

MINISTERUL EDUCAȚIEI
Universitatea Națională de Știință și Tehnologie
„POLITEHNICA” BUCUREȘTI
Școala Doctorală de Mecanică și Mecatronică

REZUMAT

TEZĂ DE DOCTORAT

**Contribuții privind analiza comportamentului
dinamic al vagoanelor destinate transportului
feroviar de marfă**

Autor: Ing. Gologan (Mihăilescu) Ioana-Maria

**Conducător științific :
Prof. univ. dr. ing. Gabriel POPA**

**BUCUREȘTI,
2023**

Acknowledgment

Rezultatele prezentate în această lucrare au fost finanțate de Ministerul Investițiilor și Proiectelor Europene prin Programul Operațional Sectorial Capital Uman 2014-2020, Contractul nr. 62461/03.06.2022, cod SMIS 153735

CUPRINS

Introducere	Importanța studierii comportării dinamice a unui vagon în curbă	5
PARTEA I. DOCUMENTARE, FUNDAMENTARE, DIRECȚII, OBIECTIVE ȘI METODE DE CERCETARE-DEZVOLTARE		
Cap.1.	Stadiul actual al cercetărilor privind calitatea de mers la materialul rulant	6
Cap.2.	Soluții constructive pentru îmbunătățirea performanțelor dinamice a vagoanelor de marfă	8
Cap.3.	Direcțiile, obiectivele și metodele de cercetare-dezvoltare ale tezei de doctorat	8
PARTEA II. PREZENTAREA VAGONULUI, A LINIEI DE CALE FERATĂ ȘI A SISTEMULUI DE MĂSURĂ		
Cap.4.	Prezentarea vagoanelor cisternă cu rezervor metalic, pentru transportul produselor lichide	10
Cap.5.	Centrul de Testări Feroviare Făurei	11
Cap.6.	Caracteristicile liniei de cale ferată pe care s-au efectuat determinările experimentale	12
Cap.7.	Sistemul de măsură și analiza performanțelor dinamice de rulare ale vagonului cisternă pe patru osii	14
	7.1. Descrierea aparatelor de măsură și montarea lor, generalități	14
	7.2. Aparatele de măsură, amplasarea și montarea lor	15
	7.3. Modulul de achiziție de date	15
	7.4. Amplasarea și montarea aparatelor de măsură	16
	7.5. Performanțe dinamice verificate experimental	17
PARTEA III. EFECTUAREA ÎNCERCĂRILOR, ÎNREGISTRAREA ȘI ANALIZA DATELOR MĂSURATE PE VAGON		
Cap.8.	Analiza datelor măsurate experimental de cele 6 accelerometre și interpretarea lor	18
	8.1. Diagramele datelor măsurate pentru studiul vibrațiilor la vagonul gol peste curba 1	20
	8.2. Diagramele datelor măsurate pentru studiul vibrațiilor la vagonul gol peste curba 2	22
	8.3. Diagramele datelor măsurate pentru studiul vibrațiilor la vagonul încărcat peste curba 1	24
	8.4. Diagramele datelor măsurate pentru studiul vibrațiilor la vagonul încărcat peste curba 2	27
Cap.9.	Analiza și compararea datelor măsurate experimental pe axa Y și axa Z	29
	9.1. Analiza și compararea vibrațiilor măsurate pe axa Y la trecerea peste curba 1	30
	9.2. Analiza și compararea vibrațiilor măsurate pe axa Z la trecerea peste curba 1	30
	9.3. Analiza și compararea vibrațiilor măsurate pe axa Y la trecerea peste curba 2	31
	9.4. Analiza și compararea vibrațiilor măsurate pe axa Z la trecerea peste curba 2	32
PARTEA IV. ANALIZA STATISTICĂ A DATELOR ÎNREGISTRATE PE VAGON		
Cap.10.	Analiza statistica - RMS rădăcina medie pătratică	33
	10.1. Prezentare generală a rădăcinii medie pătratice calculate	34
	10.2. RMS în cazul vibrațiilor	35

Cap.11.	Analiza valorilor calculate pentru RMS a vibrațiilor măsurate pe axa Y	37
	11.1. Analiza valorilor RMS la trecerea vagonului gol, peste curba 1	37
	11.2. Analiza valorilor RMS la trecerea, vagonului gol peste curba 2	40
	11.3. Analiza valorilor RMS la trecerea vagonului încărcat, peste curba 1	42
	11.4. Analiza valorilor RMS la trecerea, vagonului încărcat peste curba 2	44
Cap.12.	Analiza valorilor calculate pentru RMS a vibrațiilor măsurate pe axa Z	47
	12.1. Analiza valorilor RMS la trecerea vagonului gol, peste curba 1	47
	12.2. Analiza valorilor RMS la trecerea, vagonului gol peste curba 2	48
	12.3. Analiza valorilor RMS la trecerea vagonului încărcat, peste curba 1	49
	12.4. Analiza valorilor RMS la trecerea, vagonului încărcat peste curba 2	50
	 PARTEA V. SIMULAREA SI COMPARAREA DATELOR	 52
Cap.13.	Simularea teoretica a comportării vagonului și compararea datelor	52
	13.1. Simularea perturbațiilor transversale	52
	13.2. Simularea perturbațiilor verticale	53
Cap.14	Concluzii finale, contribuții originale și perspective de dezvoltare	53
	14.1. Concluzii generale	53
	14.2. Contribuții originale	54
	14.3. Perspective de dezvoltare ulterioară	58
	Bibliografie	67
	Anexa I Raport trasare Inel Mare Făurei	
	Anexa II Măsurătorile, datele integrale, la o trecere peste curba 1	
	Anexa III Calculul RMS pentru o trecere	

Introducere

Importanța studierii comportării dinamice a unui vagon în curbă

În timpul rulării, vehiculul feroviar este supus unui regim permanent de vibrații, cu efecte adverse asupra calității călătoriei, confortul călătoriei, integritatea mărfurilor și siguranța traficului [1]. Vibrațiile vehiculelor feroviare sunt cauzate în principal de abaterile geometrice ale căii prin neregularitățile suprafețelor de rulare ale roților și șinelor. Reflectarea integrată a deformațiilor substructurii căii, cea mai importantă excitație pentru interacțiunile vehicul-șină, neregulile căii arată o natură aleatorie în general și sunt considerate procese aleatorii staționare slabe. Pentru a expune mai bine caracteristicile statistice complete ale neregularităților aleatorii ale căii pe amplitudine și lungime de undă, este dezvoltat un model bazat pe transformarea timp-frecvență și teoria probabilității. Pentru a simula seturi de neregularități ale căii reprezentative și realiste s-a folosit combinarea metodelor de eșantionare aleatorii [2,3]. Mai mult, un model tridimensional (3-D) cuplat vehicul-șină este stabilit prin metoda elementelor finite și ecuații de echilibru dinamic, în care se ia în considerare neliniaritatea interacțiunii roată/șină. În cele din urmă, este introdusă o metodă de evoluție a densității probabilității, pentru a rezolva problemele de transmisie probabilistică dintre seturile de neregularități ale căii și răspunsurile dinamice ale sistemelor cuplate vehicul-șină. Există o demonstrație clară că rezultatele obținute prin metodele propuse sunt comparabile cu măsurătorile experimentale. [4]. Atenția se concentrează asupra mecanismului de excitare a modurilor de vibrație a caroseriei care are o influență puternică asupra confortului vehiculului. La început, problema este investigată printr-un model analitic simplu cu trei grade de libertate și este analizat fenomenul vitezelor critice. Subliniind modul în care atât vibrațiile caroseriei rigide, cât și cele flexibile pot fi excitate într-o măsură diferită, în funcție de viteza vehiculului și modul în care acestea se combină pentru a produce accelerațiile finale ale vagonului. Apoi, răspunsul dinamic al unui vehicul real care rulează pe o cale neregulată este simulat printr-un model multicorp mai detaliat, potrivit pentru reproducerea cantitativă a comportamentului său dinamic în intervalul de frecvență 0-25 Hz. Cele 68 de grade de libertate ale acestui model corespund celor 35 de moduri de vibrație rigide ale componentelor vehiculului (caroseria, cadrele boghiului și seturile de roți), plus cele 33 de moduri flexibile ale caroseriei care se încadrează în gama de frecvență de interes. În ultima parte a lucrării, rezultatele obținute experimental sunt comparate cu datele obținute teoretic prin simularea cu programul Mallab., arătând modul în care modelul numeric adoptat simulează cu acuratețe comportamentul dinamic al vehiculului real la diferite viteze, cu un acord foarte bun. [5-13].

Datorită construcției sale, calea de rulare prezintă în ansamblu, pe de o parte, multe abateri din forma geometrică ideală și, pe de altă parte, defecte ale suprafețelor de rulare ale șinelor. Acestea două de mai sus, alături de discontinuitățile constructive ale căii ferate, cauzează principalele valori ale vibrațiilor vehiculului feroviar [14-19].

Pe de altă parte, contactul nelinier roată/șină influențează nivelul vibrației în intervalul de frecvență medie și înaltă, în special și din acest motiv va fi studiat separat.

PARTEA I.

DOCUMENTARE, FUNDAMENTARE, DIRECȚII, OBIECTIVEȘI METODE DE CERCETARE-DEZVOLTARE

Capitolul 1

Stadiul actual al cercetărilor privind calitatea de mers la materialul rulant

Vibrațiile vehiculelor feroviare sunt cauzate în principal de abaterile geometrice ale căii și prin neregularitățile suprafețelor de rulare ale roților și șinelor. Fiind reflectarea integrată a deformațiilor substructurii căii și cea mai importantă excitație pentru interacțiunile vehicul-șină, neregulile căii arată o natură aleatorie în general, sunt considerate procese aleatorii staționare slabe. Pentru a expune mai bine caracteristicile statistice complete ale neregularităților aleatorii ale căii pe amplitudine și lungime de undă, este dezvoltat un model bazat pe transformarea timp-frecvență și teoria probabilității pentru a simula seturi de neregularități ale căii reprezentative și realiste prin combinarea cu metode de eșantionare aleatorii. Mai mult, un model tridimensional (3-D) cuplat vehicul-șină este stabilit prin metoda elementelor finite și ecuații de echilibru dinamic, în care se ia în considerare neliniaritatea interacțiunii roată/șină. În cele din urmă, este introdusă o metodă de evoluție a densității probabilității, pentru a rezolva problemele de transmisie probabilistică dintre seturile de neregularități ale căii și răspunsurile dinamice ale sistemelor cuplate vehicul-șină. Există o demonstrație clară că rezultatele obținute prin metodele propuse sunt comparabile cu măsurătorile experimentale. [10]. Atenția se concentrează asupra mecanismului de excitație a modurilor de vibrație a caroseriei, care are o influență puternică asupra confortului vehiculului. La început, problema este investigată printr-un model analitic simplu cu trei grade de libertate și este analizat fenomenul vitezelor critice, subliniind modul în care atât modurile de vibrație a caroseriei rigide, cât și cele flexibile pot fi excitate într-o măsură diferită, în funcție de viteza vehiculului și modul în care acestea se combină pentru a produce accelerațiile finale ale caroseriei. Apoi, răspunsul dinamic al unui vehicul real care rulează pe o cale neregulată este simulat printr-un model multicorp mai detaliat, potrivit pentru reproducerea cantitativă a comportamentului său dinamic în intervalul de frecvență 0-25 Hz. Cele 68 de grade de libertate ale acestui model corespund celor 35 de moduri de vibrație rigide ale componentelor vehiculului (caroseria, cadrele boghiului și seturile de roți), plus cele 33 de moduri flexibile ale caroseriei care se încadrează în gama de frecvență de interes. În ultima parte a lucrării, rezultatele numerice obținute sunt comparate cu datele experimentale colectate în timpul testelor on-line, arătând modul în care modelul numeric adoptat simulează cu acuratețe comportamentul dinamic al vehiculului real la diferite viteze, cu un acord foarte bun. [10-15].

Datorită construcției sale, pista prezintă în ansamblu, pe de o parte, multe abateri din forma geometrică ideală și, pe de altă parte mâna, defecte ale suprafețelor de rulare ale șinelor. Aceste două de mai sus, alături de discontinuitățile constructive ale calea ferată, compensează principalele cauze ale vehiculului feroviar vibrații [16-20].

În general, structura căii este reprezentată de două tipuri de modele mecanice: modelul continuu cu suporturi cu unul sau două straturi și modelul periodic cu suporturi discrete. Primul model este adecvat pentru calea de plăci iar cel de-al doilea model este utilizat pentru calea balastă.

Placa relativ nouă calea este aplicată pentru liniile de cale ferată de mare viteză și pentru mediul feroviar urban. Aici, infinitul structura grinzilor duble Euler-Bernoulli reprezintă sistemul de cale cu plăci.

Neregulile șinei sunt una dintre cauzele comune ale vibrațiilor verticale roți/șină calea balastă sau calea din plăci. Neregulile șinei au lungimea de undă în intervalul 0,03 m – 3 m, deoarece urmează: defecte de undă lungă și de rulare cu lungimea de undă între 1 m și 3 m, șină de lungime de undă lungă ondulare de la 0,1 m până la 1 m și ondulare cu lungime de undă scurtă care are lungimea de undă de 0,03 m – 0,1 m.

Neregulile sunt punctul de plecare pentru vibrațiile roților/șinei de la 15 Hz la 3000 Hz. Analiza interacțiunii roată/șină poate fi tratată în domeniul frecvenței sau/și în domeniul timpului folosind fie modelul unei nereguli în mișcare între o roată staționară și șină, fie modelul unei nereguli în mișcare roata de-a lungul pistei. Analiza în domeniul frecvenței necesită un model liniar obligatoriu. De fapt, pista structura are neliniarități și contactul roată/șină este, de asemenea, neliniar, conform Hertz teorie. Cu toate acestea, cele mai multe lucrări consideră pista ca o structură liniară, deoarece această ipoteză oferă rezultă într-un bun acord cu cercetările experimentale.

Înainte de punerea în circulație a vehiculelor feroviare, acestea trebuie să treacă printr-un proces de încercări și simulări pentru omologarea caracteristicilor de comportare dinamică și statică.

Obiectivul este de a cuantifica performanțele vehiculului în condiții reprezentative, cunoscute, de exploatare și infrastructură.

Toate vehiculele noi sau modificate trebuie verificate cu privire la caracteristicile lor dinamice pentru a evalua siguranța la rulare, sarcina pe linie și calitatea de mers a vehiculului. Poate fi efectuată o evaluare pentru omologarea inițială a tipului de vehicul sau pentru o extindere a omologării. [21]

Calitatea mersului la vehiculele feroviare este influențată de vibrațiile care apar la toate vagoanele de marfă sau de călători. Vibrațiile influențează confortul călătorilor, integritatea mărfurilor și siguranța circulației., [21].

