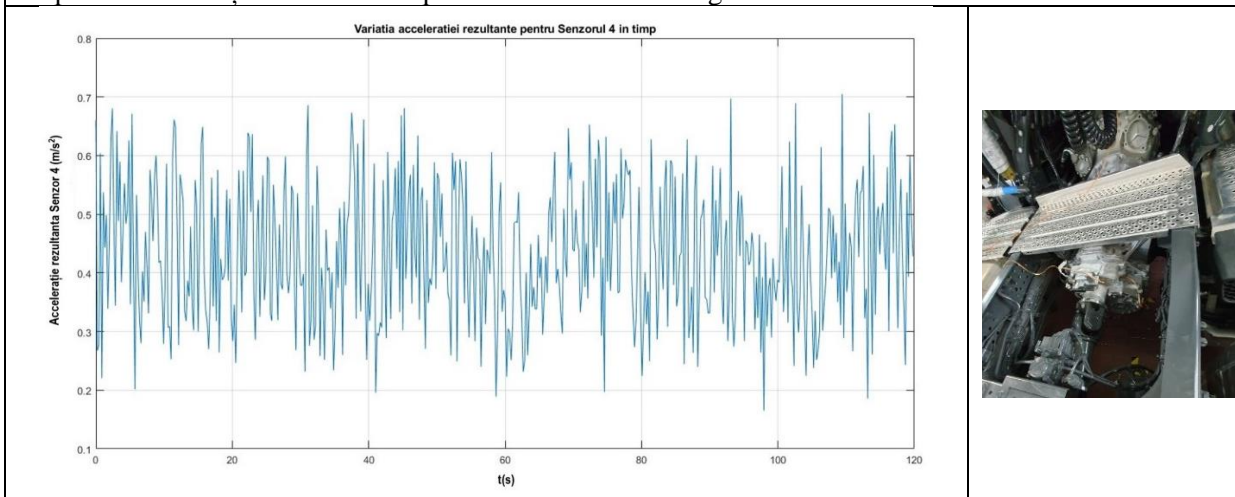
II. Accelerometrul S3 montat pe consola dreapta spate a șasiului conform schemei 2 de amplasare. Achiziție de date în etapa 6 adică acționarea frânei de decompresie pe treapta I



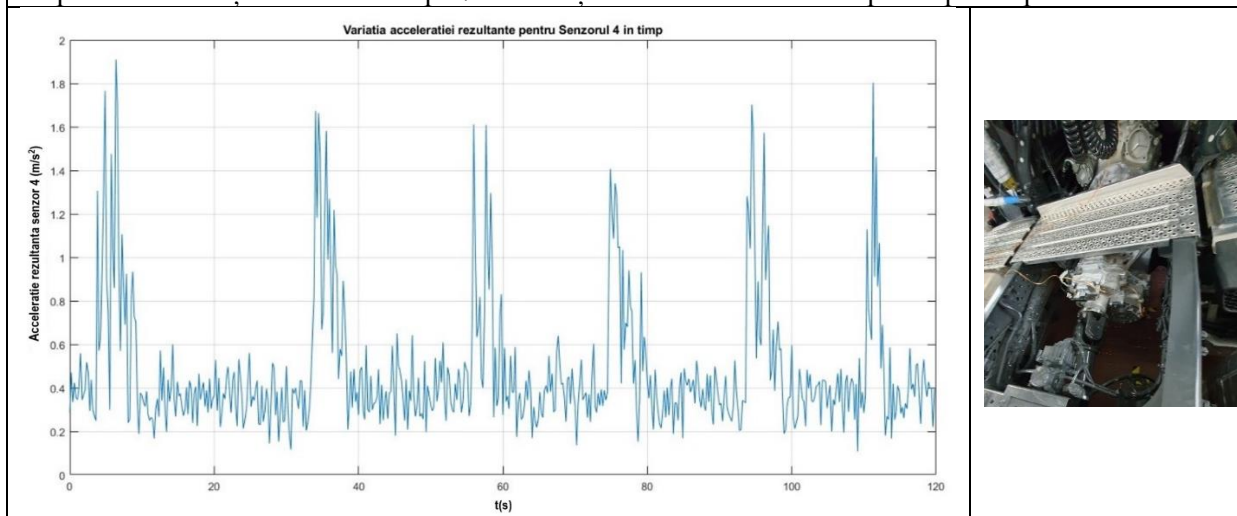
b. Din punct de vedere al regimurilor de funcționare a motorului conform etapelor de măsurare definite în Capitolul 4.4.2, analiza comparativă a rezultatelor vine să confirme corectitudinea amplasării senzorilor, precum și a rutinei de lucru în MatLab pentru procesarea și prelucrarea semnalelor achiziționate. Astfel Tabelul 5.9 prezintă în cazul I semnalul înregistrat la mers încet în gol de accelerometrul S4 amplasat conform schemei 2. Practic din curba de evoluție a accelerației rezultante se observă reproducerea defectului indus atât din punct de vedere al intervalului de repetare al acționării la aproximativ 30 de secunde, precum și al amplitudinii vârfurilor de semnal.

Tabelul 5.9. Exemplu de semnale înregistrate de același senzor în regimuri diferite de funcționare a motorului cu ardere internă al autovehiculului

I. Accelerometrul S4 montat pe capacul dreapta spate a cutiei de viteze, conform schemei 2 de amplasare. Achiziție de date în etapa 2 adică mers încet în gol



II. Accelerometrul S4 montat pe capacul dreapta spate a cutiei de viteze, conform schemei 2 de amplasare. Achiziție de date în etapa 7 adică acționarea frânei de decompresie pe treapta II

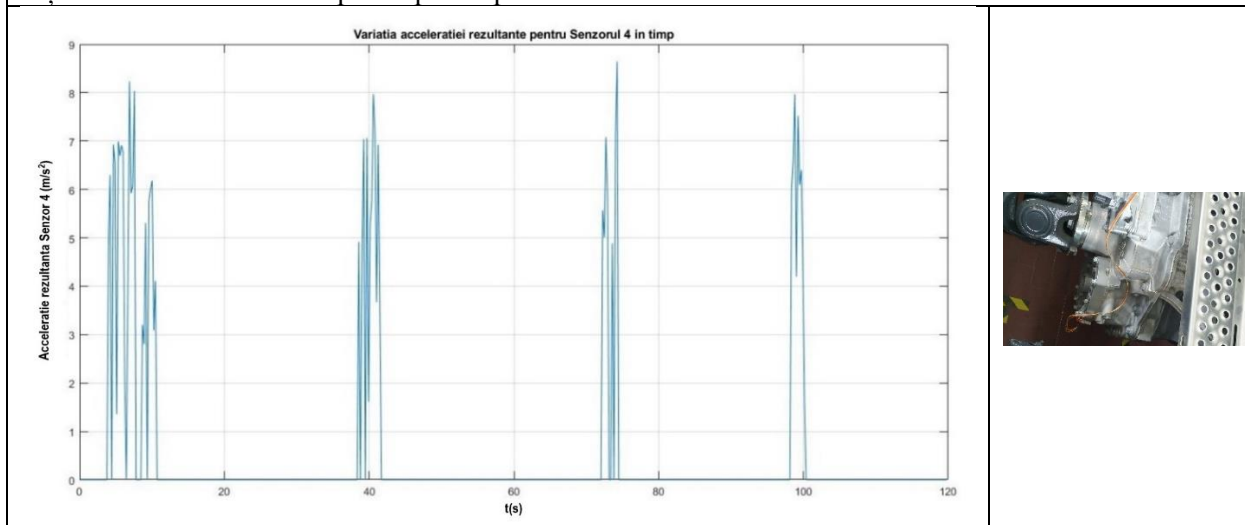


C. Un aspect interesant a constat în evidențierea situațiilor nefavorabile care pot influența analiza datelor achiziționate, în sensul de a vicia rezultatele obținute prin prelucrare. Un astfel de exemplu se regăsește în cele ce urmează, fapt datorat unui viciu de scriere a softului de lucru în MatLab, în cadrul uneia din primele rutine software.

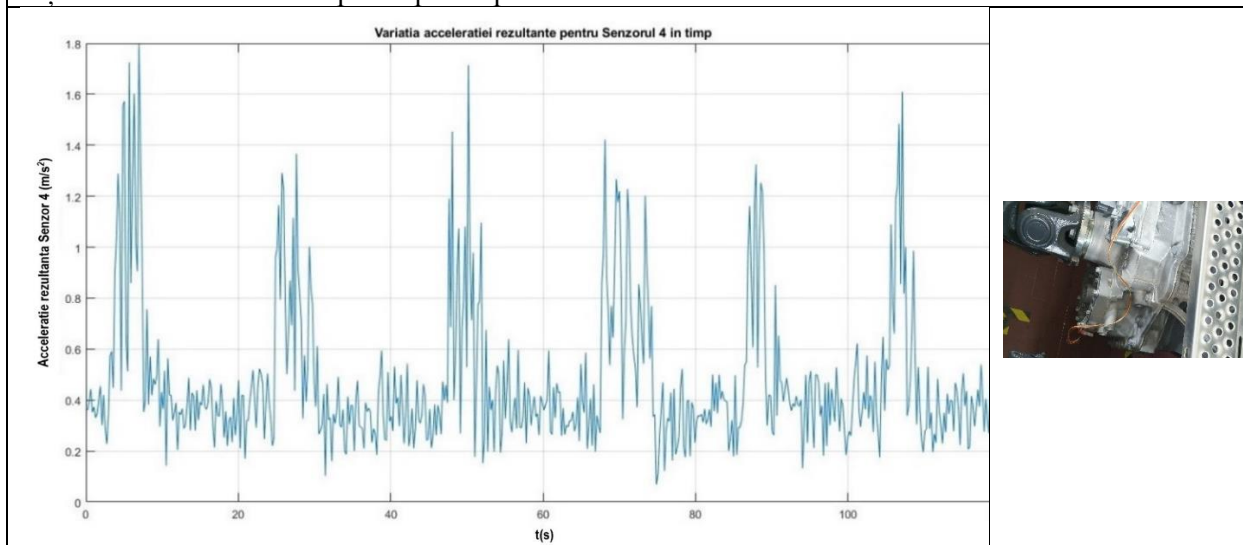
În Tabelul 5.10 poziția I se observă anomaliile ce se manifestă după prelucrarea valorilor înregistrate de accelerometrul numărul 4 (amplasarea sa este identică) în etapa numărul 6 de achiziție de date (corespunzătoare acționării supapei Y624 pentru treapta I a frânei de decompresie). După cum se observă în cazul I semnalul obținut prin prelucrarea viciată este asemănător cu cel corect din cazul II, cu deosebirea că în primul caz în afara vârfurilor pare că accelerometrul nu înregistrează nimic, lucru ce nu este corect.

Tabelul 5.10. Diferența între prelucrarea viciată și respectiv corectă a valorilor înregistrate de accelerometrul S4 în etapa 6 de achiziție de date

I. Prelucrare viciată a semnalului prelevat de accelerometrul S4 în etapa 6 de acționare, adică acționarea frânei de decompresie pe treapta I



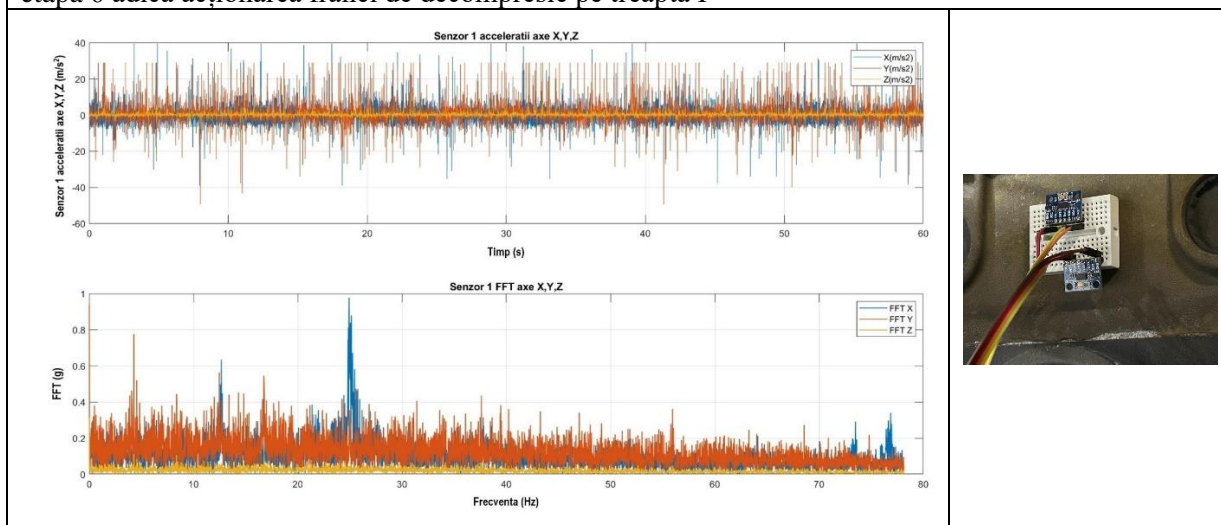
II. Prelucrare corectă a semnalului prelevat de accelerometrul S4 în etapa 6 de acționare, adică acționarea frânei de decompresie pe treapta I