Factorii principali care cauzează producerea vibrațiilor sunt neregularitățile suprafețelor de rulare ale șinelor și ale roților.[22] - [32]

În cazul șinelor avem abateri de la forma geometrică a căii, neregularități ale suprafeței de rulare și discontinuități ale șinei. Cauzele enumerate sunt cele mai importante cauze care generează vibrații.. [33]-[36]

Aceasta lucrare prezintă analiza vibrațiilor transversale (pe axa y) și vibrațiile verticale (e axa Z) ale unui vagon cisterna, pe baza rezultatelor înregistrate, pe o cale ferată în curba, la viteze variabile, încărcat și gol. De fapt, accelerația RMS (rădăcina medie pătrată) este înregistrată pe axele osiilor de la primul boghiu și pe cele 2 boghiuri ale vagonului, în cazul vagonului gol și încărcat pentru mai multe secvențe de măsurare la viteză constantă. Analiza spectrală a RMS duce la identificarea defectelor constructive ale vagonului precum și la determinarea capacității vagonului de a trece peste defectele căii.

O mare parte din vibrațiile vehiculelor feroviare sunt rezultatul atât a neregularităților transversale cât și a celor verticale ale căii și a discontinuităților apărute la joante. Cele două roți sunt calate fix pe aceeași osie și conicitățile suprafețelor de rulare care sunt inversate, produc mișcarea de șerpuire a osiei care se propagă la masele suspendate ale vehiculului. Defectele roților, precum planeitățile și excentricitatea de pe suprafețele de rulare, constituie importante surse de vibrații.

Se cunoaște că la mersul în curbe, forța centrifugă necompensată, acționează asupra cutiei vehiculului, care alunecă pe direcția transversală și datorită arcurilor de suspensie se înclină, apărând amenințarea ca aceasta să iasă din gabarit. La vehiculele care nu sunt dotate cu dispozitive speciale care să compenseze insuficiența de supraînălțare a căii, este necesar ca acest neajuns să fie asigurat de suspensia vehiculului. Supraînălțarea căii trebuie compensată și este utilă pentru limitarea accelerației transversale, pentru asigurarea confortului la trecerea prin curbe și a variațiilor de sarcini pe roțile vehiculului.

Capitolul 2

Soluții constructive pentru îmbunătățirea performanțelor dinamice a vagoanelor de marfă

Actualitatea tezei de doctorat

Actualitatea tezei de doctorat rezultă din condițiile impuse de siguranța circulației din sistemul feroviar și de calitatea de mers a vehiculelor feroviare.

Siguranța circulației și calitatea de mers sunt strâns legate de comportamentul dinamic al vagoanelor, fie că sunt de marfă sau de călători.

Din perspectiva creșterii vitezelor de circulație din spațiul unic feroviar european, atât pentru traficul de marfă, cât și pentru cel de călători, analiza în timp real și evaluarea continuă a comportamentului dinamic al vagoanelor capătă o importanță deosebită din punct de vedere al evaluării tehnice a vagoanelor, cât și din punct de vedere al evaluării tehnice a infrastructurii de rulare.

Politica Uniunii Europene de dezvoltare a transportului feroviar prevede atingerea vitezelor de 140 km/h – 160 km/h, în aliniament și palier pentru traficul de marfă, 160 km/h – 180 km/h pentru traficul de călători regional și 250 km/h – 260 km/h pentru traficul de călători interregional.

Prezenta lucrare își propune să arate că există o strânsă corelație între comportamentul dinamic al vagonului și starea tehnică a acestuia, respectiv starea tehnică a infrastructurii de rulare, putându-se urmări în timp evoluția defectelor și chiar identificarea punctuală a neconformităților/defectelor din calea de rulare.

Dezvoltarea ulterioară a unor dispozitive universale, care pot fi montate pe orice vagon și care vor permite evaluarea tehnică a ansamblului vagon - cale de rulare, va asigura eficientizarea procesului de mentenanță preventivă, cu efecte în reducerea costurilor de exploatare și creșterea siguranței circulației prin eliminarea evenimentelor feroviare determinate de acest tip de neconformități.

CAPITOLUL 3

Direcțiile, obiectivele și metodele de cercetare-dezvoltare ale tezei de doctorat

Deoarece transportul feroviar este cea mai optimă și eficientă alternativă de transport terestru, în urma măririi volumului de transport pe calea ferată, se urmărește creșterea siguranței, securității și confortului călătorilor, respectiv siguranța și integritatea mărfurilor. Din această perspectivă direcțiile de cercetare – dezvoltare identificate sunt:

D1: Creșterea siguranței circulației.

D2: Scăderea costurilor de întreținere a materialului rulant și a infrastructurii de rulare, prin aplicarea mentenanței preventive.

D3: Întreținerea eficientă a căii ferate prin identificare punctelor critice în timp real și nu după un plan stabilit/periodic de mentenanță.

D4: Creșterea vitezei de circulație/mentinerea vitezei de proiectare prin gestionarea eficientă a cauzelor care determină restricții de viteză, atât din perspectiva vagonului, cât și a căi de rulare.

D5: Dezvoltarea unui concept care face legătura între vibrațiile ce apar la sistemul de rulare și punctele critice, astfel încât să identifice defectele căii fără costuri suplimentare.

3.1. Obiective de cercetare - dezvoltare

Obiectivul principal al tezei (Op), care derivă din tema de cercetare-dezvoltare propusă programului doctoral este formulat astfel:

Op: Analiza comportamentului dinamic a vagoanelor de marfă și stabilirea criteriilor / soluțiilor / metodelor de observare și urmărire a evoluției în timp real a acestuia, atât din punct de vedere al vehiculului, cât și al influenței infrastructurii feroviare de rulare asupra lui, pentru asigurarea siguranței circulației, printr-un proces de evaluare preventivă continuă.

Pentru îndeplinirea obiectivului principal au fost identificate următoarele obiective secundare (Os):

Os1: Analiza dotărilor necesare care permite studiul comportamentului dinamic

Os2: Analiza metodelor optime de măsurare și înregistrare a datelor experimentale

Os3: Analiza și alegerea punctelor optime de măsurare și a tipului de vehicul feroviar destinat studiului experimental.

Os4: Analiza caracteristicilor liniei pe care se desfășoară măsurătorile experimentale

Os5: Analiza și prelucrarea datelor obținute experimental

Os6: Analiza statistică utilizând metoda RMS (rădăcina medie pătratică)

Os7: Realizarea programului de simulare teoretică a comportării dinamice a vagonului și validarea acestuia pe baza determinărilor experimentale

3.2. Metodologia de cercetare – dezvoltare

Pentru atingerea obiectivelor principale și secundare menționate anterior a fost elaborată o metodologie de cercetare – dezvoltare care cuprinde următoarele etape:

M1: Alegerea și prezentarea vagonului de marfă destinat studiului / analizei comportamentului dinamic

M2: Stabilirea locului ales pentru desfășurarea măsurătorilor experimentale destinate analizei comportamentului dinamic

M3: Analiza caracteristicilor liniei pe care s-au desfășurat încercările și măsurătorile

M4: Alegerea sistemului de decodificare și analiză a datelor obținute experimental și centralizarea acestora

M5: Analiza dinamicii de rulare a vibrațiilor transversale măsurate experimental

M6: Analiza dinamicii de rulare a vibrațiilor verticale măsurate experimental

M7: Prelucrarea și analiza datelor obținute experimental

M8: Analiza statistică a datelor obținute prin măsurători experimentale

M9: Simularea teoretică a comportării dinamice a vagonului de marfă și compararea datelor

M10: Elaborarea concluziilor finale care validează obiectivele principale și secundare

3.3. Concluzii

Teza de doctorat urmărește să alinieze cercetările și analizele rezultate la strategia de dezvoltare a Uniunii Europene în domeniul feroviar din perspectiva optimizării, eficientizării și protecției mediului, elemente pe care România trebuie să le implementeze în sistemul feroviar.

PARTEA II. PREZENTAREA VAGONULUI, A LINIEI DE CALE FERATĂ ȘI A SISTEMULUI DE MĂSURĂ

CAPITOLUL 4

Prezentarea vagoanelor cisternă pentru transportul produselor lichide, cu rezervor metalic,

Caracteristicile vagonului cisternă analizat în lucrare

În lucrare vom studia **Vagonul cisterna pe 4 osii, tip Zacs (vagon cisternă, cu 4 osii, cu descărcare sub presiune)**, cu capacitatea totală 85 mc, fabricat de REVA S.A. din Simeria, este destinat transportului pe calea ferată a produselor petroliere ușoare, clasa 3 RID (benzina, motorina, ulei mineral), precum și a altor produse corespunzătoare codului de cisterna L4 BH.

În figura 4.7 este prezentat vagonul cisternă care constituie obiectul analizei acestei lucrări.

Vagonul este destinat utilizării, într-un domeniu de temperaturi exterioare cuprins în intervalul de temperaturi -20°C și $+50^{\circ}\text{C}$.

Încărcarea / umplerea cisternei se poate realiza, în funcție de caracteristicile materialului transportat, prin dom (echipat cu capac rabatabil închis cu 4 șuruburi de strângere), sau prin partea inferioară a cisternei, prin țeava de golire.

Golirea cisternei se realizează prin partea inferioară prin țeava de golire DN 100, cu acționare bilaterală mecanică situată la partea inferioară centrală a cisternei, cu capacul domei închis.

Vagonul este o construcție cu suprastructura complet nouă conform normelor EN, RID, CUU, UIC, STI 321. Vagonul rezultat va fi un vagon destinat traficului internațional.

Echipamentele vagonului precum: boghiu complet, frâna automată, tampoane, tracțiune, legare, sunt conform normelor EN și UIC.



Fig.4.7. Vagonul cisternă

Caracteristici principale

lungimea vagonului peste tamboane – 14940 mm
lungimea șasiului – 13700 +12/0 mm
ampatament vagonului – 9400 mm
distanța peste osiile extreme – 11200 mm
capacitatea totală a cisternei – 85 m³
capacitatea utilă a cisternei (conform RID) – aprox. 85 m³
diametrul exterior al cisternei – 2950 mm
lungimea exterioară a cisternei peste funduri – 13000 +30/-30 mm
înclinație cisternei către mijlocul cisternei 10
presiunea de calcul (conform RID; pentru temperatura de 20°C) – 4 bar
presiunea maximă de lucru – 3 bar
presiunea de încercare hidraulică – 4 bar
depresiunea de calcul a cisternei – 0,4 bar
verificare la presiunea de explozie (conform TRT 006 și RID 2017) – 8,7 bar
temperatura de calcul conform RID +20°C
înălțimea axei tamboanelor de la nivelul șinei (vagon nou, gol) – 1060 +5/-10 mm
înălțimea axei tracțiunii de la nivelul șinei (vagon nou, gol) – 1040 +5/-10 mm
viteza de circulație a vagonului: vagon încărcat 110 km/h vagon gol 130 km/h
razele minime de înscriere în curbă: – pe linii principale 150 m – pe liniile de garaj.

CAPITOLUL 5

Centrul de Testări Feroviare Făurei

În sud estul Europei singurul poligon feroviar este la Centrul de Testări Feroviare Făurei și aparține Autorității Feroviare Române – AFER.

Creșterea cerințelor legate de transport în secolul trecut în România, a condus la necesitatea construirii unui centru de testări feroviare în România. Pe fondul creșterii vitezei de remorcăre, dezvoltarea transporturilor, a tonajelor remorcate s-a făcut, în condiții de siguranța circulației.

Centrul de Testări Feroviare Făurei (CTFF) este un poligon de încercări ce permite circulația trenurilor de probă cu viteza de 200 km/h.

Deschiderea CTFF a fost făcută în anul 1978 și de atunci, aproape toate vehiculele prototip produse în România au fost testate acolo.



Fig.5.1. Localizarea Centrului de Testări Feroviare Făurei (imagine din Google Earth)

Caracteristicile tehnice a liniei pe care s-au făcut măsurătorile

Centrul de testări feroviare Făurei al AFER are o lungime totală a liniilor de 20,2 km, din care:

Inelul mare are caracteristicile următoare :

- lungimea 13,709 km cu 6 podete și 4 treceri de nivel;
- doua curbe cu razele de 1800 m și supraînălțări de 150 mm;
- alimentarea cu curent alternativ monofazat de 25 kV, 50 Hz.
- lungimea aliniamentelor 1000 m și 950 m ,
- viteza maximă 200 km/h
- nivelul catenei la 5,5 m

Capitolul 6

Caracteristicile liniei de cale ferată pe care s-au efectuat testele

6.1. Prezentarea generala a caracteristicilor liniei pe care s-au făcut înregistrările

Lungimea totala a inelului de încercări de la Centrul de Testări Feroviare Făurei este de 13,712 km.

Tipul șinei este 60 (kg/ml)

Fig.6.1.Prezentarea generală a configurației liniei de la Inelul mare de la CTF Făurei
O prezentare generală a configurației este în figura 5.1.

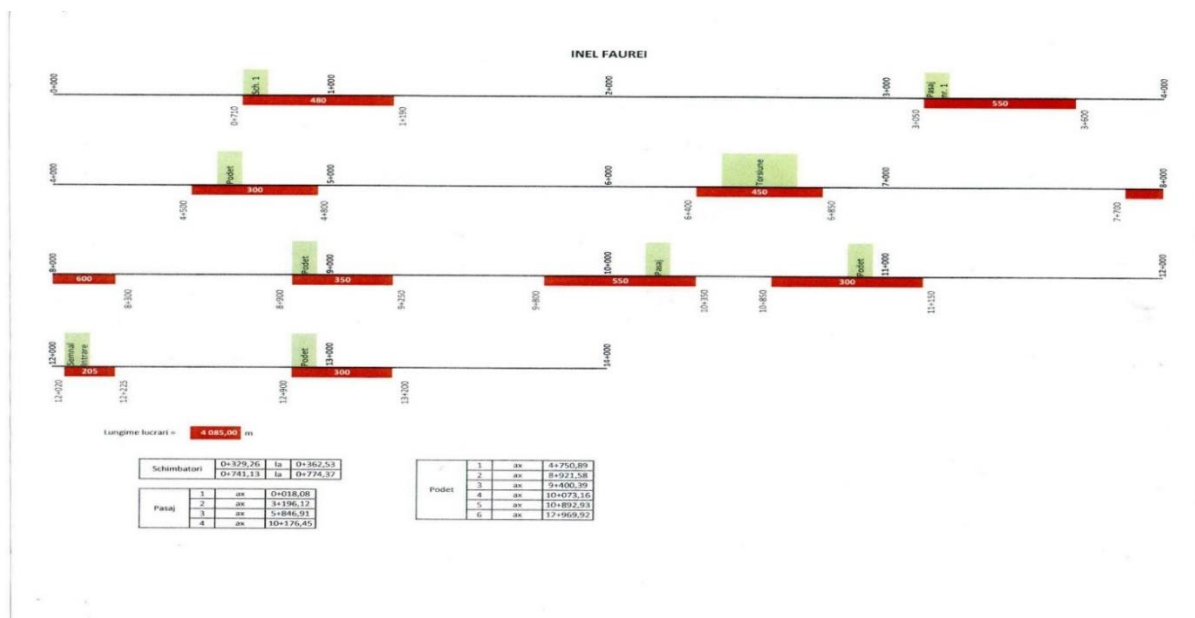


Fig.6.1. Prezentarea generală a configurației liniei de la Inelul mare de la CTF Făurei

Prezentarea unei secțiuni din raportul de trasare al liniei.

Raport trasare
Interval: Inel Mare Faurei De la km: 0+000 pana la km: 13+712 Data: 04-11-2020
Racord in existent la P1-2.30m

Numar	Poziție kilometrica	Geometrie proiect	Supra inaltare	Dist pichet ax (proiect)	Valori ripare(mm)	Dif. nivel proiect	Valori ridicare(mm)	Cota proiectata	Aliniament, si curbe		Declivitate	
									stanga	dreapta	de la-pana la	decliv./dist.
494	11+922.75		150		4		3	201.482				
495	11+947.63		150		7		1	201.482				
496	11+972.02		150		2		4	201.482	r=1800.055			
497	11+997.54		150		-1		6	201.482	lc=2391.694			

Fig.6.3. Raportul de măsurări a liniei de la km 2 la km 5.

Tabelele de mai sus au următoarele coloane:

Coloana 1 numerotarea punctelor în care s-a făcut măsurarea

Coloana 2 distanța kilometrica corespunzătoare punctului în care s-a făcut măsurarea

Coloana 3 configurația liniei (podeț, pasaj...)

Coloana 4 supraînălțarea (fiind în curbă zona măsurată are supraînălțarea de 150 mm, pe firul exterior)

Coloana 6 valoarea abaterii pe orizontală de la trasa proiectată.

Coloana 8 valoarea abaterii pe verticală de la trasa proiectată.

Coloana 9 valoarea proiectată

Coloana 10 și 11 reprezentarea grafică a abaterilor pe orizontală

Coloana 12 și 13 reprezentarea grafică a abaterilor pe verticală

După studierea variațiilor, se face o corelare între momentul în care s-au înregistrat vârfuri ale accelerațiilor, viteza de circulație și se poate determina locul unde apar valorile mari. Astfel se pot stabili măsurile ce trebuie luate pentru înlăturarea defectelor.

Capitolul 7

Sistemul de măsură și analiza performanțelor dinamice de rulare ale vagonului cisternă pe patru osii

Comportarea dinamică de rulare a vagonului cisternă pe patru osii se determină și se verifică obținând unele valori numerice ale variabilelor de apreciere ale caracteristicilor tehnice ale vagonului de studiu cum sunt: accelerații, deplasări și forțe.

Comportarea dinamică de rulare a vagonului cisternă pe patru osii face referire strictă la interacțiunea vehiculului cu calea de rulare, determinând în mod obligatoriu siguranța rulării sau calitatea de mers. Determinarea caracteristicilor comportării dinamice de rulare menționate anterior se face utilizând , în funcție de procedura de aplicare (parțială sau completă), următoarele mărimi:

- accelerații;
- forțe de interacțiune roată-șină;
- forțe transversale dintre cutia de osie și osie.

În funcție de condițiile de încercare din cale, procedura de utilizare va fi:

- parțială – la care se ia în considerare doar anumite părți din condițiile de circulație și stări ale vehiculului.
- completă – la care se ia în considerare toate condițiile de circulație și stări ale vehiculului.

Metodele de măsurare utilizate sunt normale și simplificate. În cadrul metodei normale, în vederea evaluării se verifică solicitarea căii, siguranța rulării și calitatea rulării, măsurând direct parametrii și forțele de interacțiune roată-șină (Y/Q), sau a accelerațiilor care apar la nivelul cutiei vehiculului și a aparatelor de rulare.

În cadrul metodei simplificate, în vederea evaluării, se verifică doar calitatea și siguranța rulării măsurând forțele transversale din capul cutiilor de osie și accelerațiile apărute la nivelul șasiului vehiculului.

7.1. Descrierea aparatelor de măsură și montarea lor generalități

Caracteristicile dinamice de rulare a vagonului cisternă, pe două osii destinat transportului produselor petroliere, s-au evaluat adoptând procedura parțială și metoda de măsurare simplificată în cadrul testelor. Parametrii mășurați au fost:

- accelerațiile verticale, respectiv orizontal-transversale la cutia osiei roții atacante de pe firul exterior al curbei
- accelerațiile verticale, respectiv orizontal-transversale pe șasiul vagonului în axa roții de pe firul exterior și respectiv în axa osiei atacante.

7.2. Aparatele de măsură Amplasarea și montarea aparatelor de măsură

„Echipamentul de măsură și analiză pentru determinarea performanțelor dinamice și analiza calității mersului este alcătuit din: sistemul aparatelor de măsură; software de achiziție date și analiză experimentală în domeniile frecvență și timp; model analitic cu 17 grade de libertate care arată mișcarea vehiculului feroviar.”

Pentru analiza amănunțită a interacțiunii dinamice dintre principale componente ale vehiculului sunt utile informații asupra răspunsului osiei montate la excitațiile induse de calea de rulare în cadrul modelului funcțional vor fi introduse 6 traductoare de accelerație pentru achiziționarea de semnale de pe osie și pe cutia vagonului în dreptul boghiului 1 și 2.

„Sistemul de evaluare a rezistenței structurale și a răspunsului la impact a vehiculelor de cale ferată este compus din: sistemul aparatelor de măsură; software de achiziție date și analiză experimentală în domeniile timp și frecvență; model analitic calibrat de vehicul feroviar.”

Sistemul de măsură a fost dezvoltat pe canale analogice de intrare, care pot fi configurate pentru traductoare de tip CCLD (Constant Current Line Drive) sau pentru intrări directe de tensiune.

Denumire	Tip / Fabricant / Caracteristici	Serie	Certificat
Echipament pentru controlul vibrațiilor și analiză structurală compus din:	Sistem de masurare a vibrațiilor mecanice MCG Plus, producător Hottinger Germania, tip traductor B12/200, tensometru electronic AB – 22,	801063892	Certificat de Calitate EC133769 / 11.06.2017
Accelerometru	Hottinger Bruel Mecanic 1-B12/500	08521015	CE 34992/06.01.2018
Accelerometru	Hottinger Bruel Mecanic 1-B12/500	08521019	CE 35205/06.01.2018
Accelerometru	Hottinger Bruel Mecanic 1-B12/500	08521026	CE 35206/06.01.2018
Accelerometru	Hottinger Bruel Mecanic 1-B12/500	090510387	CE 35207/06.01.2018
Accelerometru	Hottinger Bruel Mecanic 1-B12/500	090510394	CE 35208/06.01.2018
Accelerometru	Hottinger Bruel Mecanic 1-B12/500	090510419	CE 35209/06.01.2018
Laptop	Toshiba08521026		

Tabelul 7.1. Aparatele de măsură folosite la efectuarea încercărilor

7.3. Modulul de achiziție de date

„Sistemul de măsurare a vibrațiilor mecanice MCG Plus, producător Hottinger Germania, prezintă o soluție eficientă pentru aplicații cu un număr mare de canale de achiziție și control individual al fiecărui canal. Principale caracteristici sunt: 12 canale analogice de intrare, domeniu de frecvență: DC la 25.6KHz, 65.5 kHz frecvența maximă de eșantionare, tehnologie REq-X (response equalization-egalizarea răspunsului), suportă traductoare TEDS, panel frontal interschimbabil.”

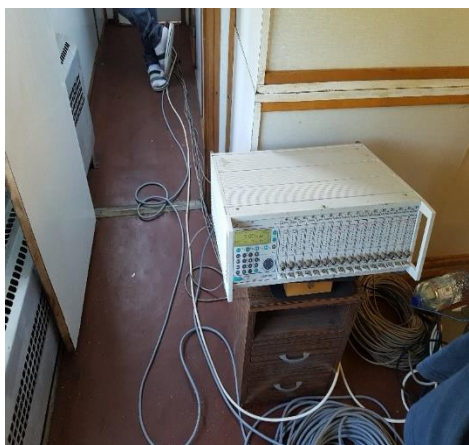


Fig.7.1. Modul achiziție de date
Datele măsurate

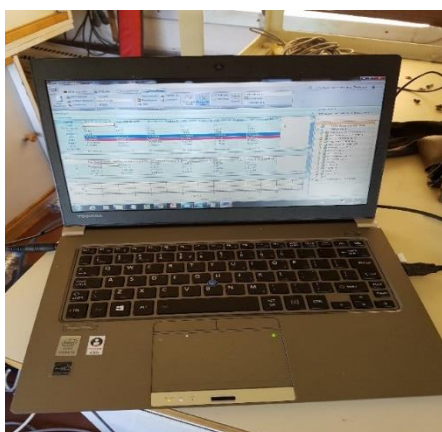


Fig.7.2. Terminalul pe care se înregistrează

„Generator LAN-XI 3160 A-042, este produs de firma Bruel&Kjaer și este o combinație de modul de achiziție pe 4 canale analogice și un generator de semnal pe 2 canale analogice. Principale caracteristici sunt: 4 canale analogice de intrare, domeniu de frecvență: DC la 51.2 KHz, 131 kHz frecvența maximă de eșantionare, 2 canale analogice de ieșire, tehnologie Dyn-X, tehnologie REq-X (response equalization-egalizarea răspunsului), suportă traductoare TEDS.”

7.4. Amplasarea si montarea aparatelor de măsură

Accelerometru 08521015: ICP; Sensibilitate: 10.19 mV/(m/s²); domeniu de măsură: ±490 m/s² pk; domeniu de frecvență (±5 %): 1 la 10000 Hz; domeniu de frecvență (±5 %): 0.6 la 12000 Hz; domeniu de frecvență (±ddB): 0.3 la 17000 Hz; frecvența de rezonanță: ≥35 kHz; rezoluția: 0.0009 m/s² rms; neliniaritate; ≤1 %; masa: 10 gm. Denumit in continuare accelerometrul numărul 1 a fost montat pe osia conducătoare, prima osie a primului boghiu din sensul de mers al vagonului cisternă



Fig.7.3. Acceleratorul montat pe prima osie a primului boghiu



Fig.7.4. Acceleratorul montat pe doua osie primului boghiu

Accelerometru 08521019: ICP; Sensibilitate: 1.02 mV/(m/s²); domeniu de măsură: ±4900 m/s² pk; domeniu de frecvență (±5 %): 1 la 10000 Hz; domeniu de frecvență (±5 %): 0.6 la 12000 Hz; domeniu de frecvență (±ddB): 0.3 la 17000 Hz; frecvența de rezonanță: ≥35 kHz; rezoluția: 0.005 m/s² rms; neliniaritate; ≤1 %; masa: 10 gm.

Denumit în continuare accelerometrul numărul 2 a fost montat pe a doua osie a primului boghiu din sensul de mers al vagonului cisternă, figura 7.4.

Accelerometru 08521026: ICP; Sensibilitate: 5.10 mV/(m/s²); domeniu de măsură: ±981 m/s² pk; domeniu de frecvență (±5 %): 1 la 5000 Hz; domeniu de frecvență (±5 %): 0.7 la 8000 Hz; domeniu de frecvență (±ddB): 0.35 la 15000 Hz; frecvența de rezonanță: ≥28 kHz; rezoluția: 0.01 m/s² rms; neliniaritate; ≤1 %; masa: 20 gm.

Denumit în continuare accelerometrul numărul 3 a fost montat pe cutia vagonului, deasupra primului boghiu din sensul de mers al vagonului cisternă, figura 6.5.



Fig.7.5.Accelerometrul 3 montat pe cutia vagonului, primului boghiu



Fig.7.6.Accelerometrul 4 montat pe cutia vagonului în mijlocul primului boghiu

Accelerometru 090510387 : ICP; Sensibilitate: 5.10 mV/(m/s²); domeniu de măsură: ±981 m/s² pk; domeniu de frecvență (±5 %): 1 la 5000 Hz; domeniu de frecvență (±5 %): 0.7 la 8000 Hz; domeniu de frecvență (±ddB): 0.35 la 15000 Hz; frecvența de rezonanță: ≥28 kHz; rezoluția: 0.01 m/s² rms; neliniaritate; ≤1 %; masa: 20 gm.

Denumit în continuare accelerometrul numărul 4 a fost montat pe cutia vagonului, deasupra primului boghiu din sensul de mers al vagonului cisternă, figura 7.4.

Accelerometru 090510394: ICP; Sensibilitate: 5.10 mV/(m/s²); domeniu de măsură: ±981 m/s² pk; domeniu de frecvență (±5 %): 1 la 5000 Hz; domeniu de frecvență (±5 %): 0.7 la 8000 Hz; domeniu de frecvență (±ddB): 0.35 la 15000 Hz; frecvența de rezonanță: ≥28 kHz; rezoluția: 0.01 m/s² rms; neliniaritate; ≤1 %; masa: 20 gm.

Denumit în continuare accelerometrul numărul 5 a fost montat pe cutia vagonului, deasupra mijlocului celui de al doilea boghiu din sensul de mers al vagonului cisternă.

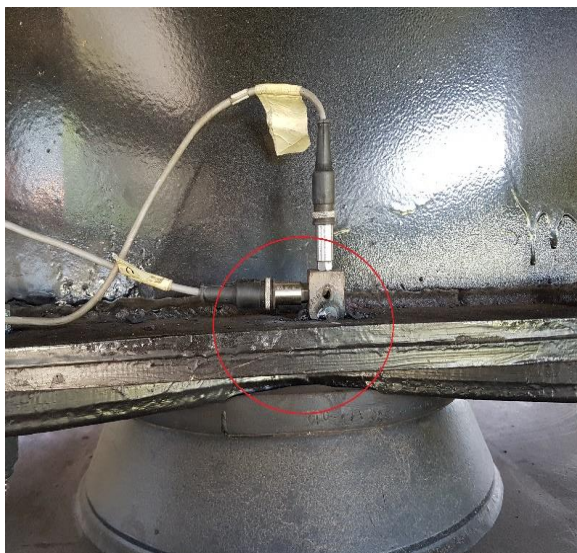


Fig.7.7.Accelerometrul 5 montat pe cutia vagonului mijlocul celui de al doilea boghiu

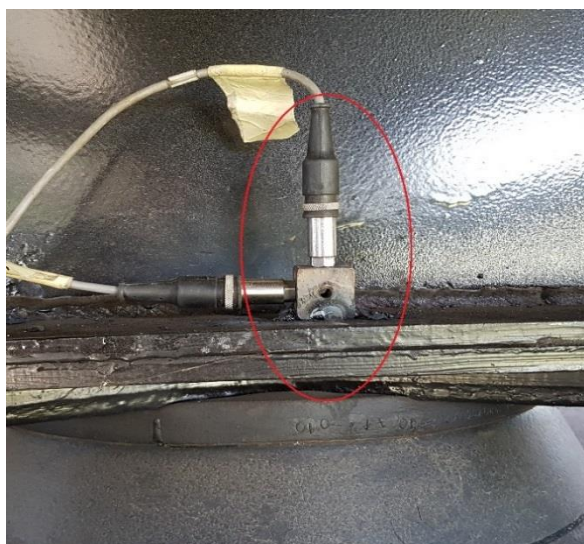


Fig.7.8.Accelerometrul 6 montat pe cutia vagonului, mijlocul celui de al doilea boghiu

Accelerometru 090510419: ICP; Sensibilitate: 5.10 mV/(m/s²); domeniu de măsură: ±981 m/s² pk; domeniu de frecvență (±5 %): 1 la 5000 Hz; domeniu de frecvență (±5 %): 0.7 la 8000 Hz; domeniu de frecvență (±dB): 0.35 la 15000 Hz; frecvența de rezonanță: ≥28 kHz; rezoluția: 0.01 m/s² rms; neliniaritate; ≤1 %; masa: 20 gm.