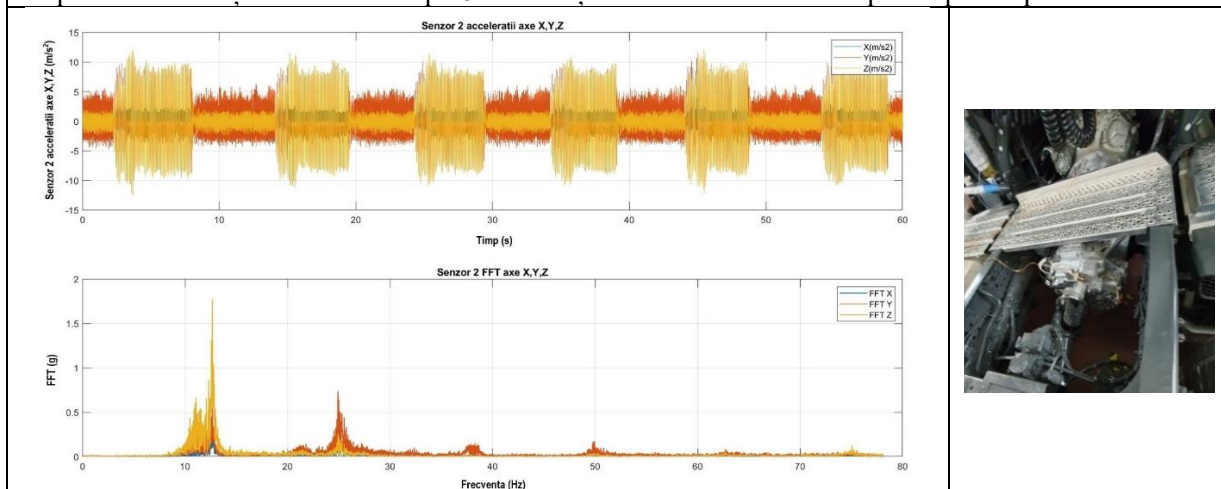
Analiza comparativă a semnalelor pe cele trei axe înregistrate simultan de mai mulți senzori, permite printre altele dezvoltarea rutinei software în sensul de a se realiza partea de identificare cât mai precisă a poziției sursei perturbatoare. Tabelul 5.11 prezintă acest aspect, venind în completarea informațiilor prezentate în Tabelul 5.9. Exemplele se referă la evoluția vectorilor accelerație pe cele trei axe XYZ corespunzătoare semnalelor măsurate de accelerometrul S1 montat pe chiulasă conform schemei 10 – cazul I, și respectiv accelerometrul S2 montat pe cutia de viteze conform schemei 10 – cazul II. Este de precizat că vectorilor accelerație li s-a aplicat secvența de lucru cu transformata Fourier în cadrul rutinei de lucru în MatLab.

Tabelul 5.11. Exemplu de evoluție a semnalului pe trei axe a accelerației înregistrate simultan de 2 accelerometre

I. Accelerometrul S1 montat pe chiulasă conform schemei 10 de amplasare. Achiziție de date în etapa 6 adică acționarea frânei de decompresie pe treapta I



II. Accelerometrul S2 montat pe capacul dreapta spate a cutiei de viteze, conform schemei 10 de amplasare. Achiziție de date în etapa 6 adică acționarea frânei de decompresie pe treapta I

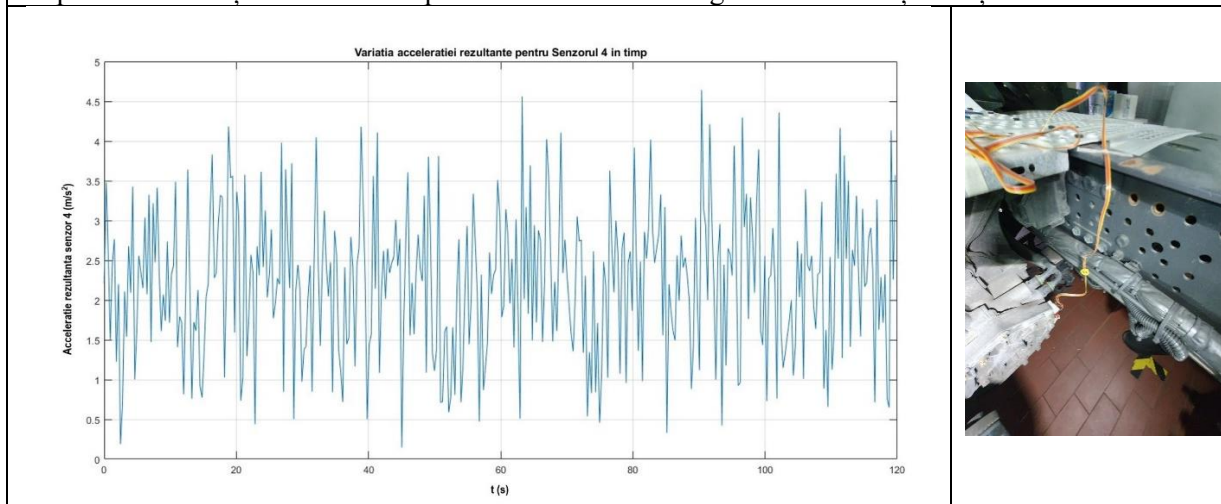


e. Analiza din punct de vedere al frecvenței de eșantionare permite evidențierea influenței acestui parametru al măsurătorilor asupra posibilității de dezvoltare a rutinei de lucru în MatLab conform unuia dintre obiectivele metodei noastre de analiză și anume de a face posibilă identificarea frecvențelor dominante ce se manifestă atunci când sunt prezente anomalii vibroacustice. Pentru a putea realiza acest proces a fost nevoie să mai fie conectată o placă suplimentară Arduino UNO cu un senzor ADXL 345 unitar la care a fost setată frecvența de 200 Hz, fiind denumit în schema 8 de conectare ca fiind ADXL 200.

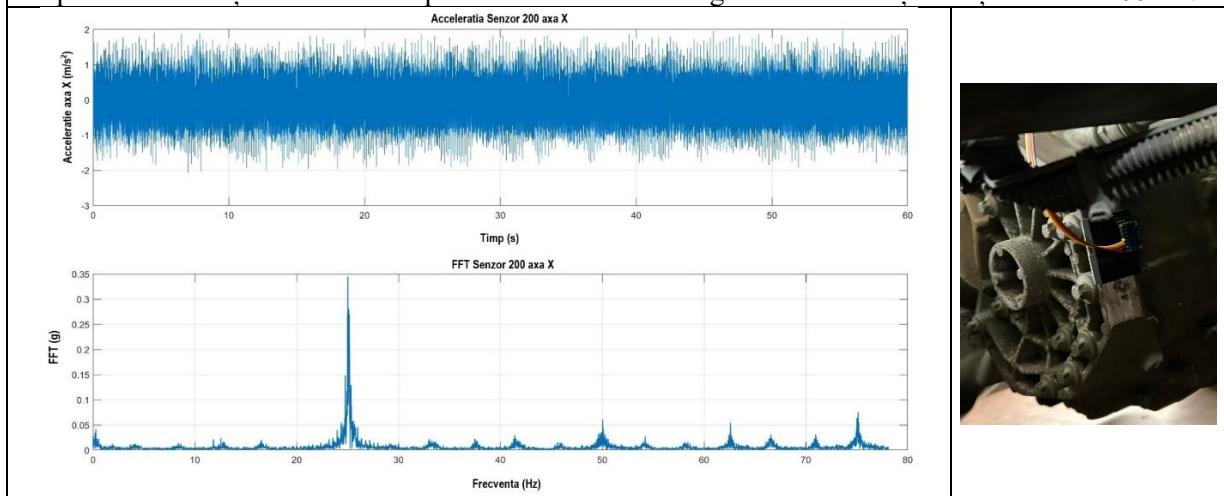
Din câte se observă în Tabelul 5.12 frecvența de eșantionare satisfăcătoare, în această schemă de măsurare în care placa de achiziție de date este un Arduino UNO, este de 200 Hz ceea ce se va regăsi în capitolul de validare a rezultatelor. În schimb rata inițială de eșantionare de 4 Hz permite o măsurare grosieră a semnalelor vibroacustice astfel încât, pe baza unor secvențe de condiționare ca limită de prag în rutina de lucru din MatLab, să se poată sesiza apariția anomaliilor vibroacustice în funcționarea autovehiculului.

Tabelul 5.12. Exemplu evoluției semnalului de accelerație înregistrat simultan de 2 accelerometre, dar la frecvență diferită de eșantionare

I. Accelerometrul S4 montat lateral dreapta spate pe cutia de viteze, conform schemei 5 de amplasare. Achiziție de date în etapa 2 adică mers încet în gol – cu frecvență de eșantionare de 4 Hz



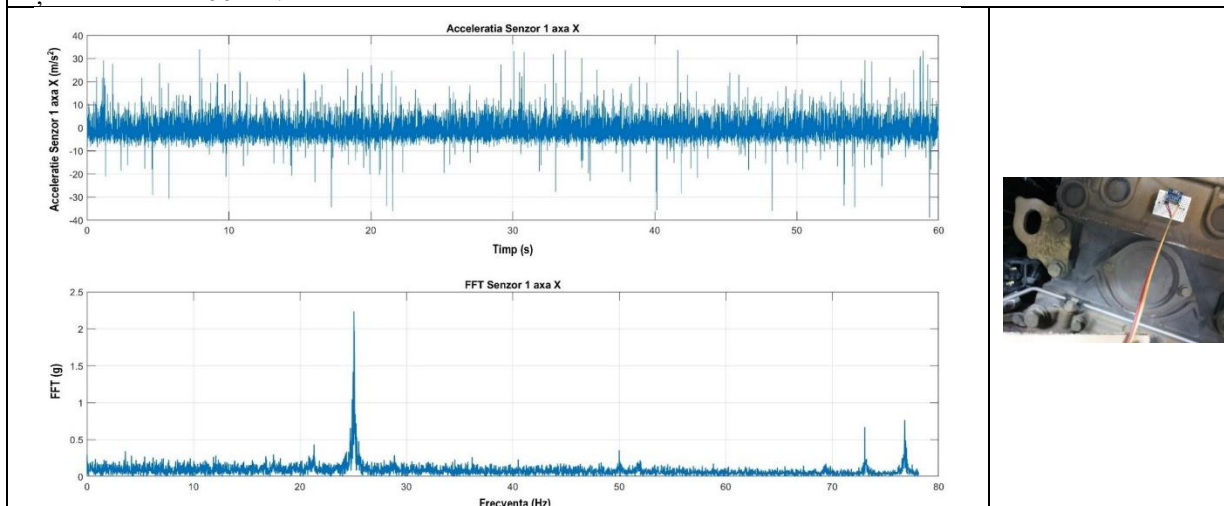
II. Accelerometrul 200 montat lateral dreapta spate pe cutia de viteze, conform schemei 10 de amplasare. Achiziție de date în etapa 2 adică mers încet în gol – cu frecvență de eșantionare 200 Hz.