Denumit in continuare accelerometrul numărul 6 a fost montat pe cutia vagonului, deasupra mijlocului celui de al doilea boghiu din sensul de mers al vagonului cisternă.

Calibrator electrodinamic 11032-Robotron: 9.3 m/s² rms, 85.5Hz.

Laptop Dell Precision M6800: Processor: 4th Gen Intel® Core™ i7-4930MX Proc, Extreme 3.0GHz, 8M cache, Upgradable to Intel vPro technology; Memorie: 32GB (4x8GB) 1600MHz DDR3L; Video Card: NVIDIA® Quadro® K5100M w/8GB; Hard Drive: 750GB 2.5inch SATA (7,200 Rpm); Rețea cu fir: Gigabit Ethernet 10/100/1000; Wireless: 1601 2x2 802.11n+BT+60GHz .

PARTEA III.

EFFECTUAREA ÎNCERCĂRILOR, ÎNREGISTRAREA ȘI ANALIZA DATELOR MĂSURATE PE VAGON

Capitolul 8

Analiza datelor măsurate experimental de cele 6 accelerometre și interpretarea lor

Experimentele s-au desfășurat pe linia de cale ferată de la Centrul de Testări Feroviare al inelului mare. Inelul are 2 curbe situate între km 2 și km 5 și între km 9 și km 12, (figura 7.1.)

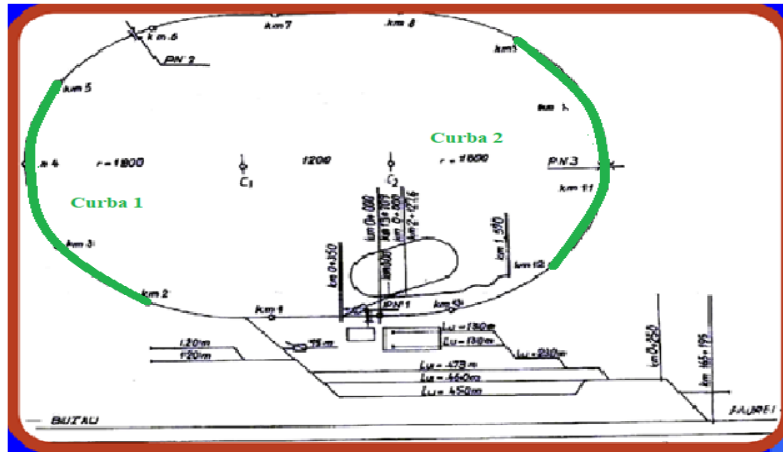


Fig. 8.1. Inelul mare de încercări, curbele 1 și 2, pe care s-au făcut înregistrările (segmentele verzi)

Vagonul cisternă a fost legat la vagonul laborator, amândouă fiind tractate de locomotiva LDH 1250 seria 283.



Fig.8.2. Trenul cu care s-au făcut măsurătorile

Toate cele 6 accelerometre sunt conectate la sistemul de achiziție de date din vagonul laborator.

Locomotiva tractează cele 2 vagoane, vagonul cisternă și vagonul laborator, cu viteza 125 km/h, 130 km/h și 135 km/h când vagonul este gol și cu vitezele 105 km/h, 110 km/h și 115 km/h când vagonul este încărcat.

Sensul de mers pe inel este în sensul acelor de ceas.

Locomotiva demarează, după primul tur, turul de recunoaștere, ajunge la viteza propusă. Când ajunge în dreptul bornei de la kilometrul 2 se pornesc înregistrările. Când vagonul laborator ajunge în dreptul bornei de la km 5 se opresc înregistrările.

Se reia procesul când vagonul laborator ajunge în dreptul bornei de la kilometrul 9.

Datele obținute experimental

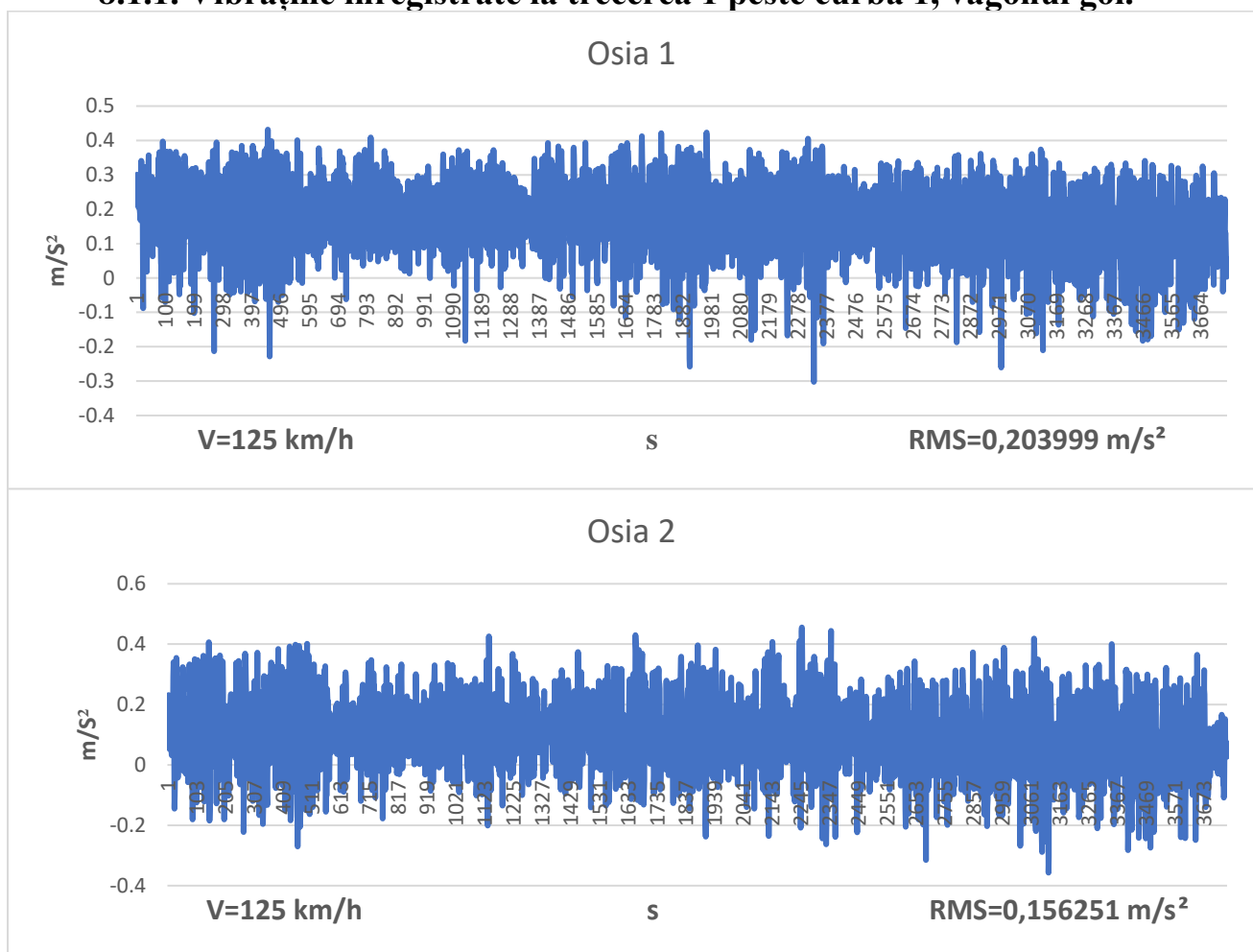
Time	Acc.1	Acc.2	Acc.3	Acc.4	Acc.5	Acc.6
[s]	[m/s ²]	[m/s ²]	[m/s ²]	[m/s ²]	[m/s ²]	[m/s ²]
0.00	0.87	1.14	0.89	-0,07	0,06	-0,75
0.02	0.77	1.14	0.91	-0,09	0,58	-0,66
0.04	0.64	1.22	0.93	-0,03	0,46	-0,47
0.06	0.66	1.17	0.94	0,01	0,44	0,21
0.08	0.83	1.18	1.04	-0,04	0,57	0,10
0.10	0.85	1.31	1.04	0,07	0,61	0,19

Tab.8.1. Selecție din tabelul cu datele înregistrate la o trecere a vagonului peste curbă

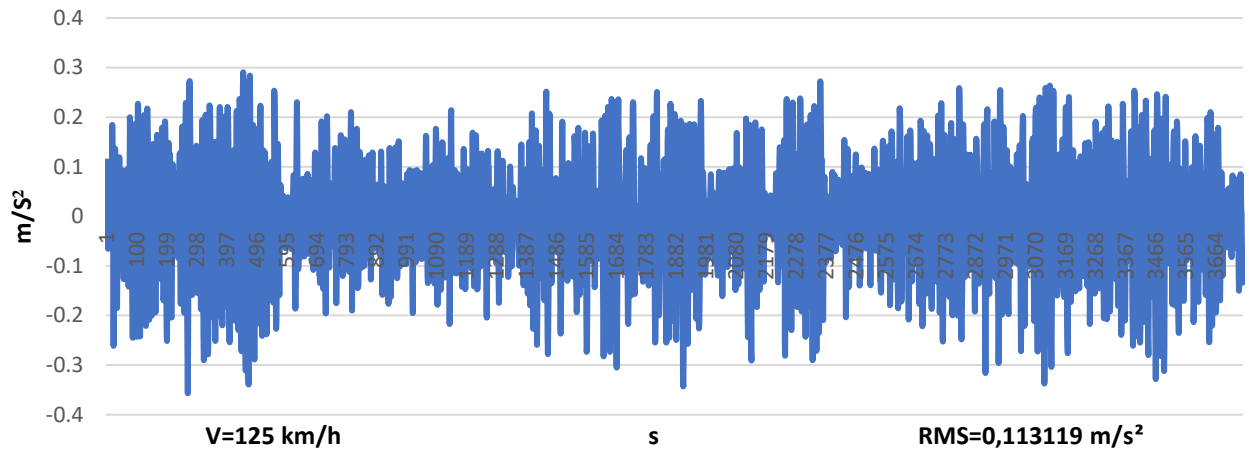
Măsurătorile experimentale s-au făcut în timp ce locomotiva tracta vagonul cisternă și vagonul laborator. În momentul începerii înregistrărilor accelerometrele transmit valorile vibrațiilor măsurate în m/s² din 0,02 în 0,02 secunde, până la oprirea înregistrărilor. Un tabel cu datele primare înregistrate în timpul măsurătorilor se găsește, pentru exemplificare, în anexa 1. Celelalte tabele se găsesc pe stick și pot fi puse la dispoziție pentru consultare. La o înregistrare sunt între 4.000 și 5.000 de date pentru fiecare canal accelerometru, iar la fiecare trecere se înregistrează datele de pe 6 canale. Tabelele obținute se transformă în grafice pentru o mai bună vizualizare și interpretare.

8.1. Graficele pentru studiul vibrațiilor la vagonul cisterna gol, la trecerea peste curba 1

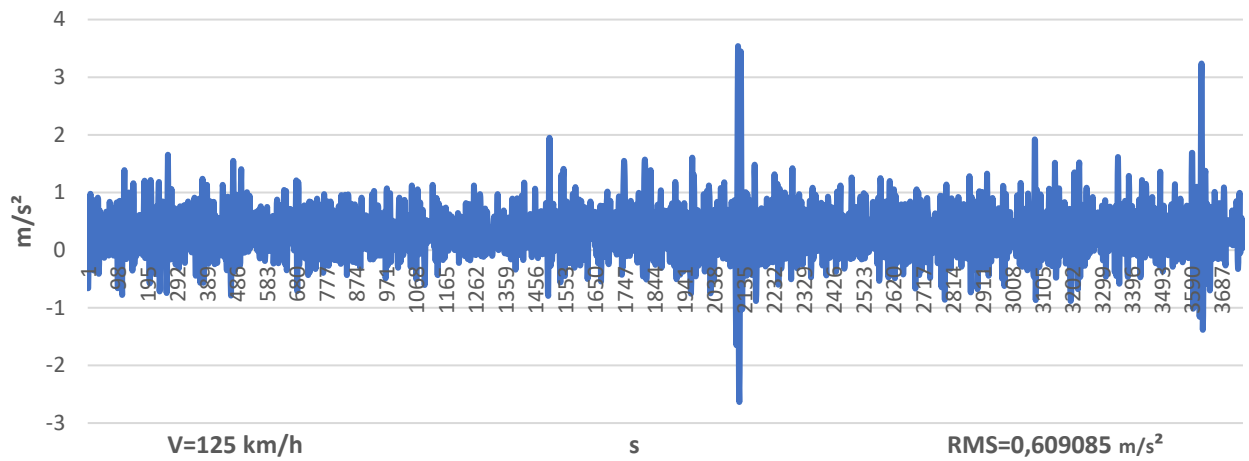
8.1.1. Vibrațiile înregistrate la trecerea 1 peste curba 1, vagonul gol.