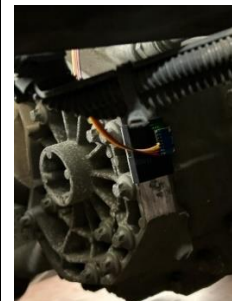
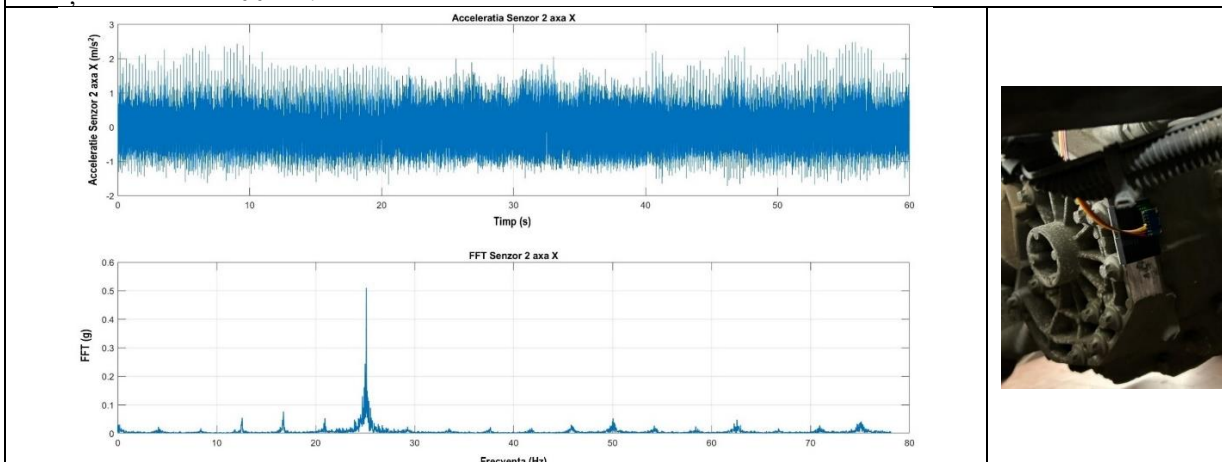
f. Din punct de vedere al amplasării cât mai eficace a senzorilor pe autovehicul raportat de axa de propagare a vibrațiilor, am constatat că accelerometrul amplasat în imediata vecinătate a zonei sursă are semnalul semnificativ diferit pe cele trei axe de măsurare. Astfel senzorul amplasat în partea posterioară a chiulasei, fiind în directă legătură cu mecanismul bielă-manivelă ce se constituie sursa anomaliilor vibratorii prin decuplarea injecției la un cilindru, poate sesiza fidel vibrațiile pe axa X, care este și axa longitudinală de simetrie a motorului cu ardere internă, comparativ cu accelerometrul amplasat în consola dreapta spate a cutiei de viteze, mai exact pe lateralul capacului pompei de ulei. În schimb pe axa Y, care este axă neutră din punct de vedere al relevanței propagării vibrațiilor, accelerometrul amplasat pe chiulasă furnizează un semnal de accelerație atât brută, cât și prelucrată Fourier nerelevant, comparativ cu accelerometrul amplasat pe cutia de viteze. Exemplificarea acestei analize comparative se regăsește în Tabelul 5.13 unde cazul I prezintă evoluția semnalului de accelerație pe axa X pentru cele două accelerometre și respectiv.

Tabelul 5.13. Comparația evoluției semnalului de accelerație pe axa X și respectiv Y supus prelucrării Fourier, înregistrat simultan de 2 accelerometre, dar cu amplasare diferită față de axa de propagare

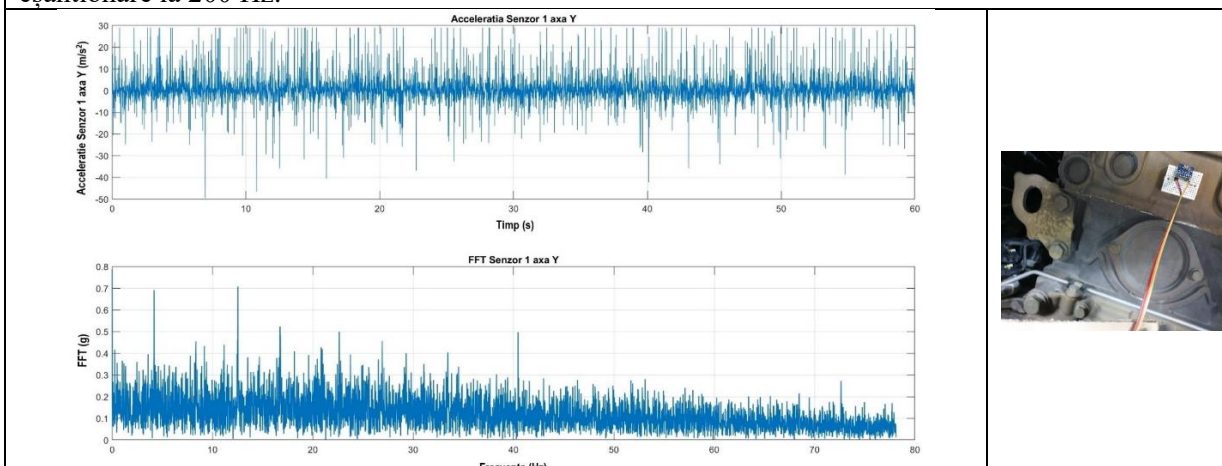
Ia Axa X - Accelerometrul ADXL345 montat în partea posterioară a chiulasei, conform schemei 10 de amplasare. Achiziție de date în etapa 3.2 puțin adaptată, adică decuplarea / recuplarea injecției cilindrului numărul 2 în secvență de 20 de secunde și secvența de înregistrare de 60 secunde, cu eșantionare la 200 Hz.



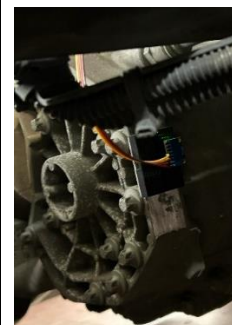
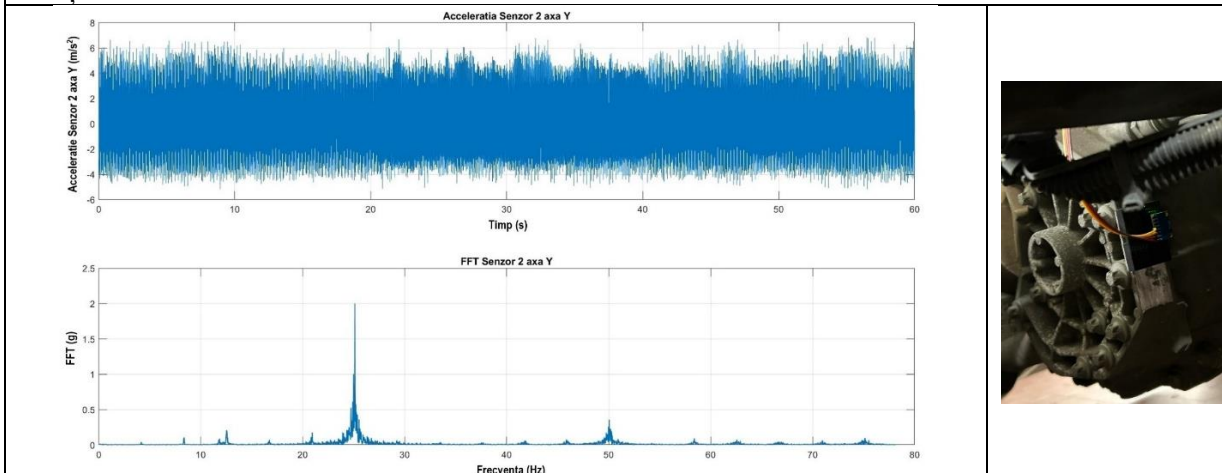
I.b Axa X - Accelerometrul MPU6050 montat în partea posterioară a cutiei de viteze, conform schemei 10 de amplasare. Achiziție de date în etapa 3.2 puțin adaptată, adică decuplarea / recuplarea injecției cilindrului numărul 2 în secvență de 20 de secunde și secvența de înregistrare de 60 secunde, cu eșantionare la 200 Hz.



II.a Axa Y - Accelerometrul ADXL345 montat în partea posterioară a chiulasei, conform schemei 10 de amplasare. Achiziție de date în etapa 3.2 puțin adaptată, adică decuplarea / recuplarea injecției cilindrului numărul 2 în secvență de 20 de secunde și secvența de înregistrare de 60 secunde, cu eșantionare la 200 Hz.



II.b Axa Y - Accelerometrul MPU6050 montat în partea posterioară a cutiei de viteze, conform schemei 10 de amplasare. Achiziție de date în etapa 3.2 puțin adaptată, adică decuplarea / recuplarea injecției cilindrului numărul 2 în secvență de 20 de secunde și secvența de înregistrare de 60 secunde, cu eșantionare la 200 Hz.



5.4 Validarea rezultatelor teoretice

Procesul de validare a rezultatelor teoretice presupune regăsirea pe cale experimentală a premiselor teoretice ce au stat la baza dezvoltării metodei noastre de analiză a zgomotelor și vibrațiilor cu posibilitatea de a evidenția starea de anomalie vibroacustică specifică stării de defect.

Astfel pentru validare luăm în discuție următoarele aspecte:

- a.** validarea metodei de analiză prin intermediul semnalelor brute furnizate de senzori;
- b.** validarea metodei de analiză prin intermediul semnalelor furnizate de senzori, procesate matematic;
- c.** validarea rezultatelor rutinei software de lucru în MatLab cu ajutorul unor dispozitive externe de uz general.

Am ales ca validarea să se realizeze prin apelarea la reprezentări grafice datorită ușurinței analizei atât ca rezultate individuale, dar și comparativ în diferite etape de măsurare și respectiv poziții de amplasare a senzorilor. Alegerea semnalului de accelerație a fost făcută pornind de la contribuția personală conform căreia volumele de tip deschis ale compartimentului motor sunt monitorizate mult mai fidel prin intermediul accelerometrelor.

a. Validarea prin intermediul valorilor brute se referă la analiza semnalelor de accelerație și presiune sonoră achiziționate în mod direct de senzori pe parcursul diferitelor etape de măsurare.

Dacă este să privim prin prisma măsurătorilor grosiere la o frecvență de eșantionare de 4 Hz, Tabelul 5.14 descrie validarea semnalelor captate de un accelerometru coroborat cu informațiile achiziționate prin intermediul aparatului de diagnoză dedicat, relevante din punct de vedere al anomaliei vibroacustice generate cu ajutorul acestuia. Practic se evidențiază în mod clar că vârfurile accelerației rezultante ajung până la aproximativ 6.8 m/s^2 atunci când este decuplată injecția la cilindrul numărul 2 – cazul III. În schimb la mers încet în gol ajung până la aproximativ 4.6 m/s^2 – cazul I, aspect confirmat și de valoarea de referință a accelerației pistoanelor – cazul IV, unde la cilindrul numărul 2 este cea mai mică, iar la restul cilindrilor variază în funcție de ordinea de aprindere astfel încât să se încerce uniformizarea mersului motorului cu ardere internă. Și astfel starea de defect, indusă cu aparatul de diagnoză, este sesizată evident de valorile furnizate de senzor ceea ce duce la validarea metodei noastre de analiză a zgomotelor și vibrațiilor, inclusiv prin analiza semnalelor la o frecvență de eșantionare 4 Hz.

Tabelul 5.14. Validarea prin studiu comparativ al accelerației rezultante a accelerometrului S3 la mers încet în gol și respectiv cu cilindrul 2 decuplat coroborat cu accelerația medie a pistoanelor

<p>I. Accelerometrul S3 montat lateral spate pe cutia de viteze, conform schemei 7 de amplasare. Achiziție de date în etapa 2 adică mers încet în gol – cu frecvență de eșantionare de 4 Hz</p>															
<p>II. Valorile medii ale accelerației pistoanelor atunci când motorul funcționează normal la mers încet în gol.</p> <p>Decuplarea cilindrului</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Porniți motorul cu ardere internă și lăsați să funcționeze la ralanti. ● Verde = Injecție ACTIVA ● Roșu = Injecțare OPRITĂ <p>1 2 3 4 5 6</p> <p>Toate valorile reale trebuie să fie aproximativ identice.</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Prin decuplarea unui cilindru scade valoarea de referință corespunzătoare. <table border="1"> <thead> <tr> <th>Nume</th> <th>Valoare reală</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Valoare de referință Cilindru1</td> <td>23m/s²</td> </tr> <tr> <td>Valoare de referință Cilindru2</td> <td>25m/s²</td> </tr> <tr> <td>Valoare de referință Cilindru3</td> <td>25m/s²</td> </tr> <tr> <td>Valoare de referință Cilindru4</td> <td>25m/s²</td> </tr> <tr> <td>Valoare de referință Cilindru5</td> <td>25m/s²</td> </tr> <tr> <td>Valoare de referință Cilindru6</td> <td>24m/s²</td> </tr> </tbody> </table>		Nume	Valoare reală	Valoare de referință Cilindru1	23m/s ²	Valoare de referință Cilindru2	25m/s ²	Valoare de referință Cilindru3	25m/s ²	Valoare de referință Cilindru4	25m/s ²	Valoare de referință Cilindru5	25m/s ²	Valoare de referință Cilindru6	24m/s ²
Nume	Valoare reală														
Valoare de referință Cilindru1	23m/s ²														
Valoare de referință Cilindru2	25m/s ²														
Valoare de referință Cilindru3	25m/s ²														
Valoare de referință Cilindru4	25m/s ²														
Valoare de referință Cilindru5	25m/s ²														
Valoare de referință Cilindru6	24m/s ²														
<p>III. Accelerometrul S3 montat lateral spate pe cutia de viteze, conform schemei 7 de amplasare. Achiziție de date în etapa 3.2 adică decuplarea / recuplarea injecției cilindrului numărul 1 în secvență de 30 de secunde – cu frecvență de eșantionare de 4 Hz</p>															

IV. Valorile medii ale accelerației pistoanelor atunci când este decuplată injecția la cilindrul numărul 2, citite cu aparatul de diagnoză dedicat.