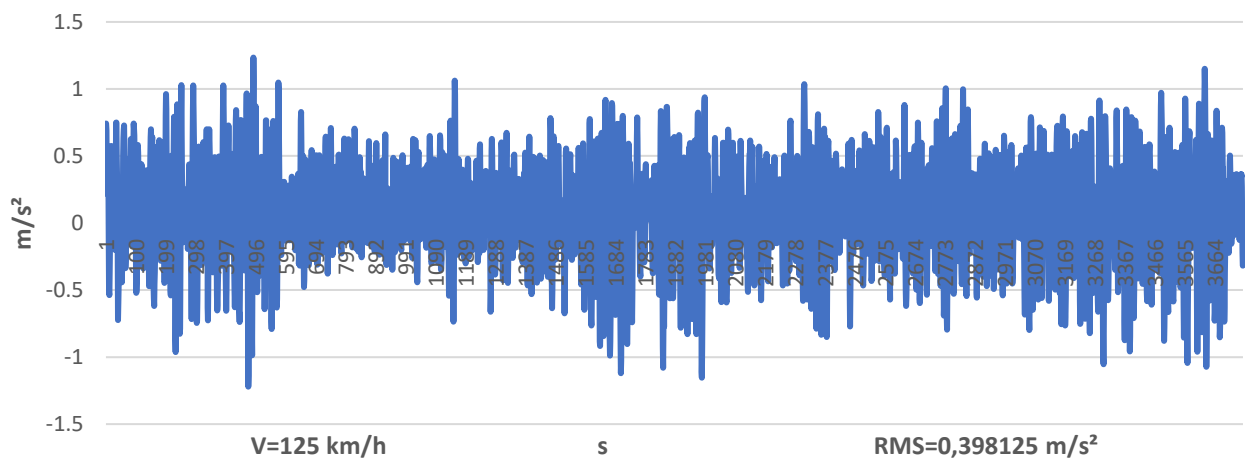
Cutie vagonului, boghiul 1, axa y



Cutie vagonului, boghiul 1, axa z



Cutie vagonului, boghiul 2, axa y



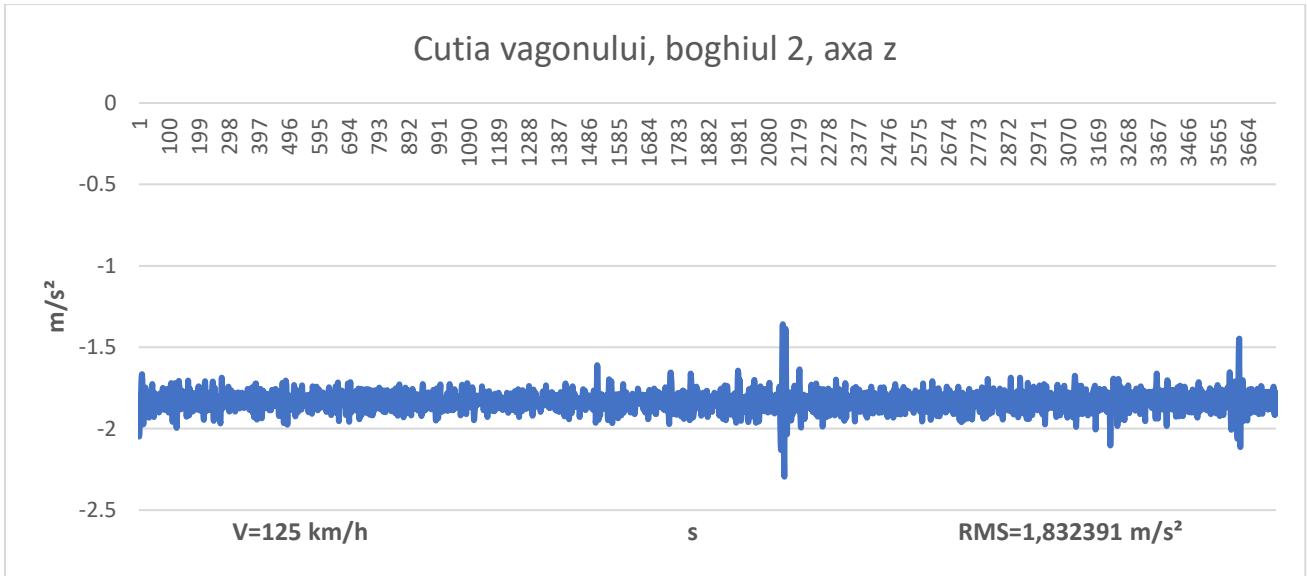
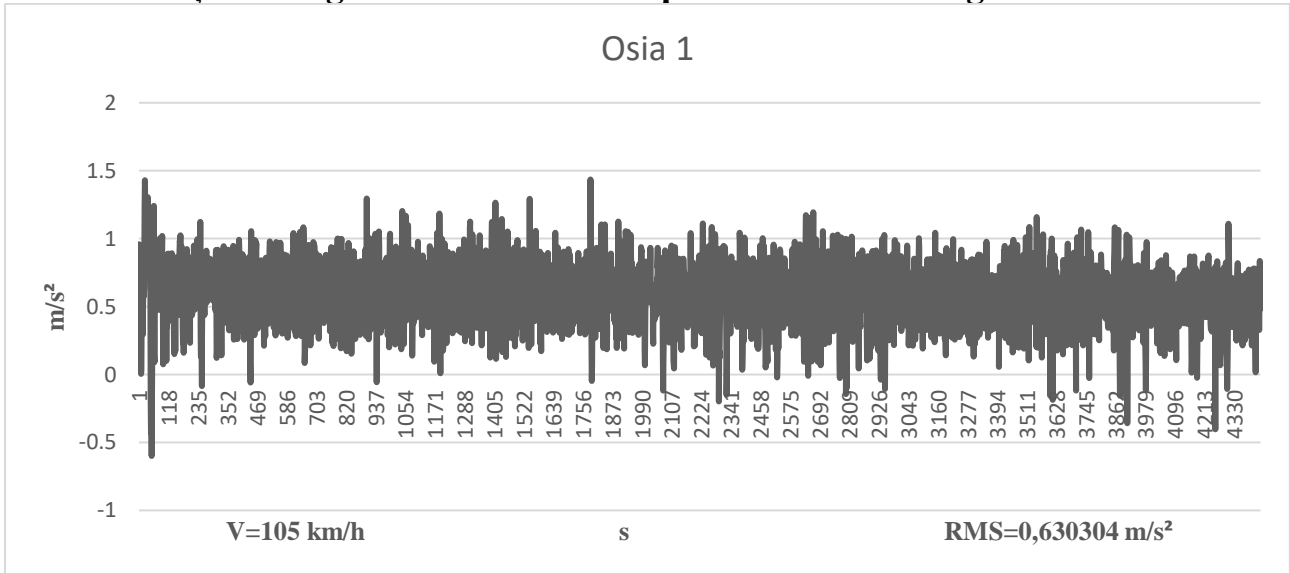


Fig. 8.1.1. Graficele cu valorile vibrațiilor înregistrate de cele 6 accelerometre la prima trecere peste curba 1, de la km 2 pana la km 5. cu vagonul gol

Datele înregistrate de cele 6 accelerometre la prima trecere a vagonului gol, peste prima curbă, sunt prezentate în 4 grafice care ilustrează vibrațiile transversale (pe axa Y) și două grafice care ilustrează vibrațiile verticale (pe axa Z). Valorile accelerațiilor transversale înregistrate pe cele 2 osii au valori aproximativ egale, valorile pe al doilea boghiu se dublează în raport cu valorile de pe osii. Valorile accelerațiilor de pe primul boghiu sunt jumătate față de valorile de pe al doilea boghiu.

În cazul vagonului gol măsurătorile s-au făcut prin 9 treceri cu vagonul gol, peste curba 1 la viteze relativ apropiate 125 km/h, 130 km/h si 135 km/h.

8.2.1. Vibrațiile înregistrate la trecerea 1 peste curba 1 cu vagonul încărcat



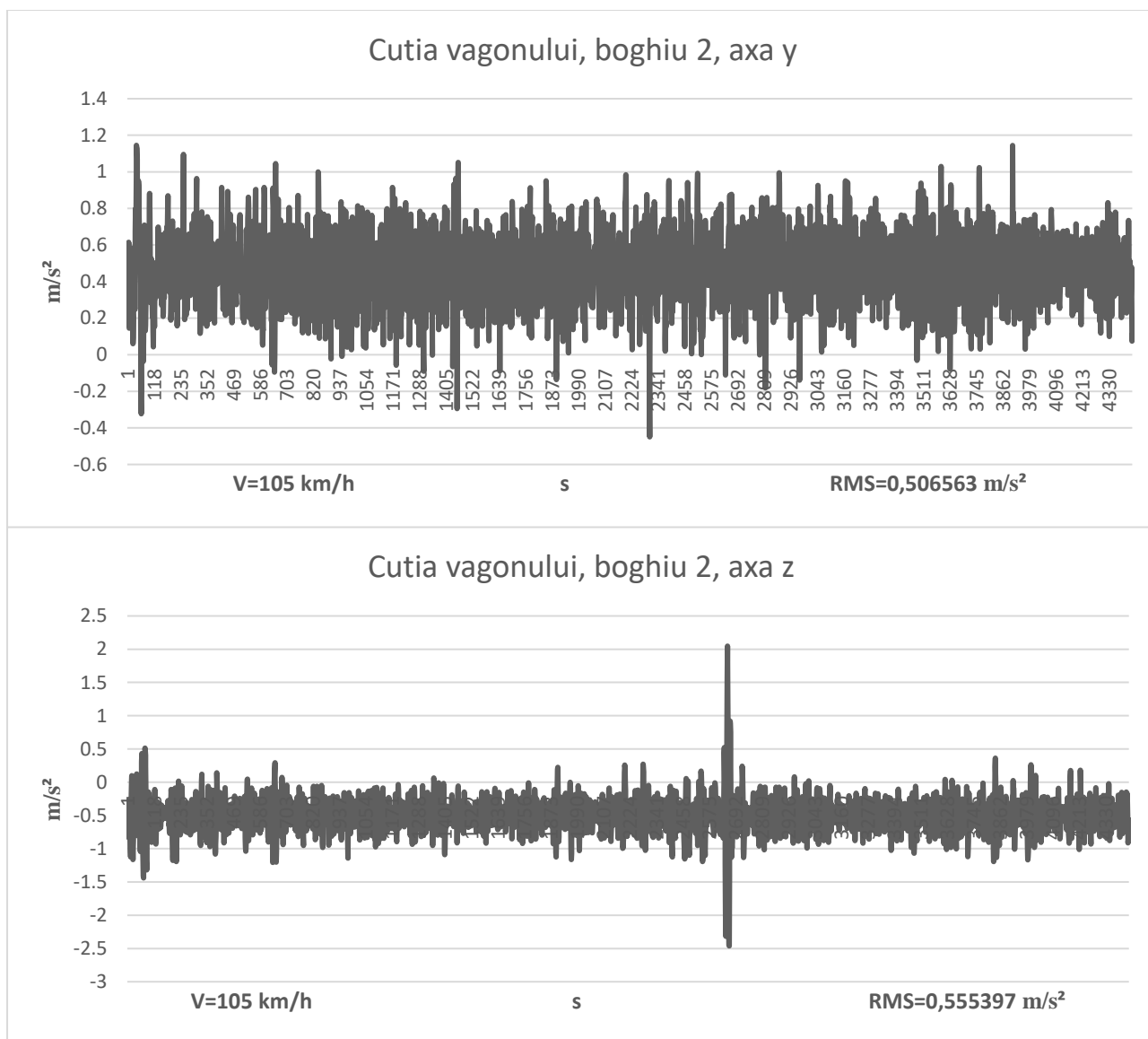


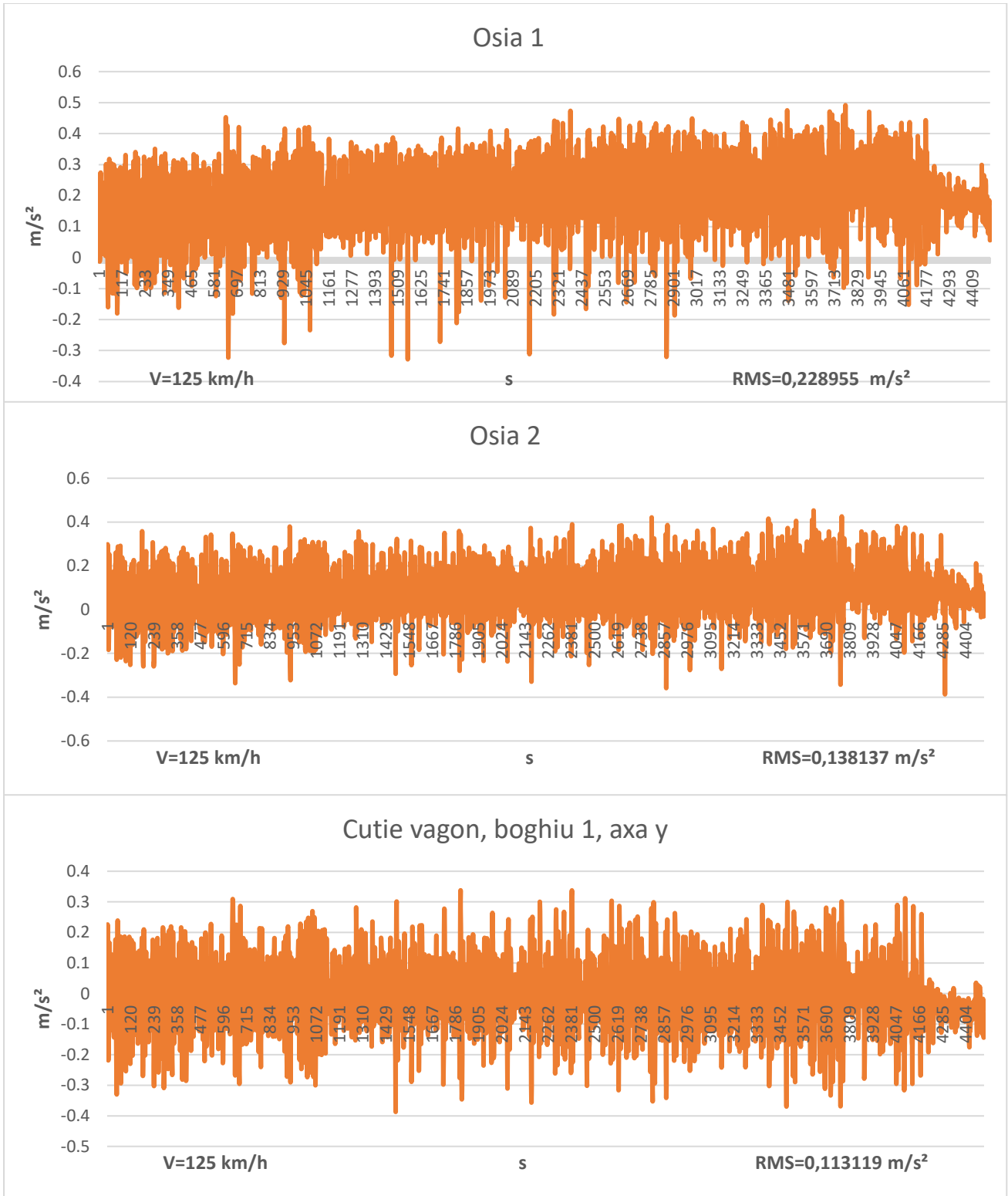
Fig.8.2.1. Graficele cu valorile vibrațiilor înregistrate de cele 6 accelerometre la prima trecere peste prima curbă, de la km 2 pana la km 5 cu vagonul gol

Datele înregistrate de cele 6 accelerometre la prima trecere a vagonului încărcat, peste prima curbă, sunt prezentate în 4 grafice care ilustrează vibrațiile transversale (pe axa Y) și două grafice care ilustrează vibrațiile verticale (pe axa Z). Valorile accelerațiilor transversale înregistrate pe cele 2 osii au valori aproximativ egale, valorile pe al doilea boghiu se dublează în raport cu valorile de pe osii. Valorile accelerațiilor de pe primul boghiu sunt jumătate față de valorile de pe al doilea boghiu.

Graficele care reprezintă vibrațiile verticale arată că la al doilea boghiu valorile se dublează față de valorile de pe primul boghiu.

In cazul vagonului gol măsurătorile s-au făcut prin 9 treceri cu vagonul încărcat, peste curba 1 la viteze relativ apropiate 105 km/h, 110 km/h si 115 km/h.