Decuplarea cilindrului

- Porniți motorul cu ardere internă și lăsați să funcționeze la ralanti.
- Verde = Injecție ACTIVĂ
- Roșu = Injecție OPRITĂ

1

2

3

4

5

6

Toate valorile reale trebuie să fie aproximativ identice.

- Prin decuplarea unui cilindru scade valoarea de referință corespunzătoare.

Nume	Valoare reală
Valoare de referință Cilindru1	25m/s ²
Valoare de referință Cilindru2	12m/s ²
Valoare de referință Cilindru3	27m/s ²
Valoare de referință Cilindru4	27m/s ²
Valoare de referință Cilindru5	25m/s ²
Valoare de referință Cilindru6	21m/s ²



b. Validarea prin intermediul valorilor procesate matematic se referă la analiza semnalelor de accelerație achiziționate de senzori pe parcursul diferitelor etape de măsurare, suspuse procesării prin intermediul Transformatei Fourier Rapide (Fast Fourier Transform – FFT) și respectiv prin calculul densității spectrale.

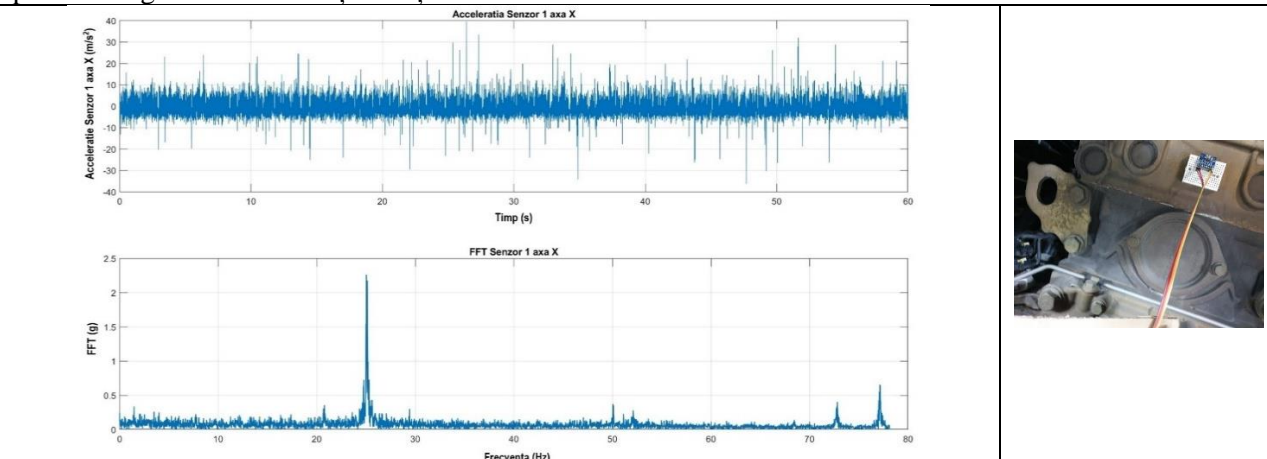
Dacă procesul de măsurare cu o frecvență de eșantionare de 4 Hz este util pentru a identifica vârfurile datorate anomaliilor vibroacustice, procesul de studiu cu frecvență de eșantionare de 200 Hz a semnalelor facilitează obținerea unor rezultate procesate Fourier care să evidențieze starea de anomalie vibroacustică precum și pentru identificarea și studiul frecvențelor dominante.

În Tabelul 5.15 este prezentată validarea comparativă prin analiza semnalelor de accelerație pe axa X pentru două accelerometre. Astfel cazul I.a prezintă semnalul accelerometrului ADXL345 în faza de mers încet în gol al motorului unde se manifestă o singură frecvență dominantă undeva la 25 Hz și respectiv cazul I.b ce corespunde semnalului înregistrat de același accelerometru dar în etapa de acționare a frânei de decompresie pe treapta I unde se observă apariția unei a doua frecvențe dominante undeva la 13 Hz aproximativ la același nivel de amplitudine cu cea de 25 Hz corespunzătoare funcționării la mers încet în gol. Cazul II.a se referă la semnalul accelerometrului MPU6050 unde se identifică aceeași frecvență dominantă de 25 Hz corespunzătoare funcționării motorului la mers încet în gol. Pe de altă parte cazul II.b descrie semnalul acestuia pentru funcționarea cu frâna de decompresie pe treapta I și se observă că, pe lângă frecvența datorată funcționării motorului la mers încet în gol de 25 Hz, apare cea de a doua frecvență dominantă tot la valoarea de 13 Hz sesizată de accelerometrul ADXL345 amplasat pe chiulasă. Singura diferență se înregistrează la nivel de amplitudine în sensul că frecvența datorată perturbației este sesizată de accelerometrul MPU6050 (amplasat pe cutia de viteze) la o valoare dublă față de cea, să spunem, normală a motorului de 25 Hz.

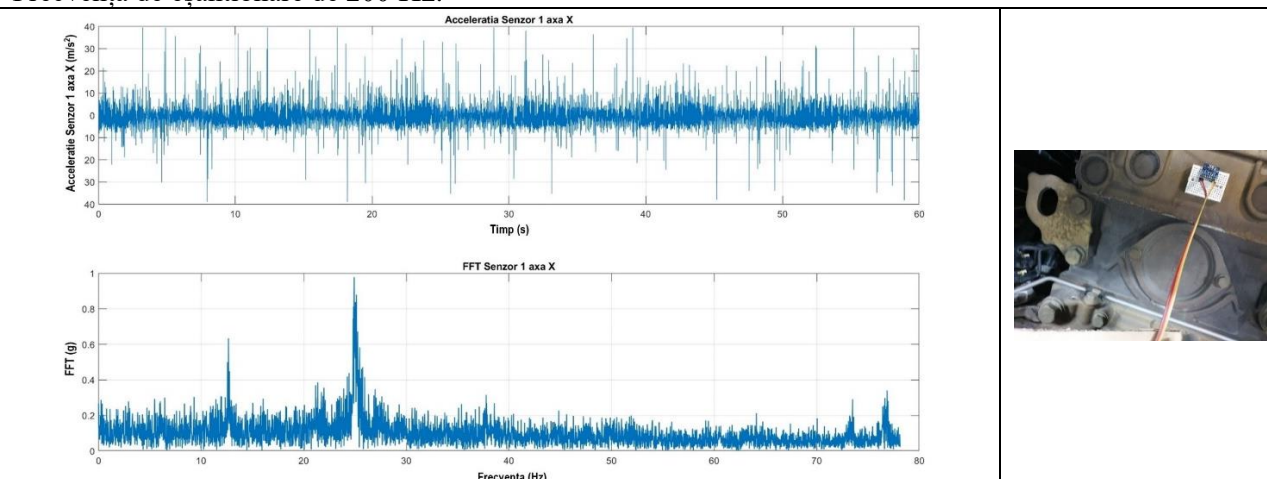
În afara validării, Tabelul 5.15 reliefează și influența mediului de transmitere a vibrațiilor (în acest caz transmiterea prin structură) asupra amplitudinii semnalului țintă.

Tabelul 5.15. Validarea prin studiu comparativ al semnalului de accelerație pe axa X supus prelucrării Fourier, înregistrat simultan de 2 accelerometre dar cu amplasare diferită

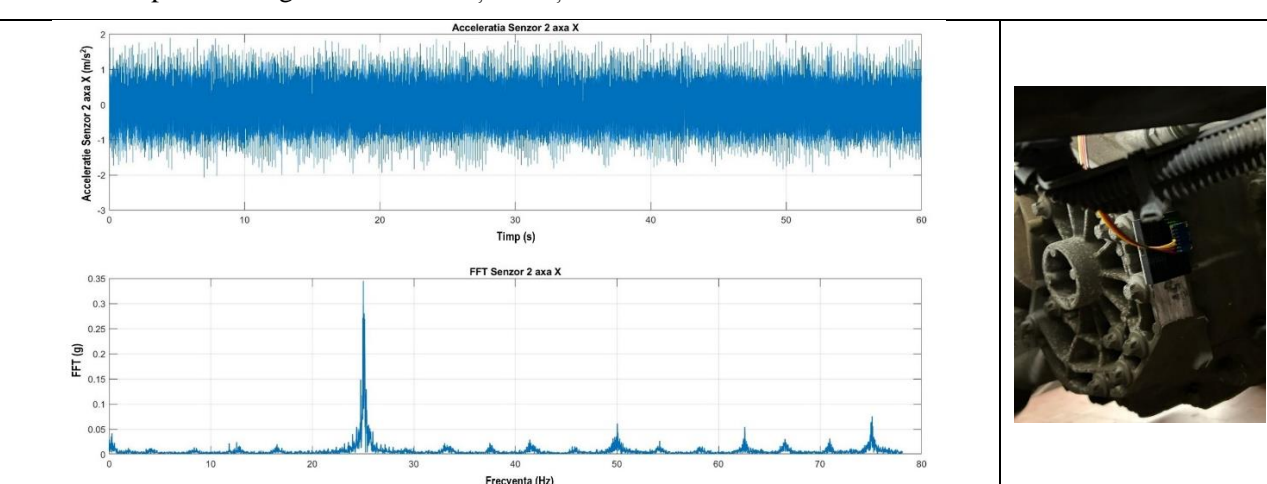
I.a Axa X - Accelerometrul ADXL345 montat în partea posterioară a chiulasei, conform schemei 10 de amplasare. Achiziție de date în etapa 2 de acționare, adică mers încet în gol cu secvență de 60 secunde pentru înregistrare. Frecvență de eșantionare de 200 Hz.



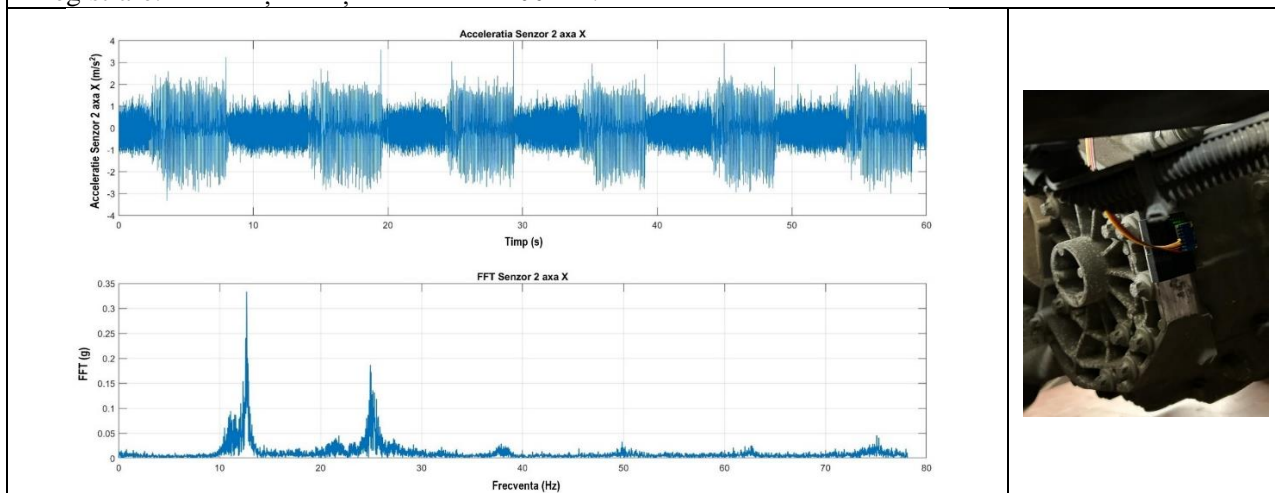
I.b Axa X - Accelerometrul ADXL345 montat în partea posterioară a chiulasei, conform schemei 10 de amplasare. Achiziție de date în etapa 6 de acționare, adică acționarea frânei de decompresie pe treapta I puțin adaptată, adică acționată în secvență de 10 de secunde și secvența de 60 secunde pentru înregistrare. Frecvență de eșantionare de 200 Hz.



II.a Axa X - Accelerometrul MPU6050 montat în partea posterioară a cutiei de viteze, conform schemei 10 de amplasare. Achiziție de date în etapa 2 de acționare, adică mers încet în gol cu secvență de 60 secunde pentru înregistrare. Frecvență de eșantionare de 200 Hz.



II.b Axa X - Accelerometrul MPU6050 montat în partea posterioară a cutiei de viteze, conform schemei 10 de amplasare. Achiziție de date în etapa 6 de acționare, adică acționarea frânei de decompresie pe treapta I puțin adaptată, adică acționată în secvență de 10 de secunde și secvența de 60 secunde pentru înregistrare. Frecvență de eșantionare de 200 Hz.

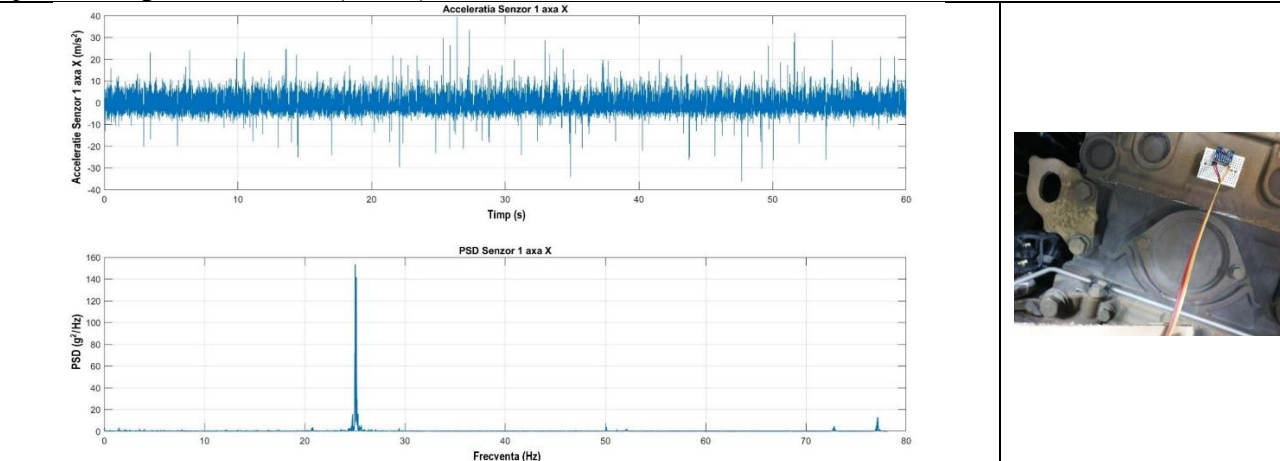


Metoda noastră de analiză a zgomotelor și vibrațiilor a fost extinsă prin analiza densității spectrale a semnalelor de accelerație, în primă fază, fapt datorat în principal măsurătorii cu o frecvență de eșantionare de 200 Hz și respectiv trecerii la o placă de achiziție de date cu capacități mărite comparativ cu cea utilizată inițial. Tabelul 5.16 vine să prezinte validarea metodei din punct de vedere al analizei densității spectrale ce oferă avantajul unei imagini mai clare asupra frecvențelor fundamentale ce se manifestă dominant. Asemenea celor prezentate în Tabelul 5.15 și în Tabelul 5.16, se regăesc cazurile I.a și II.a ce prezintă frecvența dominantă de 25 Hz corespunzătoare mersului încet în gol al motorului, respectiv cazurile I.b și II.b, unde în plus față de frecvența de 25 Hz apare cea de a doua de 13 Hz corespunzătoare etapei de acționare a frânei de decompresie pe treapta I. În schimb prin procesarea densității spectrale se disting mult mai clar aceste frecvențe dominante raportat la restul care au valori aproape de nivelul de zero și, de asemenea, se reliefează diferențele de sesizare ale celor două accelerometre, în sensul că cel amplasat pe cutia de viteze exemplifică foarte clar influența căii de transmitere a vibrațiilor prin frecvența dominantă de 13 Hz ce are o amplitudine de aproximativ cinci ori mai mare comparativ cu cea datorată funcționării motorului, raportat la senzorul amplasat pe chiulasă unde valorile de amplitudini se situează la niveluri similare.

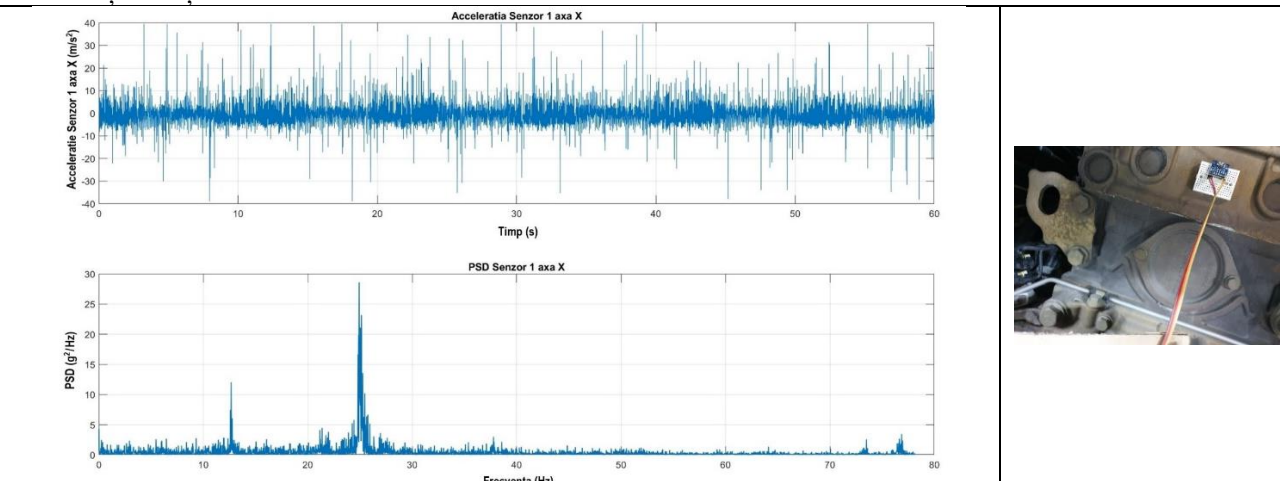
c. Validarea rezultatelor rutinei software în MatLab se referă de fapt la o evaluare integrală atât asupra corectitudinii senzorilor și plăcii de achiziție de date utilizate, dar și asupra secvențelor de analiză și procesare a semnalelor brute prin intermediul rutinei de lucru în MatLab. În acest sens am apelat la utilizarea a două telefoane mobile cu sistem de operare diferit ce permit instalarea unor aplicații software dedicate studiului zgomotelor și vibrațiilor.

Tabelul 5.16. Validarea prin studiu comparativ al semnalului de accelerație pe axele X,Y,Z supus analizei spectrale, înregistrat simultan de 2 accelerometre, dar cu amplasare diferită

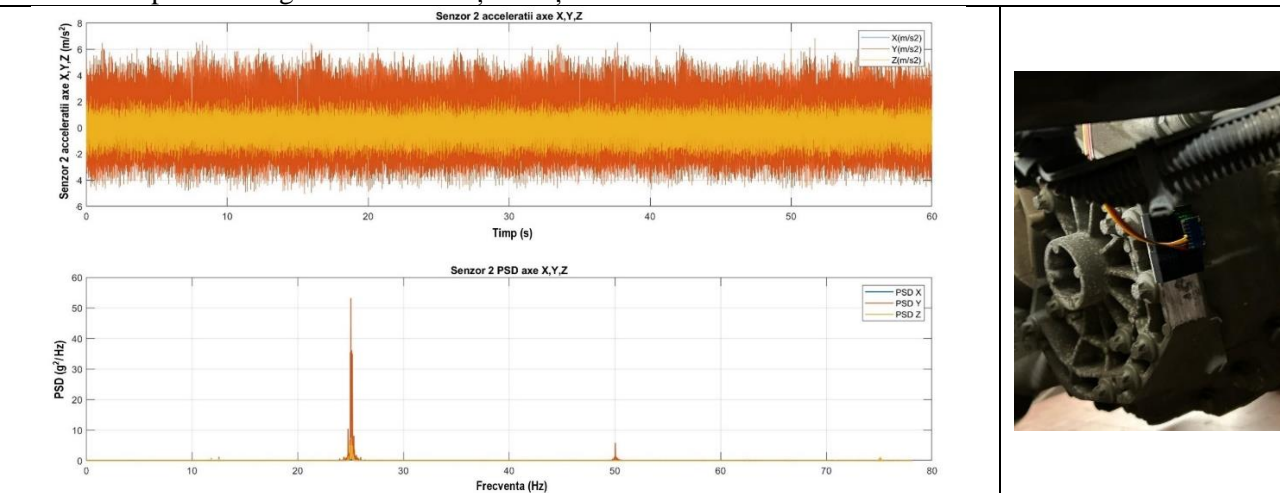
I.a Axa X - Accelerometrul ADXL345 montat în partea posterioară a chiulasei, conform schemei 10 de amplasare. Achiziție de date în etapa 2 de acționare, adică mers încet în gol cu secvență de 60 secunde pentru înregistrare. Frecvență de eșantionare de 200 Hz.



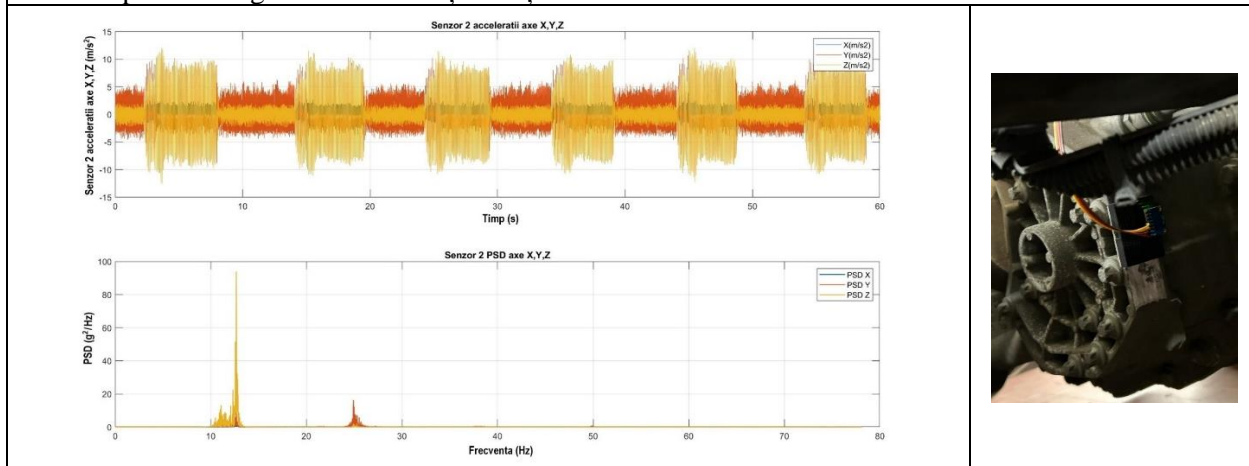
I.b Axa X - Accelerometrul ADXL345 montat în partea posterioară a chiulasei, conform schemei 10 de amplasare. Achiziție de date în etapa 6 de acționare, adică acționarea frânei de decompresie pe treapta I puțin adaptată, adică acționată în secvență de 10 de secunde și secvența de 60 secunde pentru înregistrare. Frecvență de eșantionare de 200 Hz.



II.a Axa X,Y,Z - Accelerometrul MPU6050 montat în partea posterioară a cutiei de viteze, conform schemei 10 de amplasare. Achiziție de date în etapa 2 de acționare, adică mers încet în gol cu secvență de 60 secunde pentru înregistrare. Frecvență de eșantionare de 200 Hz.



II.b Axa X,Y,Z - Accelerometrul MPU6050 montat în partea posterioară a cutiei de viteze, conform schemei 10 de amplasare. Achiziție de date în etapa 6 de acționare, adică acționarea frânei de decompresie pe treapta I puțin adaptată, adică acționată în secvență de 10 de secunde și secvența de 60 secunde pentru înregistrare. Frecvență de eșantionare de 200 Hz.



O validare alternativă am decis să o realizez prin compararea semnalului de accelerație înregistrat de un accelerometru cu cel înregistrat de telefoanele prevăzute cu accelerometru intern, prin intermediul unor aplicații corespunzătoare ce sunt disponibile pentru pasionații în domeniu. Pentru aceasta am amplasat în aceeași zonă pe autovehicul două modele diferite de telefoane mobile și cu aplicații diferite de înregistrare, împreună cu un senzor ADXL345 al cărui semnal este achiziționat cu frecvență de eșantionare de 200 Hz, asemănătoare celei oferite de aplicațiile telefoanelor mobile de test. Semnalul accelerometrului ADXL345 a fost supus atât transformării Fourier, cât și analizei spectrale. Figura 5.7 prezintă amplasarea celor trei componente în consola stânga spate a șasiului autocamionului. Poziția stânga spate corespunde schemei 9 și am ales-o atât din punct de vedere al ușurinței amplasării acestora, cât și pentru a studia dintr-o poziție nefolosită până acum în cadrul măsurătorilor.