8.3.1. Vibrațiile înregistrate la trecerea 1 peste curba 2, vagonul gol.



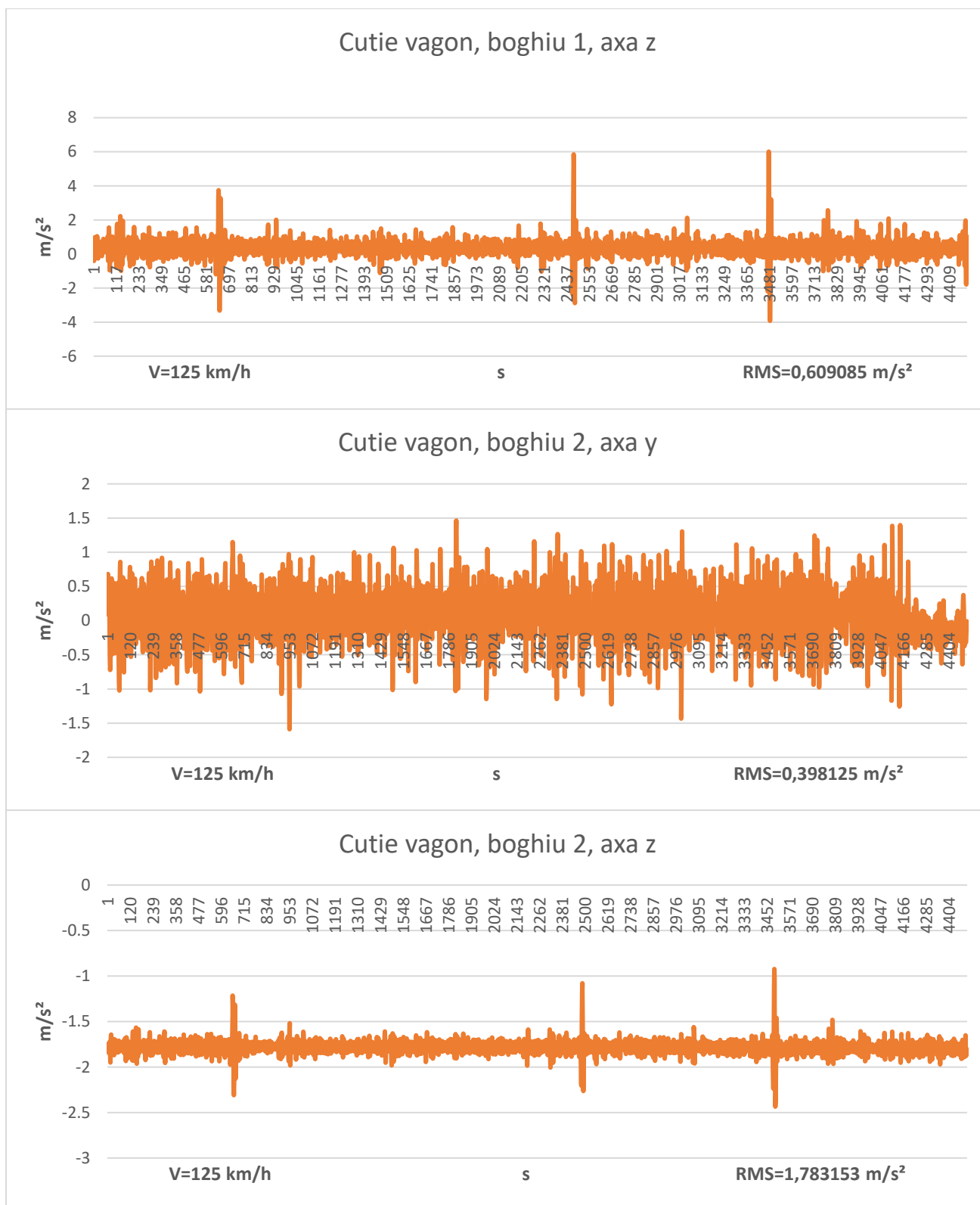


Fig.8.3.1. Graficele cu valorile vibrațiilor înregistrate de cele 6 accelerometre la prima trecere peste a doua curba, de la km 9 pana la km 12.cu vagonul gol

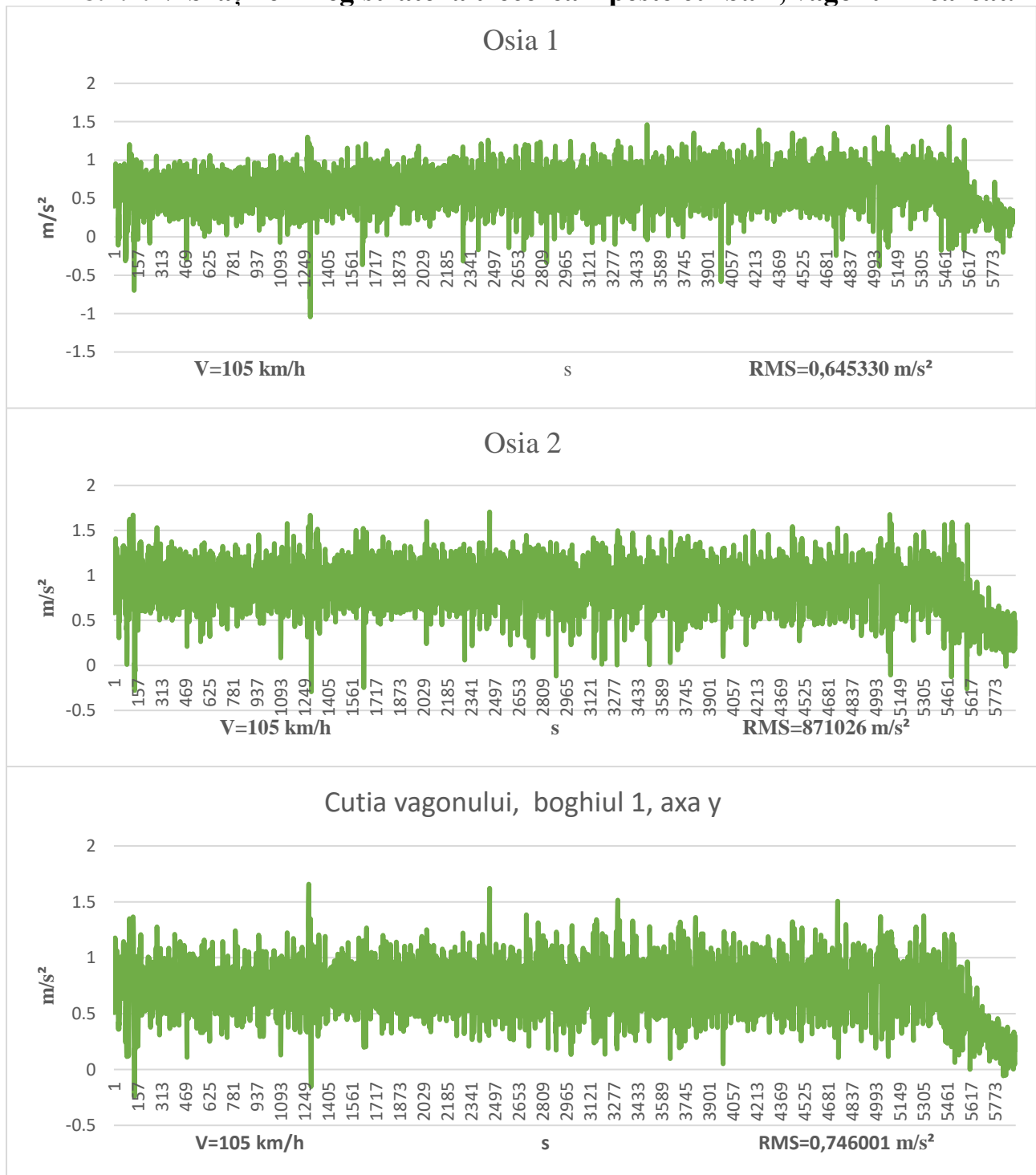
Datele înregistrate de cele 6 accelerometre la a doua trecere a vagonului gol, peste a doua curbă, sunt prezentate în 4 grafice care ilustrează vibrațiile transversale (pe axa Y) și două grafice care ilustrează vibrațiile verticale (pe axa Z). Valorile accelerațiilor transversale înregistrate pe cele 2

osii au valori aproximativ egale, valorile pe al doilea boghiu se dublează în raport cu valorile de pe osii. Valorile accelerațiilor de pe primul boghiu sunt jumătate față de valorile de pe al doilea boghiu.

Graficele care reprezintă vibrațiile verticale arată că la al doilea boghiu valorile se dublează față de valorile de pe primul boghiu și se situează doar în partea negativă a axei.

În cazul vagonului gol măsurătorile s-au făcut în timpul celor 9 ture pe inel, peste curba 1 și peste curba 2 la viteze relativ apropiate 125 km/h, 130 km/h și 135 km/h.

8.4.1. Vibrațiile înregistrate la trecerea 1 peste curba 2, vagonul încărcat.



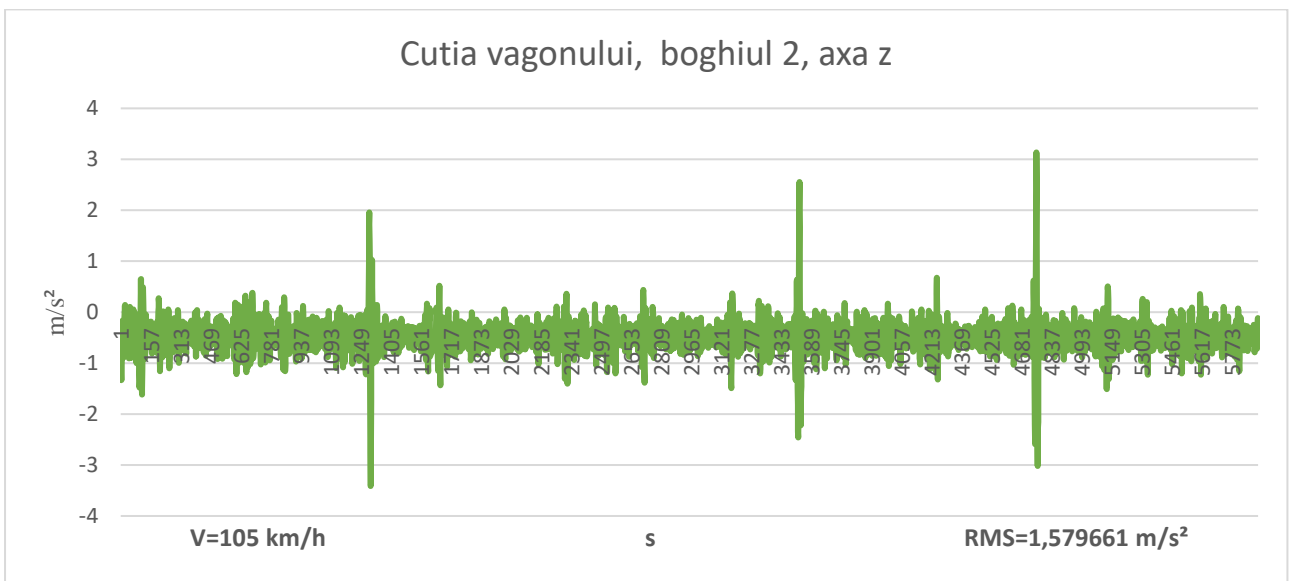
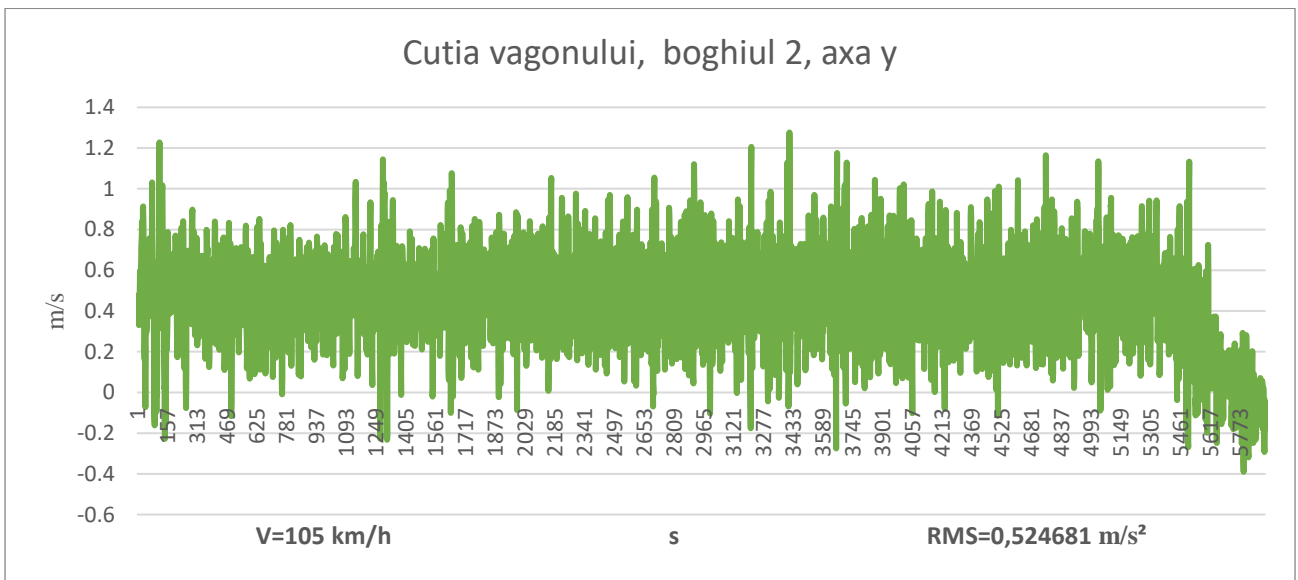
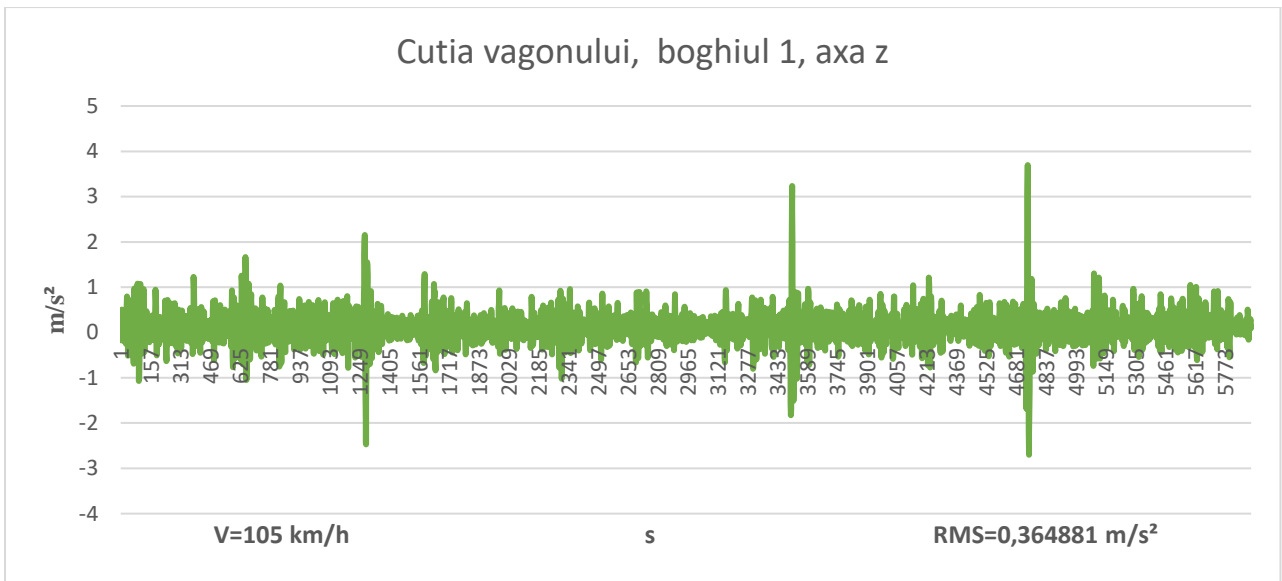


Fig.8.4.1. Graficele cu valorile vibrațiilor înregistrate de cele 6 accelerometre la prima trecere peste a doua curba, de la km 9 pana la km 12.cu vagonul încărcat

În cazul vagonului încărcat, măsurătorile s-au făcut în timpul celor 5 ture pe inel, peste curba 1 și peste curba 2 la viteze relativ apropiate 105 km/h, 110 km/h și 115 km/h.