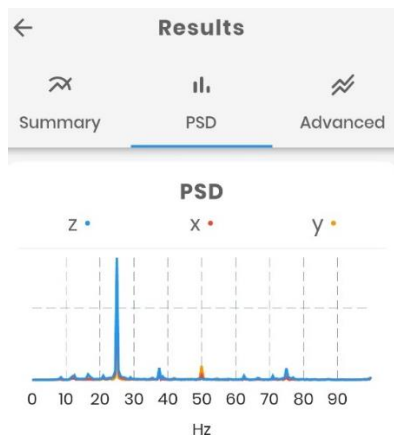
Figura 5.7. Poziția de amplasare a accelerometrului ADXL345 și a terminalelor mobile iPhone 7 și Samsung Galaxy S10

Rezultatele din Tabelul 5.17, care confirmă validarea, au fost procesate atât cu transformata Fourier, cât și cu prelucrarea puterii densității spectrale și corespund unei înregistrări conform etapei 2, adică motorul funcționa la mers încet în gol. Astfel se observă că din punct de vedere al semnalului procesat prin intermediul transformatei Fourier prezentat în cazurile I și II se regăsește frecvența fundamentală de 25 Hz, dar și în semnalul procesat prin intermediul puterii densității spectrale. De asemenea, se regăsește frecvența fundamentală de 25 Hz corespunzătoare funcționării normale a motorului la mers încet în gol, prezentate în cazurile III și IV.

Tabelul 5.17. Validarea prin intermediul celor două telefoane mobile și a aplicațiilor de analiză a semnalului de vibrație

<p>I. Accelerometrul ADXL, achiziție de date în etapa 2, adică mers încet în gol – cu frecvență de eșantionare de 200 Hz</p>	
	<p>– transformata Fourier a semnalului de accelerație pe axa X</p>
<p>II. Accelerometrul iPhone 7, achiziție de date în etapa 2, adică mers încet în gol – cu măsurare la 99.2 Hz</p>	
	<p>– transformata Fourier a semnalului de accelerație pe axa X</p>
<p>III. Accelerometrul ADXL, achiziție de date în etapa 2, adică mers încet în gol – cu frecvență de eșantionare de 200 Hz</p>	
	<p>– puterea densității spectrale pentru semnalul de accelerație pe axele XYZ</p>

IV. Accelerometrul Samsung Galaxy S10, achiziție de date în etapa 2, adică mers încet în gol – cu măsurare la 100 Hz



– puterea densității spectrale pentru semnalul de accelerație pe axele XYZ, cu mențiunea că axa Z a Samsung Galaxy S10 corespunde axei X a accelerometrului – amplasarea aceasta fiind dictată de poziția disponibilă pe șasiul autocamionului

5.5 Concluzii

Latura experimentală a studiului privind analiza și diagnosticarea zgomotelor și vibrațiilor autovehiculului a dus la accentuarea unor concluzii ce au fost stabilite în cadrul părții teoretice, cum ar fi nevoia stabilirii eficiente a unei matrice de senzori optim amplasați pe autovehicul și ale căror semnale trebuie procesate utilizând modele matematice relevante, dar a evidențiat noi provocări, cum ar fi utilizarea inteligentă a senzorilor cu referire la proporția corectă între accelerometre și microfoane sau necesitatea realizării măsurătorilor atât la o frecvență de eșantionare de 4 Hz pentru a putea evidenția vârfurile de accelerație, dar în același timp măsurătorile realizate cu o frecvență de eșantionare de 200 Hz permit o procesare Fourier sau cu densitate spectrală pentru identificarea frecvențelor dominante caracteristice stării de perturbație vibroacustică (sau, mai exact, de defect indus în cadrul studiului). De asemenea, ar mai fi de precizat că toate prelucrările s-au realizat cu transformata rapidă Fourier, Fast Fourier Transform denumită în literatura de specialitate.

În cadrul tuturor măsurătorilor contribuția personală conform căreia compartimentul motor al autovehiculelor poate fi de tip *volum deschis* sau respectiv *volum închis* din punct de vedere vibroacustic a permis adaptarea matricei de senzori și a amplasării acestora astfel încât să se obțină rezultate ale măsurătorilor cât mai utile și relevante din punct de vedere al metodei noastre de analiză.

Etapele procesului de achiziție de date descrise în subcapitolul 4.4.2 au scos în evidență următoarele:

- Acționarea în mod continuu a diferitelor componente generatoare de zgomote și vibrații, în scopul de a induce perturbații vibroacustice controlate, este utilă inclusiv pentru analiza comparativă a semnalelor diferiților senzori fixați în zone având suprafețe cu caracteristici vibroacustice variate (reflective / absorbitive / difuzive) pentru a se stabili poziția optimă de amplasare a senzorilor corect selectați;

- Acționarea alternativă a diferitelor componente generatoare de zgomote și vibrații scoate în evidență vârfurile succesive generate la intervale regulate, astfel încât acestea să se regăsească în semnalele prelucrate, fiind extrem de utilă în modelarea rutinelor de lucru în MatLab.

Un aspect important, care a fost dovedit, a constat în validarea informațiilor extrase cu instrumente de lucru exterioare procedurii de lucru, în cazul nostru valorile accelerației pistoanelor corespunzătoare atât cilindrilor cu injecția de carburant decuplată, cât și a celor funcționali. Se observă cum cilindrii funcționali au tendința de a compensa dezechilibrul datorat celorlalți. Astfel ne ajută și pe noi să interpretăm mai amănunțit apariția vârfurilor de semnal care se datorează atât perturbației funcționale efective, cât și tendințelor de compensare funcțională a lor.

Tot din punct de vedere al validării rezultatelor, evaluarea rezultatelor procesate Fourier și cu puterea densității spectrale au confirmat corectitudinea atât a ipotezelor teoretice, dar și a procesului de programare a rutinei de lucru în MatLab pentru ambele variante de măsurători și anume la 4 Hz și, respectiv, 200 Hz frecvență de eșantionare corespunzătoare unei frecvențe de 78 Hz a semnalului măsurat. Frecvența uzuală în cadrul studiilor de specialitate este de 20 Hz până la 51 Hz în domeniul autovehiculelor, respectiv 100 Hz în domeniul medical. Apelarea și la măsurătorile cu frecvență de 78 Hz a permis validarea rezultatelor prin analiza comparativă cu măsurătorile executate cu cele două telefoane mobile ce au încorporate accelerometre din clasa celor folosite de noi în cadrul studiului nostru și au rată de măsurare de 100 Hz. Mai în detaliu modelul iPhone 7 are încorporat un accelerometru MPU6900 conform referinței (<https://moviparts.com>), iar modelul Samsung Galaxy S10 are încorporat un accelerometru MPU92/65 conform referinței (Sampaio et al., 2022).

CAPITOLUL 6. CONCLUZII FINALE, CONTRIBUȚII PERSONALE ȘI DIRECȚII DE CERCETARE ULTERIOARĂ

Analizând toate ipotezele prezentate în această lucrare la nivel teoretic, ipoteze ce au fost confirmate și validate prin măsurători practice, precedate de procesarea semnalelor prin intermediul modelelor matematice, putem afirma că metoda propusă de noi pentru analiza zgomotelor și vibrațiilor autovehiculului, cu posibilitatea de evidențiere a stării de defect, este o metodă neinvazivă eficientă ce se pretează a fi dezvoltată atât în ideea de a crea bazele unei biblioteci de date vibroacustice caracteristice diferitelor stări de defect reprezentative unei game variate de autovehicule, dar și pentru a rafina matricea de senzori coroborat cu amplasarea acestora.

Pentru a sintetiza, metoda presupune următoarele aspecte:

- Selectarea modelelor matematice pe baza cărora să se realizeze procesarea și analiza semnalelor vibroacustice de interes;
- Definirea matricei de senzori - accelerometre și microfoane - cu ponderea corespunzătoare tipului de volum vibroacustic studiat;
- Elaborarea și optimizarea rutinelor de lucru în mediul de programare selectat pentru achiziția și procesarea semnalelor vibroacustice de interes;
- Realizarea de măsurători experimentale în diferite regimuri de exploatare, atât în stare de bună funcționare, cât și în stare de defect generat în mod controlat (ai cărui parametri să fie cunoscuți);
- Stabilirea unei baze de date cu parametrii vibroacustici atât pentru starea de bună funcționare, cât și pentru cea de defect. Stabilirea valorilor de prag - amplitudini și frecvențe - aferente manifestării stării de defect;
- Definirea algoritmilor pentru detecția sursei de anomalie vibroacustică aferentă stării de defect a autovehiculului.

Din punct de vedere al contribuțiilor personale, aspectul cel mai important constă în cercetarea și dezvoltarea metodei noastre, noi și inovative, de analiză și evaluare a zgomotelor și vibrațiilor autovehiculului, realizată prin intermediul unui sistem de monitorizare, care să fie capabil să semnaleze starea de defect a diferitelor componente. În mod explicit, metoda noastră se axează pe următoarele puncte principale:

- Achiziția, procesarea și analiza semnalelor brute vectoriale furnizate de accelerometre, pe toate cele trei axe ale sistemului cartezian, precum și de cel corespunzător accelerației rezultante;
- Prelucrarea cu modele matematice a semnalelor brute furnizate de accelerometre astfel încât să se poată genera o bază de date în care sunt incluse frecvențele dominante caracteristice atât stării de bună funcționare, cât și cele ce se manifestă dominant odată cu apariția stării de defect. Aici este de menționat faptul că cel mai propice model matematic este cel corespunzător seriilor Fourier, transpus tehnic în transformata rapidă

Fourier (FFT = Fast Fourier Transform), ce asigură stabilirea gamei de frecvențe caracteristice, utilizată în cadrul analizei comparative pentru semnalarea stării de defect;

- Achiziția, procesarea și analiza semnalelor brute vectoriale de presiune sonoră furnizate de microfoane;
- Similar prelucrării matematice a semnalului de accelerație și în cazul microfoanelor am apelat tot la transformata Fourier rapidă pentru a stabili intervalul de frecvențe caracteristice atât stării de bună funcționare, cât și al celei de defect;
- Pe baza analizei informațiilor achiziționate experimental, am putut defini valori de prag corespunzătoare stării de defect, atât pentru semnalele vectoriale brute de accelerație, cât și pentru cele vectoriale de presiune sonoră, care să permită atât evidențierea stării de defect, cât și identificarea zonei unde se manifestă defectul, în scopul detecției sursei acestuia.

O altă valență a contribuțiilor personale se remarcă din punct de vedere al procesului de lucru, constând în identificarea din punct de vedere al studiului vibroacustic a celor două volume de tip *deschis* și, respectiv, *închis* ale compartimentului motor, lucru ce a jucat un rol hotărâtor atât în stabilirea matricei de senzori cu ponderea corectă raportată la senzorii utilizați: accelerometre și microfoane, precum și la amplasarea acestora în corelație cu zone de expunere reflectivă / absorbitive / difuzive. Aici este de menționat că nu am găsit nicio referire la această clasificare în urma studiului atent al literaturii de specialitate în domeniu, lucru ce m-a făcut să tratez acest subiect ca pe o contribuție / descoperire personală.

O altă contribuție personală este dezvoltarea rutinei de lucru în MatLab ce permite achiziția de date și procesarea semnalelor corespunzătoare unei frecvențe de eșantionare de 4 Hz, proces pe care l-am definit ca achiziție grosieră de date. Acest mod de lucru permite analiza facilă cu identificare, pe baza reprezentărilor grafice, a vârfurilor de accelerație caracteristice stării de defect indusă prin intermediul aparatului de diagnoză dedicat. De menționat că în literatura de specialitate sunt prezentate studii cu frecvențe ale semnalelor măsurate de 20 Hz până 51 Hz pentru autovehicule, respectiv 100 Hz pentru domeniul medical, aspect pe care l-am inclus, de asemenea, în studiul nostru, în cadrul măsurătorilor cu frecvență de eșantionare de 200 Hz ce corespunde unei frecvențe de 78 Hz a semnalului măsurat, atunci când am urmărit identificarea frecvențelor dominante, precum și validarea metodei de lucru cu dispozitive externe.

Utilizarea accelerometrelor capabile să măsoare pe toate cele trei axe XYZ ale sistemului cartezian, și-a dovedit eficiența în cadrul laturii practice, deoarece a permis studiul propagării complexe în spațiu, a perturbațiilor vibroacustice, regăsită apoi în amplasarea eficace a acestora în raport cu sursa țintă ce trebuia studiată.

În acest stadiu al studiului nostru vibroacustic la un autovehicul cu compartiment motor de tip *volum deschis*, punerea accentului pe analiza semnalelor furnizate de accelerometre ajută la evitarea vicierii măsurătorilor datorate influențelor factorilor perturbatori vibroacustici prezenți în mediul ambiant de lucru (cum ar fi zgomote și vibrații generate de agregate auxiliare amplasate atât pe șasiul autovehiculului trăgător, dar și la remorcă sau semiremorcă). Pe de altă parte influența acestor factori de mediu se poate cumula și duce la situații temporare de rezonanță ce pot indica un defect fals (cum ar fi zgomotele și vibrațiile datorate rulajului cu

anvelope de iarnă în condiții de temperatură ridicată pe un carosabil cu asfalt foarte rugos). De aici se poate diferenția starea de defect fals de cea reală printr-o judicioasă stabilire a matricei de senzori și a amplasării acestora în funcție de caracteristicile specifice clasei de autovehicul studiat.

În ceea ce privește etapele ulterioare de dezvoltare a metodei de analiză a zgomotelor și vibrațiilor, ar fi de menționat următoarele aspecte:

- Extinderea matricei de senzori cu accelerometre capabile a fi integrate, prin intermediul ID-ului specific, într-o schemă de măsurare la frecvență de eșantionare de 200 Hz în rutina de lucru în MatLab, dezvoltată pentru placa de achiziție de date Arduino DUE. De asemenea, ar fi interesant de realizat, pentru faza de cercetare avansată, o analiză a influenței factorilor de mediu asupra măsurătorilor vibroacustice prin utilizarea de accelerometre capabile să monitorizeze girația și temperatura exterioară;
- Realizarea de măsurători la o frecvență de eșantionare de 200 Hz cu scheme de amplasare care să includă minim 4 accelerometre și dezvoltarea rutinei MatLab pentru procesare Fourier (FFT), Wavelet și a puterii densității spectrale (PSD);
- Extinderea matricei de senzori cu microfoane care să asigure dezvoltarea rutinei MatLab pentru optimizarea procesării Fourier (FFT), Wavelet și a puterii densității spectrale (PSD) a semnalelor înregistrate în cadrul unei scheme multiple de senzori amplasați eficace, raportat la sursa țintă de zgomot studiată;
- Dezvoltarea rutinelor de lucru în MatLab pentru a putea evidenția depășirea valorilor de prag atât pentru vectorul rezultat, cât și pentru componentele de axe XYZ ale accelerometrelor, în scopul de facilita detecția cât mai precisă a zonei de evoluție a perturbației vibroacustice;
- Dezvoltare de algoritmi de comparare a amplitudinii informațiilor vibroacustice înregistrate în cadrul funcționării normale cu cele corespunzătoare unor anomalii vibroacustice caracteristice stării de defect, cu scopul de identifica frecvențele dominante ce se manifestă doar în stare de defect;
- Dezvoltarea rutinei de lucru în MatLab pentru a face triangulație complexă cu ajutorul semnalelor înregistrate de accelerometre și microfoane, în momentul de apariție a semnalului caracteristic stării de anomalie vibroacustică specifică stării de defect;
- Dezvoltarea rutinei de lucru în MatLab pentru a măsura, în scop de identificare și clasificare pe componente, defecte ale frecvențelor dominante caracteristice, pentru crearea unei biblioteci de amprente vibroacustice specifice stării de defect a principalelor surse de zgomote și vibrații de pe autovehicul;
- Extinderea măsurătorilor pe diverse clase de autovehicule atât cu compartiment motor de tip deschis, cât și închis, în scopul îmbogățirii bazei de date vibroacustice caracteristice atât stării de defect, cât și celei de funcționare normală.

Pentru a putea pune în aplicare direcțiile de cercetare enunțate aici va fi nevoie extinderea măsurătorilor la nivel de dinamic prin monitorizarea autovehiculului în timpul deplasării în condiții normale de trafic. Aici intervine un aspect nou ce constă în necesitatea de realizare de defecte cu caracter permanent asupra sistemelor și agregatelor principale supuse analizei. Aceste defecte vor fi create în condiții stricte de cunoaștere a parametrilor caracteristici (de

exemplu, o pompă de ulei defectă cu cuzineți cu grad de uzură determinat) astfel încât să se poată determina în mod concret frecvențele caracteristice dominante și valorile de prag ale amplitudinii acestora care pot constitui elemente declanșatoare pentru evidențierea stării de defect. Dacă este să privim obiectiv, această fază de implementare a defectelor transformă temporar metoda noastră de analiză într-o variantă de tip invaziv cu scopul de realiza baza de date specifică amprentei vibroacustice a agregatelor supuse stării de defect.

BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ

- Aguiar-Conraria, L.; Soares, M. J. (2011). The Continuous Wavelet Transform: A Primer. *NIPE Working Paper*, 16 (2011), p. 9, <https://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/12398>, accesat în 02.05.2023
- Akansu, A. N., & Haddad, R. A. (2001). Wavelet Transform, *Multiresolution Signal Decomposition (Second Edition)*, Academic Press, SUA, ISBN 0-12-047141-8, p. 338, https://books.google.ro/books?redir_esc=y&id=FokiyS75DDwC&q=wavelet#v=snippet&q=wavelet&f=false, accesat în 07.04.2023
- Anton, G-P; Petcu, I; Sorel, F. (2011). NVH test-calculation correlation of an engine in the automotive industry. *Scientific Bulletin. Automotive series*, year XVII, No. 21 (2). University of Pitesti, Faculty of Mechanics and Technology, p. 18, https://automotive.upit.ro/index_files/2011/2011_B_2_.pdf, accesat în 03.06.2023
- Bearing Point – Management & Technology Consultant. (2009). Global Automotive Warranty Survey Report, *BearingPoint GmbH*, p. 17, https://www.bearingpoint.com/files/AutoWarrantyReport_final_web.pdf, accesat în 04.06.2023
- Bogdan M. (2018). Comparison between a low cost Arduino traffic light and one done with NI USB 6008 DAQ device, *Nonconventional Technologies Review, Romania, Vol. 22(2)*, p. 3, <https://revtn.ro/legacy/pdf2-2018/L1.pdf>, accesat în 02.07.2023
- Bosch - Engine management. (2016). Knock sensor, *Robert Bosch GmbH*, p. 2, <https://www.bosch-mobility-solutions.com/en/solutions/sensors/knock-sensor>, accesat în 03.04.2023
- Bruel & Kjaer. (1982). Measuring Vibration, *hbkworld.com, Revision September 1982*, p. 16, <https://www.bksv.com/media/doc/br0094.pdf>, accesat în 06.07.2023
- Burdzik, R., & Dolecek R. (2012). Research of Vibration Distributive in Vehicle Constructive, *Perner`s Contacts*. 7, p. 16, <https://core.ac.uk/download/pdf/328170995.pdf>, accesat în 02.08.2023
- Butt, H. T.; Pancholi, M.; Musahl, M.; Sanchez, A. M.; Stricker, D. (2020). Development of High Rate Wearable MIMU Tracking System Robust to Magnetic Disturbances and Body Acceleration, *Intelligent Systems and Applications, Springer Nature Switzerland AG, ISBN 978-3-030-29516-5*, p. 1179, https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-29516-5_87, accesat în 07.07.2023
- Campbell, C. (2009). Vibration Analysis of Heavy-Duty Diesel Vehicles, *Masters Thesis, University of Tennessee, Knoxville*, p. 4, https://trace.tennessee.edu/utk_gradthes/, accesat în 06.05.2023
- Cotté, B. (2020). AE-01: Acoustic Propagation in Inhomogeneous Moving Media, *Course Notes 2019-2020, ENSTA – Université Paris-Saclay*, pp. 5-13, https://perso.ensta-paris.fr/~cotte/files/Course_notes_propa_2019.pdf, accesat în 14.03.2023
- De Roo, F.; Dittrich, M.G.; van Beek, P.J.G.; Bosschaart, C.; Derksen, G.B.; de Kievit, M. (2011). TNO Report, VENOLIVA – Vehicle Noise Limit Value – Comparison of two

- noise emission test method, Final report, *TNO Science and Industry, Netherland, Document GRB-54-01*, p. 4, p. 55, p. 65, p. 90,
<https://unece.org/DAM/trans/doc/2011/wp29grb/ECE-TRANS-WP29-GRB-54-inf01e.pdf>,
accesat în 04.06.2023
- Delvechio, S.; Bonfiglio, P.; Pompoli, F. (2018). Vibro-acoustic condition monitoring of Internal Combustion Engines: A critical review of existing techniques, *Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 99*, p. 668,
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S088832701730345X>, accesat în 03.06.2023
- Deulgaonkar, V.R.; Kallurkar, S.P.; Mattani, A.G. (2020). Review and Diagnostics of noise and vibrations in automobiles, *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER), Vol.1, Issue 2, pp. 242-246, ISSN: 2249-6645*, p. 2, p. 3
- Drăgan, B. (2003). Controlul vibrațiilor și zgomotului, *Editura Gheorghe Asachi, Iași, ISBN 973-621-057-X*, p.98, p.100
- European Automobile Manufacturers Association. (2012). Vehicle Noise – Setting the right sound levels, p. 10, https://www.acea.auto/files/Sound_Levels_of_Motor_Vehicles.pdf,
accesat în 09.05.2023
- Festa, M.; Stalter, F.; Tavornmas, A.; Gauterin, F. (2021). Human Response to Vehicle Vibrations and Acoustics During Transient Road Excitations, *Publisher MDPI, 4(2)*, p. 357, <https://doi.org/10.3390/vibration4020023>, accesat în 09.07.2023
- Firoozabadi, A.D.; Irarrazaval, P.; Adasme, P.; Zbala-Blanco, D.; Jativa, P.P.; Azurdia-Meza, C. (2022). 3D Multiple Sound Source Localization by Proposed T-Shaped Circular Distributed Microphone Arrays in Combination with GEVD and Adaptive GCC-PHAT/ML Algorithms, *Sensors 22(3):1011, MDPI*, p. 4,
<https://doi.org/10.3390/s22031011>, accesat în 10.09.2023
- Giurgiutiu, V.; Cuc, A.; Goodman, P. (2001). Review of Vibration-Based Helicopters Health and Usage Monitoring Methods, *University of South Carolina, Department of Mechanical engineering, Columbia, SUA*, p. 70, <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADP013516.pdf>,
accesat în 22.06.2023
- Gonzales, A.; Olazagoitia, J. L.; Vinolas, J. (2018). A Low-Cost Data Acquisition System for Automobile Dynamics Applications, *Sensors 18(2):366, MDPI*, p. 3,
<https://doi.org/10.3390/s18020366>, accesat în 18.04.2023
- Hamdi, A. (2008). Exploration en conception mécanique préliminaire des compromis entre contraintes architecturales véhicule et performances vibro-acoustiques agrégées, *Sciences de l'ingénieur Ecole Centrale Paris, Français*, p. 44, <https://theses.hal.science/tel-00376079>, accesat în 19.06.2023
- Harrison, M. (2004). Vehicle Refinement – Controlling Noise and Vibration in Road Vehicles, *Elsevier Butterworth-Heinemann, Oxford, ISBN 9780080474755*, p. 10,
<https://shop.elsevier.com/books/vehicle-refinement/harrison/978-0-7506-6129-4>, accesat în 24.05.2023

- Hartmann, W. M., & Candy, J. V. (2014). *Acoustic Signal Processing, Springer Handbook of Acoustics, Standford Univeristy, USA, ISBN 978-1-4939-0755-7*, p. 550, <https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4939-0755-7>, accesat în 28.06.2023
- Hawley, D. (2021). What is a Car Diagnostic Test, *J.D. Power*, <https://www.jdpower.com/cars/shopping-guides/what-is-a-car-diagnostic-test>, accesat în 24.06.2023
- Holm, S. (2024). Acoustic wave equations and four ways media may perturb the speed of sound, *Department of Physiscs, University of Oslo, Norway*, p. 1, <https://www.mn.uio.no/fysikk/english/people/aca/sverre/lecturenotes/waveequations-4speedsound.pdf>, accesat în 07.06.2023
- Hou, J.; Zeng, L.; Zhao, D.; Zhong, Y. (2022). A review for the noise source dintification methodes based microphone array, *Journal of Vibroengineering, Kauns, Lithuania, Vol. 24(5)*, p. 984, <https://doi.org/10.21595/jve.2022.22362>, accesat în 02.04.2023
- Hua, X.; Thomas, A.; Shultis, K. (2021). Recent progress in battery electric vehicle noise, vibration, and harshness. *Science Progress*. 2021;104(1), p. 6, <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/00368504211005224>, accesat în 15.10.2023
- Irrgang, St. (2017). In-situ Production Test of Car Audio Systems, *AES 2017 International Conference on Automotive Audio, KLIPPEL GmbH, Dresden, Germany*, p. 3, p. 5, p. 11, p. 15, https://www.aes.org/conferences/2017/automotive/downloads/Tutorial_EOL_in_situ.pdf, accesat în 14.04.2023
- Isermann, R. (2005). Model-based fault-detection and diagnosis – status and applications, *Annual Reviews in Control 29(1)*, p. 79, <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2004.12.002>, accesat în 22.05.2023
- Kittner, N.; Tsiropoulos, I.; Tarvydas, D.; Schmidt, O.; Staffel, I.; Kammen, D. M. (2020). Chapter 9 Electric vehicles – Technological Learning in Transition to a Low-Carbon Energy System, *Academic Press, ISBN 9780128187623*, p. 149, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818762-3.00009-1>, accesat în 22.07.2023
- Lai, Y-C.; Chang, C-C.; Tsai, C-M.; Huang, S-C.; Chaing, K-W. (2016). A Knowledge-Based Step Length Estimation Method Based on Fuzzy Logic and Multi-Sensor Fusion Algorithms for a Pedestrian Dead Reckoning System, *ISPRS Int. J. Geo-Inf. 2016, 5(5), 70, MDPI*, p. 4, <https://doi.org/10.3390/ijgi5050070>, accesat în 18.08.2023
- Lakis, A. A. (2007). Rotating Machinery Fault Diagnosis Using Time-Frequency Methods, *7th WSEAS International Conference on Electric Power Systems, High Voltages, Electric Machines, Venice, Italy*, p. 140, https://www.researchgate.net/publication/255666621_ROTATING_MACHINERY_FAULT_DIAGNOSIS_USING_TIME-FREQUENCY_METHODS, accesat în 25.06.2023
- Murphy, C. (2020). Choosing the Most Suitable Predictive Maintenance Sensor, *Analog Devices*, p. 2, p. 4, <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/tech-articles/choosing-the-most-suitable-predictive-maintenance-sensor.pdf>, accesat în 08.04.2023
- Nițu, N. A.; Caunii, V.; Bujoreanu, C. (2021a). Methods and techniques for vibroacoustic diagnostic of vehicles. *4th International Conference of the Doctoral School “Gheorghe*