S-au înregistrat perturbații cu caracter determinist la joante și în lungul șinei pe direcția verticală și pe direcția transversală pe cale.

Masele suspendate ale vehiculului, la mișcarea pe cale, produc vibrații care sunt întreținute de mișcările osiilor.

Știind efectul perturbator care exprimă deplasarea în funcție de timp a osiei, se poate aprecia teoretic calitatea mersului unui vehicul și, totodată, se poate determina cum se pot schimba principalii parametri constructivi ai sistemului vibrant pentru creșterea performanțelor dinamice ale vehiculului.

Ondularea șinelor între traverse și rulara roților peste neregularitățile și discontinuitățile căii produc, în general, vibrații ale căii și în același timp vibrații verticale ale osiilor. Analizând calitatea mersului trebuie să se știe dacă cum vibrațiile suprastructurii căii influențează vibrațiile maselor suspendate ale vehiculului.

Rigiditatea căii este, de regulă, foarte mare în comparație cu rigiditatea suspensiilor și, corespunzător cu aceasta, și frecvențele proprii ale vehiculelor (de ordinul hertzilor) sunt mult mai scăzute față de cele ale suprastructurii (de ordinul zecilor de hertzi), vibrațiile suprastructurii sunt o perturbare supracritică pentru sistemul vibrant al vehiculelor (peste rezonanță), raza unde amplitudinile mici ale vibrațiilor suprastructurii pot fi reduse aproape complet de suspensiile vehiculelor.

Din acest motiv, aproape în toate lucrările teoretice care studiază sistemul vibrant al vehiculelor, elasticitatea verticală a căii nu se ia în calcul față de elasticitatea suspensiilor. De aceea rezultă și simplificarea studiului teoretic al vibrațiilor la vehiculele feroviare, care în acest mod se pot considera maxim cu două mase vibrante - masa suspendată a boghiului și masa cutiei, în loc de trei mase, unde cea de a treia ar fi masa nesuspendată completată cu sarcina redusă a suprastructurii căii (acea parte din masa căii care este considerată că participă la mișcarea vibratorii).

CAPITOLUL 9

Analiza datelor măsurate experimental pe axa Y și axa Z

Comportamentul unui vagon cisternă într-o curbă poate fi afectat de o serie de factori, inclusiv viteza vagonului, raza curbei, greutatea și distribuția încărcăturii și starea șinei. Una dintre consecințele potențiale ale unui vagon cisternă care negociază o curbă este apariția vibrațiilor.

Vibrațiile pot apărea atunci când forțele care acționează asupra vagonului, inclusiv forțele centripete și gravitația, fac ca vagonul să se miște sau să se balanseze într-un anumit mod. Forma și distribuția greutateii rezervorului, precum și prezența oricărui lichid sau gaz în interior, pot afecta, de asemenea, modul în care vagonul se comportă într-o curbă.

Dacă vibrațiile sunt severe, ele pot cauza deteriorarea vagonului, a șinei sau a altor echipamente. În unele cazuri, acestea pot duce chiar la o deraiere. Prin urmare, este important ca operatorii feroviari să ia măsuri pentru a minimiza apariția vibrațiilor și pentru a se asigura că vagoanele cisternă funcționează în siguranță și fără probleme în curbe. Aceasta poate include măsuri precum reducerea vitezei, îmbunătățirea întreținerii căii sau modificarea designului vagonului cisternă.

Ca urmare studiul comparativ, al vibrațiilor înregistrate pe accelerometrele montate pe cutiile vagonului și pe osii, duce la verificare practică a comportării vagonului în situațiile întâlnite în exploatare.

Studierea datelor obținute experimental la trecerea peste curba 1,

9.1. Vibrațiile înregistrate pe axa Y, la trecerea pe curba 1

Vibrațiile înregistrate la trecerea vagonului cisternă, gol, cu viteza de 125 km/h și vagonul încărcat, cu viteza de 105 km/h la trecerea peste curba 1.

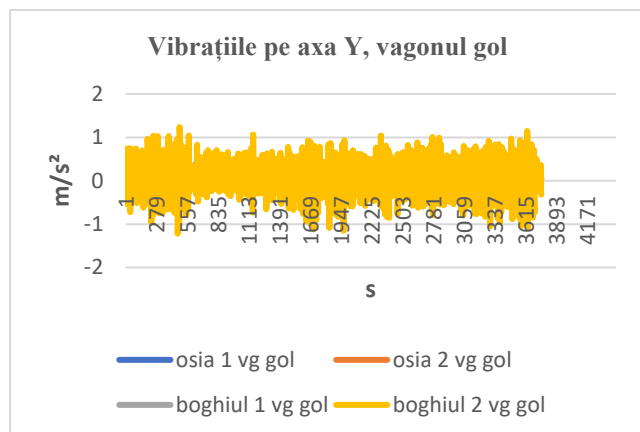


Fig. 9.1.1. Graficul vibrațiilor înregistrate pe axa Y la prima trecerea, peste curba 1, la viteza de 125 km/h, cu vagonul gol,

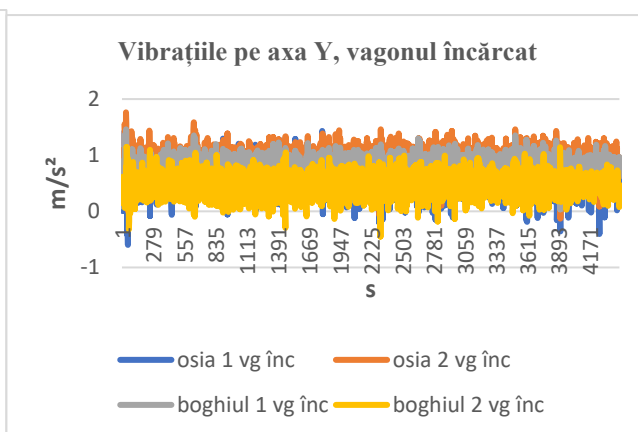


Fig. 9.1.2. Graficul vibrațiilor înregistrate pe axa Y, la prima trecerea peste curba 1, la viteza de 105 km/h, cu vagonul încărcat,

În cazul vagonului gol, vibrațiile înregistrate pe axa y, de accelerometrul montat la mijlocul cuteia vagonului în dreptul celui de al doilea boghiu, a înregistrat cele mai mari valori, indiferent de viteză. Celelalte valori, înregistrate pe axa Y, de celelalte 3 acceloremetre sunt mai mici, atat valorile pozitive cat si valorile negative.

În cazul vagonului încărcat, vibrațiile înregistrate pe axa y, de accelerometrul montat pe osia 2 a primului boghiu, a înregistrat cele mai mari valori pozitive, indiferent de viteză.

9.2. Vibrațiile înregistrate pe axa Z, la trecerea pe curba 1

Vibrațiile înregistrate la trecerea vagonului cisternă, gol cu viteze de 125 km/h și vagonul încărcat cu vitezele de 105 km/h la trecerea peste curba 1.

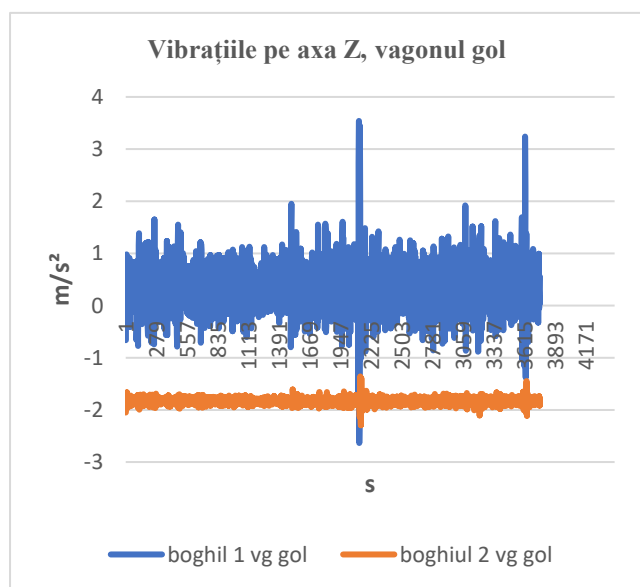


Fig. 9.2.1. Graficul vibrațiilor înregistrate pe axa Z,

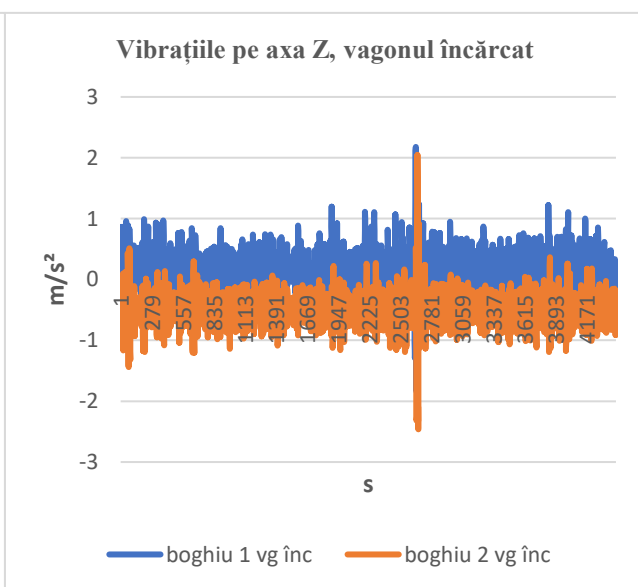


Fig. 9.2.2. Graficul vibrațiilor înregistrate pe axa Z,

la prima trecerea, peste curba 1, la viteza, de 125 km/h, cu vagonul gol,

la prima trecerea peste curba 1, la viteza de 105 km/h, cu vagonul încărcat,

În cazul vagonului gol, vibrațiile înregistrate pe axa Z, de accelerometrul montat la mijlocul cutiei vagonului în dreptul primului boghiu, a înregistrat cele mai mari valori, indiferent de viteză. Celelalte valori, înregistrate pe axa Z, de celelalte accelerometre sunt mai mici, și au doar valorile negative.

În cazul vagonului încărcat, vibrațiile înregistrate pe axa Z de accelerometrul montat pe cutia vagonului în dreptul boghiului 1, a înregistrat cele mai mari valori pozitive, indiferent de viteză. Valorile înregistrate pe boghiul 2 sunt mai mici, având valori atât pozitive cât și negative.

9.3. Vibrațiile înregistrate pe axa Y, la trecerea pe curba 2

Vibrațiile înregistrate la trecerea vagonului cisternă, gol cu viteza de 125 km/h și vagonul încărcat cu viteza de 105 km/h, la trecerea peste **curba 2**.

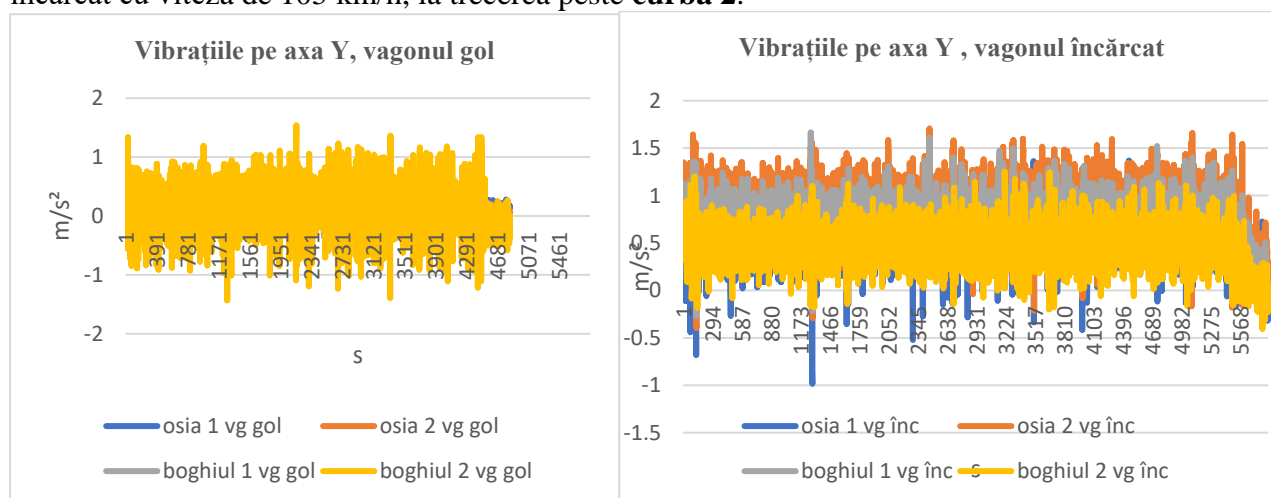


Fig. 9.3.1. Graficul vibrațiilor înregistrate pe axa Y, la prima trecerea, peste curba 2, la viteza de 125 km/h, cu vagonul gol,

Fig. 9.3.2. Graficul vibrațiilor înregistrate pe axa Y, la prima trecerea peste curba 2, la viteza de 105 km/h, cu vagonul încărcat,

În cazul vagonului gol, vibrațiile înregistrate pe axa y, de accelerometrul montat la mijlocul cutiei vagonului în dreptul celui de al doilea boghiu, a înregistrat cele mai mari valori, indiferent de viteză. Celelalte valori, înregistrate pe axa Y, de celelalte 3 accelerometre sunt mai mici, atât valorile pozitive cât și valorile negative.

În cazul vagonului încărcat, vibrațiile înregistrate pe axa y, de accelerometrul montat pe osia 2 a primului boghiu, a înregistrat cele mai mari valori pozitive, indiferent de viteză.

9.4. Vibrațiile înregistrate pe axa Z, la trecerea pe curba 2

Vibrațiile înregistrate la trecerea vagonului cisternă, gol cu viteza 125 km/h și vagonul încărcat cu viteza de 105 km/h, la trecerea peste **curba 2**.

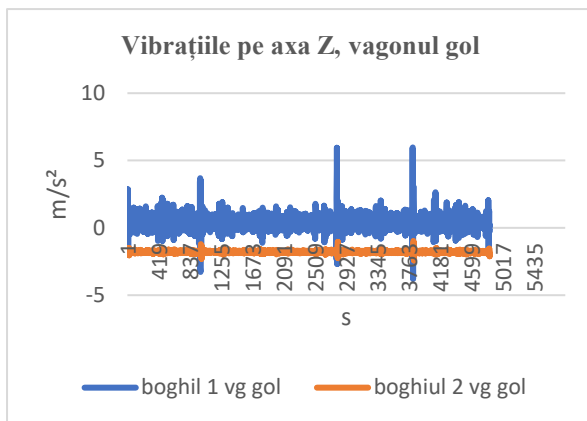


Fig. 9.4.1. Graficul vibrațiilor înregistrate pe axa Z, la prima trecerea, peste curba 2, la viteza de 125 km/h, cu vagonul gol,

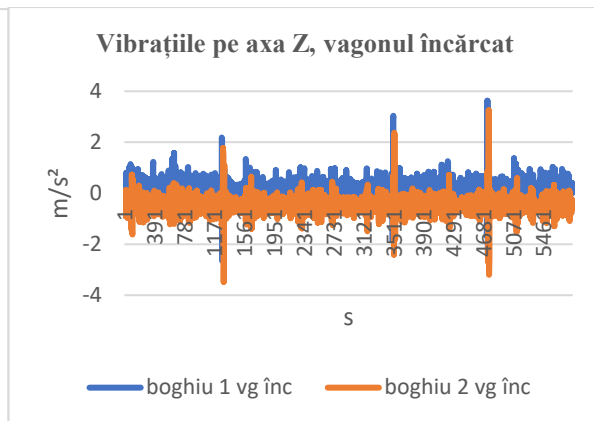


Fig. 9.4.2. Graficul vibrațiilor înregistrate pe axa Z, la prima trecerea peste curba 2, la viteza de 105 km/h, cu vagonul încărcat,

Concluzii

Din analiza graficelor care prezintă datele obținute experimental, la trecerea peste curba 1, cât și la trecerea peste curba 2, rezultă ca vibrațiile pe **axa Y** sunt aproximativ aceleasi indiferent de variația vitezei sau a curbei pe care s-au făcut înregistrările.