- Asachi” Technical University of Iasi Romania, 2021, p. 3,*
http://www.csd2021.tuiasi.ro/docs/CSD2021_Book_of_Abstracts.pdf, accesat în 02.03.2023
- Nițu, N. A.; Caunii, V.; Bujoreanu, C. (2021b). Concept development of an independent electronic system for vibroacoustic diagnostics of vehicles. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 1235, The 25th Edition of IManEE 2021 International Conference (IMANEE 2021), 012037*, p. 7,
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1235/1/012037>, accesat în 19.06.2023
- Parlamentul European și Consiliul Uniunii Europene. (2018). Regulamentul (UE) 2018/858 privind omologarea și supravegherea pieței autovehiculelor și remorcilor acestora, precum și ale sistemelor, componentelor și unităților tehnice separate destinate vehiculelor respective, de modificare a Regulamentelor (CE) nr. 715/2007 și (CE) nr. 595/2009 și de abrogare a Directivei 2007/46/CE, *Jurnalul Oficial al Uniunii Europene L 151/1*, p. 14,
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/RO/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018R0858&from=EN/>, accesat în 10.08.2023
- Pierce, A. D. (2014). Basic Linear Acoustics, *Springer Handbook of Acoustics, Springer Handbook of Acoustics, Stanford University, USA, ISBN 978-1-4939-0755-7*, p. 49, p. 50, p. 69, p. 80, p. 93, <https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4939-0755-7>, accesat în 04.08.2023
- Płachno, L.; Oleksiak, M.; Kościelnik, D.; Jableka, M. (2012). I2C Interface Design for Hardware Master Devices, *IFAC Proceedings Volumes, Volume 45, Issue 7, ISSN 1474-6670, ISBN 9783902823212*, p. 164, <https://doi.org/10.3182/20120523-3-CZ-3015.00033>, accesat în 05.06.2023
- Produkt Service Woerth. (2003). Vibrations and noise on ACTROS, AXOR, ATEGO, ECONIC trucks, *DaimlerChrysler AG*, p. 5, p. 6, p. 7, p. 9
- Qin, Y.; Tang, X.; Jia, T.; Duan, Z.; Zhang, J.; Li, Y. (2020). Noise and vibration suppression in hybrid electric vehicles: State of the art and challenges, *Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 124, 109782, ISSN 1364-0321*, p. 3, p. 4,
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109782>, accesat în 09.07.2023
- Sampaio, L. F.; Koenig Veiga, L. A.; de Souza Oliveira Alves, S. (2022). Using Smartphones as a Measurement Platform in Geoscience Applications, *Universidade Federal do Rio de Janeiro, Anuário do Instituto de Geociências. 46. 10.11137/1982-3908_2023_46_56179*, p. 4,
https://www.researchgate.net/publication/372264506_Using_Smartphones_as_a_Measurement_Platform_in_Geoscience_Applications, accesat în 06.09.2023
- Santoyo-Ramon, J. A.; Casiliari, E.; Cano-Garcia, J. M. (2022). A study of the influence of the sensor sampling frequency on the performance of wearable fall detectors, *Measurement, Volume 193, 110945, ISSN 0263-2241*, p. 2,
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.110945>, accesat în 17.03.2023
- Schenkman, Bo. N.; Gidla, V. K. (2020). Detections, thresholds of human echolocation in static situation for distance, pitch, loudness and sharpness, *Applied Acoustics, Vol. 163, 107214, ISSN 0003-682X*, p. 1, <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107214>, accesat în 16.05.2023

- Shankar, N.V.S.; Ramana Venkata, V.S.N.; Sreenivasulu, P.; Vikas Sriram, K. (2022). IoT for Vibration measurement in engineering research, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 59, Part 3, ISSN 2214-7853, p. 2, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.380>, accesat în 04.03.2023
- Smith, W. A., & Randal, R. B. (2014). Regeneration of frequency response functions from poles and zeros: a discussion with implications for cepstrum-based operational modal analysis, *Internoise 2014 - 43rd International Congress on Noise Control Engineering: Improving the World Through Noise Control, Melbourne, Australia*, p. 2, https://www.researchgate.net/publication/282915611_Regeneration_of_frequency_response_functions_from_poles_and_zeros_A_discussion_with_implications_for_cepstrum-based_operational_modal_analysis, accesat în 15.03.2023
- Stosiak, M. (2011). Vibration insulation of hydraulic system control components, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, Vol. 11, Issue 1, ISSN 1644-9665, p. 245, [https://doi.org/10.1016/S1644-9665\(12\)60186-1](https://doi.org/10.1016/S1644-9665(12)60186-1), accesat în 16.03.2023
- Vardaxis, N. (2021). Sound in Buildings and Environment - 6. Sound propagation, *VTAF 01, Division of Engineering Acoustics, LTH, Lund University*, p. 20, p. 34, p. 39 https://www.akustik.lth.se/fileadmin/tekniskakustik/education/2021_VTAF01/NV6_Sound_Prop_23Apr2021_VTAF01.pdf, accesat în 24.06.2023
- Wang, X. (2010). *Vehicle noise measurement and analysis*, Woodhead Publishing Limited, ISBN 978-1-4398-3133-5, p. 14, p. 78, https://ftp.idu.ac.id/wp-content/uploads/ebook/tdg/ADVANCED%20ENGINE%20TECHNOLOGY%20AND%20PERFORMANCE/epdf.pub_vehicle-noise-and-vibration-refinement.pdf, accesat în 26.03.2023
- Watjanatepin, N. (2018). Data Monitoring System for Micro-Wind Turbine Experimental Set Based on LabVIEW, *International Journal of Engineering & Technology* 7 (3.7), p. 161, <https://www.sciencepubco.com/index.php/ijet/article/view/16262>, accesat în 15.06.2023
- Xin, Q. (2011). Noise and Vibration Harshness (NVH) in diesel engine system design, *Diesel Engine System Design*, Woodhead Publishing Limited, ISBN 978-0-85709-083-6, p. 808, https://ftp.idu.ac.id/wp-content/uploads/ebook/tdg/ADVANCED%20ENGINE%20TECHNOLOGY%20AND%20PERFORMANCE/epdf.pub_diesel-engine-system-design-woodhead-publishing-in.pdf, accesat în 19.03.2023
- Xu, X.; Han, Q.; Chu, F. (2018). Review of Electromagnetical Vibration in Electrical Machines, *Energies*, MDPI, 11(7):1779, p. 2, <https://doi.org/10.3390/en11071779>, accesat în 21.04.2023
- Young, S. (2014). Vehicle NVH Development Process and Technologies, *The 21st International Congress on Sound and Vibration, Beijing/ China*, p. 3, https://www.researchgate.net/profile/Akin-Oktav/post/How-does-clarify-the-root-cause-of-the-idle-boom-at-first-engine-order-at-30-Hz/attachment/59d65a4879197b80779af695/AS%3A545649943105536%401507104492196/download/full_paper_11_20140419005934398.pdf, accesat în 29.05.2023
- Zhang J., & Hoshino K. (2018). Molecular Sensors and Nanodevices, *Principles, Designs and Applications in Biomedical Engineering*, Elsevier Academic Press, ISBN 978-0-12-

814862-4, p. 142, <https://www.sciencedirect.com/book/9780128148624/molecular-sensors-and-nanodevices>, accesat în 14.05.2023

Zheng, X.; Luo, X.; Qiu, Y.; Hao, Z. (2020). Modeling and NVH Analysis of a Full Engine Dynamic Model with Valve Train System. *Publisher MDPI, Advances in Mechanical Systems Dynamics*, p. 14, <https://doi.org/10.3390/app10155145>, accesat în 10.02.2023

<https://www.analog.com>, accesat în 01.02.2023

<https://en.unesco.org/mediabank/25010/>, accesat în 02.02.2023

<https://group.mercedes-benz.com/company/tradition/founders-pioneers/bertha-benz.html>, accesat în 01.02.2023

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu>, accesat în 08.04.2023

<https://invensense.com>, accesat în 10.03.2023

<https://www.mathworks.com>, accesat în 14.06.2023

<https://www.mercedes-benz.com/en/classic/bertha-benz/>, accesat în 01.02.2023

<https://www.ni.com/ro-ro/shop/data-acquisition-and-control/what-are-c-series-sound-and-vibration-input-modules.html>, accesat în 18.04.2023

<https://polaridad.es>, accesat în 26.06.2023

<https://umdearborn.edu/cecs/graduate-programs/certificates/automotive-noise-vibration-harshness-nvh>, accesat în 15.05.2023

<https://vespermems.com/>, accesat în 06.05.2023

LISTA DE LUCRĂRI**a. Lucrări indexate in reviste WOS**

Alaci S, Musca I, Bujoreanu C, Romanu I-C, **Nițu N-A**, Ciornei F-C. (2023). The Effect of Dry Friction upon the Dynamics of a Short Eccentric Rotor: An Analytical and Experimental Study. *Lubricants*. 2023; 11(8):340. **IF = 3.5** <https://doi.org/10.3390/lubricants11080340>

b. Lucrări in baze de date BDI

Nițu, N.A., Machado, J., Bujoreanu, C. (2023). Considerations on the Proper Selection of Sensors for Vibroacoustic Study of the Vehicles. In: Doroftei, I., Nitulescu, M., Pisla, D., Lovasz, EC. (eds) Proceedings of SYROM 2022 & ROBOTICS 2022. IISSMM 2022. *Mechanisms and Machine Science*, vol 127. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-25655-4_12 (**SCOPUS**)

Nițu, N.A., Benchea, M., Ianuș, G., Bujoreanu, C. (2023). Noise Attenuation Analysis of a Multilayer Wall. In: Machado, J., *et al.* *Innovations in Mechanical Engineering II*. ICIENG 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-09382-1_5 (**SCOPUS**)

Nițu, N. A., Caunii, V., Bujoreanu, C. (2021). Concept development of an independent electronic system for vibroacoustic diagnostics of vehicles. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Volume 1235, The 25th Edition of IManEE 2021 International Conference IManEE 2021, 012037, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1235/1/012037> (**GOOGLE SCHOLAR**)

Nițu Nicolae-Adrian and Bujoreanu Carmen. (2022). Considerations on Classification of the Main Components of the Vehicles By their Vibroacoustic Fingerprint *Bulletin of the Polytechnic Institute of Iași. Machine constructions Section*, vol.68, no.2, pp.73-80. <https://doi.org/10.2478/bipcm-2022-0016> (**SCIENDO, GOOGLE SCHOLAR**)

Nițu, N. A., Caunii, V., Bujoreanu, C. (2021). Methods and techniques for vibroacoustic diagnostic of vehicles. *4th International Conference of the Doctoral School “Gheorghe Asachi” Technical University of Iasi, Romania*, http://www.csd2021.tuiasi.ro/Book_of_Abstracts.pdf

c. Cerere de brevet

Bujoreanu, C., Caunii, C., Caunii, V., **Nițu, N.A.**, Pașcaniu, C.M. (2021) Sistem electronic de diagnosticare a zgomotelor și vibrațiilor autovehiculelor. https://osim.ro/wp-content/uploads/Publicatii-OSIM/BOPI-Inventii/2021/bopi_inv_01_2021.pdf