În cazul vagonului **gol** valorile înregistrate de accelerometrul montat de cutia vagonului în dreptul boghiului al doilea sunt cele mai mari, practic pe graficul care ilustrează toate valorile măsurate pe axa Y, nu se mai văd celelalte valori înregistrate, aici intervine fenomenul de șerpuire, la al doilea boghiu toate accelerațiile se măresc. În cazul vagonului **încărcat**, fenomenul de șerpuire se atenuează. Masa încărcăturii apasă vagonul pe șină și șerpiurea nu mai este determinată. Valorile cele mai mari ale vibrațiilor s-au înregistrat la osia a doua de la primul boghiu. În cazul vagonului încărcat intervalul de măsurare a fost cu câteva secunde mai mare, înregistrându-se și ieșirea din curbă. Astfel valorile accelerațiilor pe axa y, descresc odata cu forța centrifugă.

În cazul vagonului **gol**, vibrațiile înregistrate pe **axa Z**, de accelerometrul montat la mijlocul cutiei vagonului în dreptul primului boghiu, a înregistrat cele mai mari valori, indiferent de viteză. Celelalte valori, înregistrate de accelerometru montat pe boghiul al doilea, pe axa Z, sunt mai mici, și au doar valorile negative.

În cazul vagonului **încărcat**, vibrațiile înregistrate pe axa Z de accelerometrul montat pe cutia vagonului în dreptul boghiului 1, a înregistrat cele mai mari valori pozitive, indiferent de viteză. Valorile înregistrate pe boghiul 2 sunt mai mici, având valori atât pozitive cât și negative.

În cazul valorilor înregistrate pe axa Z, toate graficele prezintă în aceleasi locuri salturi mari ale valorilor. La trecerea peste curba 1 este un singur loc unde valorile înregistrează o dublare a valorilor, atât în spectrul pozitiv cât și în spectrul negativ, la trecerea peste curba 2 sunt 3 segmente în care s-au măsurat triplăți ale valorilor.

Vârfulurile valorilor ilustrează necesitatea eliminării trecerilor de nivel și a joantelor datorită punctelor critice pe care le generează pe calea de rulare.

PARTEA IV. ANALIZA STATISTICĂ A DATELOR ÎNREGISTRATE PE VAGON

Capitolul 10

Analiza statistică - RMS rădăcina medie pătratică

Toate intervalele de timp în care s-au făcut măsurători au fost împărțite în intervale de 3 secunde și pentru fiecare interval s-au calculate RMS. Tabelele în care s-au calculate rădăcinile medii pătratice sunt în anexa 3

Datele obținute experimental au fost prelucrate, s-au calculat rădăcinile medii pătratice pentru toate situațiile studiate.

Avem patru cazuri:

Vagonul **gol** la trecerea peste **curba 1**, sunt date pentru 9 treceri, 3 cu viteza de **125 km/h**
3 cu viteza de **130 km/h**
3 cu viteza de **135 km/h**

Vagonul **gol** la trecerea peste **curba 2**, sunt date pentru 8 treceri 3 cu viteza de **125 km/h**
3 cu viteza de **130 km/h**
2 cu viteza de **135 km/h**

Vagonul **încărcat** la trecerea peste **curba 1**, sunt date pentru 5 treceri 2 cu viteza de **105 km/h**
1 cu viteza de **110 km/h**
2 cu viteza de **115 km/h**

Vagonul **încărcat** la trecerea peste **curba 2**, sunt date pentru 5 treceri 2 cu viteza de **105 km/h**
1 cu viteza de **110 km/h**
2 cu viteza de **115 km/h**

10.1. Cazul vagonului gol la trecerea peste curba 1.

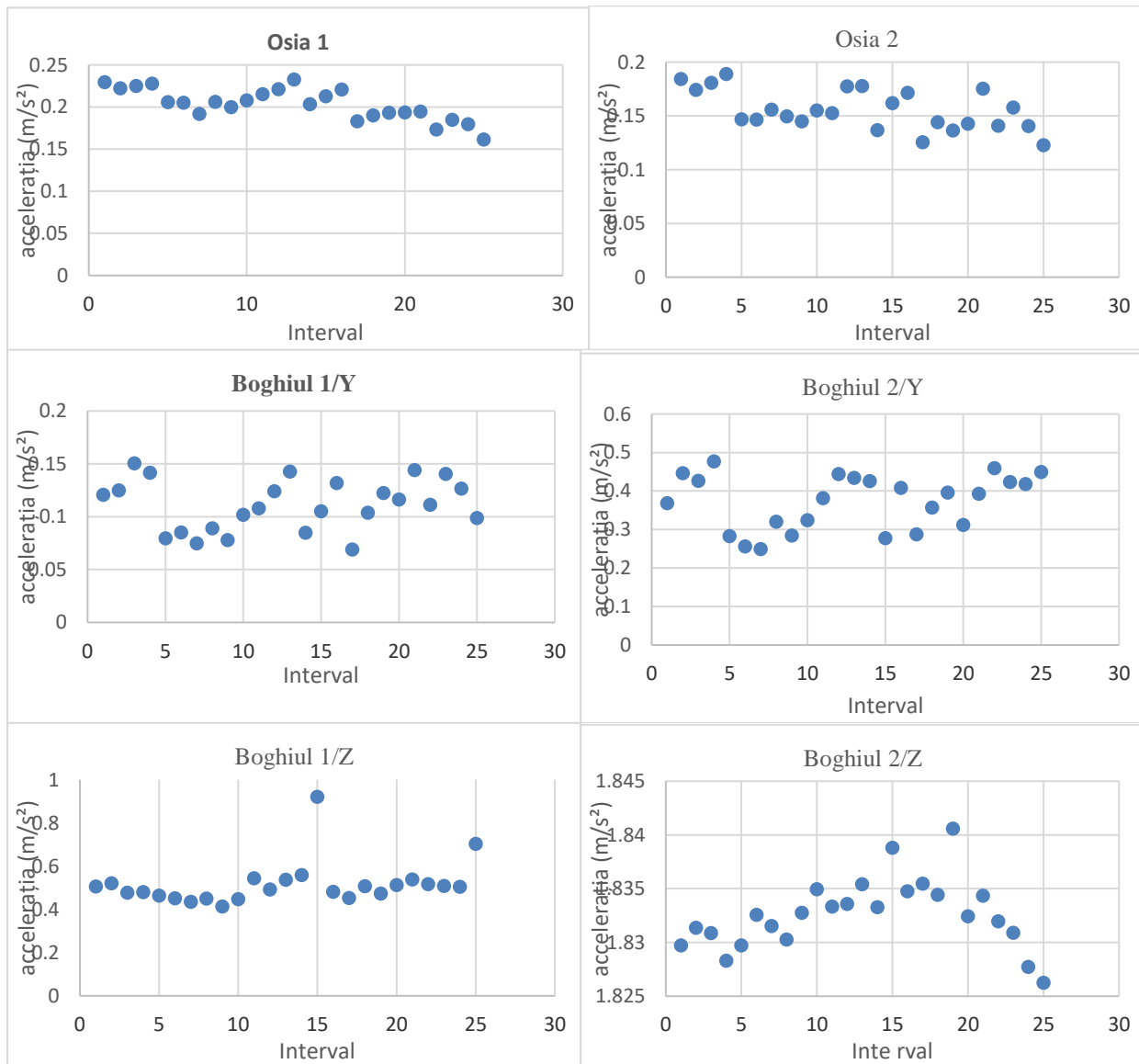
Trecerea 1, vagonul gol, curba 1, viteza = 125 km/h

	osia 1	osia 2	boghiul 1/Y	boghiul 1/Z	boghiul 2/Y	boghiul 2/Z
1	0.229740	0.184362	0.120849	0.505864	0.368157	1.829743
2	0.222349	0.174237	0.124946	0.520500	0.446528	1.831361
3	0.225210	0.180642	0.150652	0.476515	0.426598	1.830891
4	0.227803	0.188997	0.141765	0.479264	0.476463	1.828306
5	0.205804	0.146719	0.079591	0.463869	0.282354	1.829721
6	0.205333	0.146374	0.085183	0.451486	0.255659	1.832572
7	0.192087	0.155917	0.074842	0.434883	0.249099	1.831526
8	0.206276	0.149501	0.089122	0.450587	0.320087	1.830292
9	0.200034	0.144849	0.077921	0.412519	0.284283	1.832762
10	0.207848	0.154888	0.101782	0.447162	0.324171	1.834967
11	0.215290	0.152593	0.107946	0.543529	0.380849	1.833339
12	0.221104	0.177453	0.124148	0.492166	0.443959	1.833599
13	0.232693	0.177567	0.142754	0.536342	0.433583	1.835420
14	0.203504	0.136644	0.084955	0.559418	0.425258	1.833283
15	0.212846	0.161813	0.105282	0.921277	0.277327	1.838806
16	0.220806	0.171376	0.131972	0.480852	0.407921	1.834769
17	0.183093	0.125379	0.069054	0.452997	0.287215	1.835480

18	0.190215	0.143943	0.103865	0.507286	0.356472	1.834441
19	0.193485	0.136237	0.122359	0.472501	0.395933	1.840582
20	0.193560	0.142527	0.116339	0.512885	0.311491	1.832447
21	0.194703	0.175159	0.144086	0.537740	0.392871	1.834368
22	0.173304	0.140863	0.111192	0.516500	0.459494	1.831981
23	0.184814	0.157782	0.140443	0.508469	0.423569	1.830896
24	0.179739	0.140556	0.126675	0.503785	0.417707	1.827743
25	0.161633	0.122557	0.098915	0.703053	0.449033	1.826263

Tabelul 10.1.1. Valorile RMS calculate pentru vibrațiile înregistrate la prima trecere a vagonului gol, cu viteza 125 km/h, peste prima curbă, de la km 2 la km 5,

Reprezentarea grafică a datelor din tabel 10.1.1.



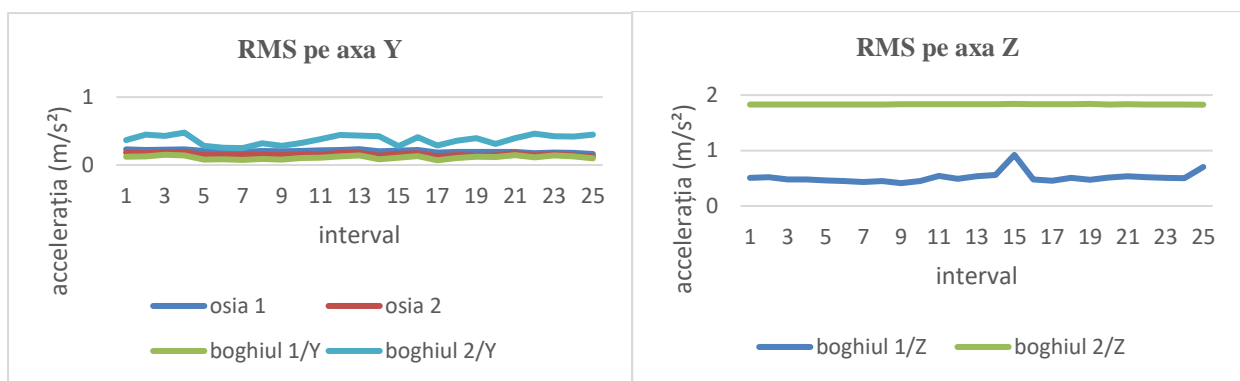


Fig.10.1.1. Graficele cu valorile RMS pentru vagonul gol, la trecerea 1, peste curba 1, cu viteza de 125 km/h

10.2. Cazul vagonului gol la trecerea peste curba 2

Studiul RMS in cazul vagonului gol la trecerea peste curba 2

Trecerea 1, vagonul gol, curba 2, viteza = 125 km/h

	osia 1	osia 2	bohiu 1/Y	boghiu 1/Z	boghiu 2/Y	boghiu 2/Z
1	0.182701	0.136217	0.132819	0.632907	0.424285	1.779465
2	0.187698	0.138601	0.124163	0.592723	0.426582	1.775321
3	0.188412	0.125195	0.125169	0.514522	0.413317	1.779793
4	0.180712	0.116298	0.102411	0.561961	0.400758	1.775743
5	0.205449	0.134708	0.123827	0.969544	0.448818	1.779613
6	0.191138	0.106372	0.094717	0.493442	0.288353	1.775935
7	0.223370	0.150420	0.138350	0.560458	0.463669	1.778042
8	0.211786	0.128506	0.122388	0.458920	0.327629	1.776008
9	0.201931	0.114446	0.088915	0.460325	0.342642	1.775794
10	0.221519	0.122024	0.108922	0.567072	0.350410	1.776120
11	0.220889	0.118142	0.101147	0.475093	0.354124	1.773722
12	0.222876	0.113535	0.092604	0.479046	0.297176	1.777578
13	0.236593	0.142612	0.116540	0.500436	0.463123	1.779011
14	0.233178	0.125869	0.105737	0.445584	0.397731	1.779657
15	0.236135	0.124881	0.104983	0.491339	0.326668	1.778657
16	0.246259	0.150594	0.129681	0.546989	0.469487	1.780491
17	0.240451	0.120563	0.088854	1.080633	0.383749	1.784955
18	0.240517	0.144483	0.119673	0.500130	0.449279	1.782105
19	0.252065	0.157342	0.132624	0.495654	0.438685	1.782122
20	0.261842	0.158634	0.119798	0.521349	0.412828	1.785711
21	0.242446	0.135147	0.090411	0.567734	0.387072	1.783003
22	0.247994	0.155505	0.113747	0.469299	0.368865	1.785282
23	0.250724	0.154624	0.118238	0.514428	0.403657	1.787587
24	0.258617	0.165589	0.125792	1.194383	0.391620	1.797593
25	0.271272	0.189040	0.152144	0.519437	0.542589	1.789149
26	0.267634	0.165451	0.111071	0.667308	0.322397	1.791902
27	0.265680	0.159490	0.101336	0.569245	0.422454	1.791197
28	0.249371	0.150875	0.125975	0.588947	0.422973	1.795916
29	0.197749	0.109687	0.059165	0.500318	0.181208	1.797873

30	0.180927	0.072608	0.069472	0.550078	0.241824	1.798386
----	----------	----------	----------	----------	----------	----------

Tabelul 10.2.1. Valorile RMS calculate pentru prima trecere a vagonului gol, cu viteza 125 km/h peste a doua curba de la km 9 la km 12

Reprezentarea grafică a datelor din tabel 10.2.1.

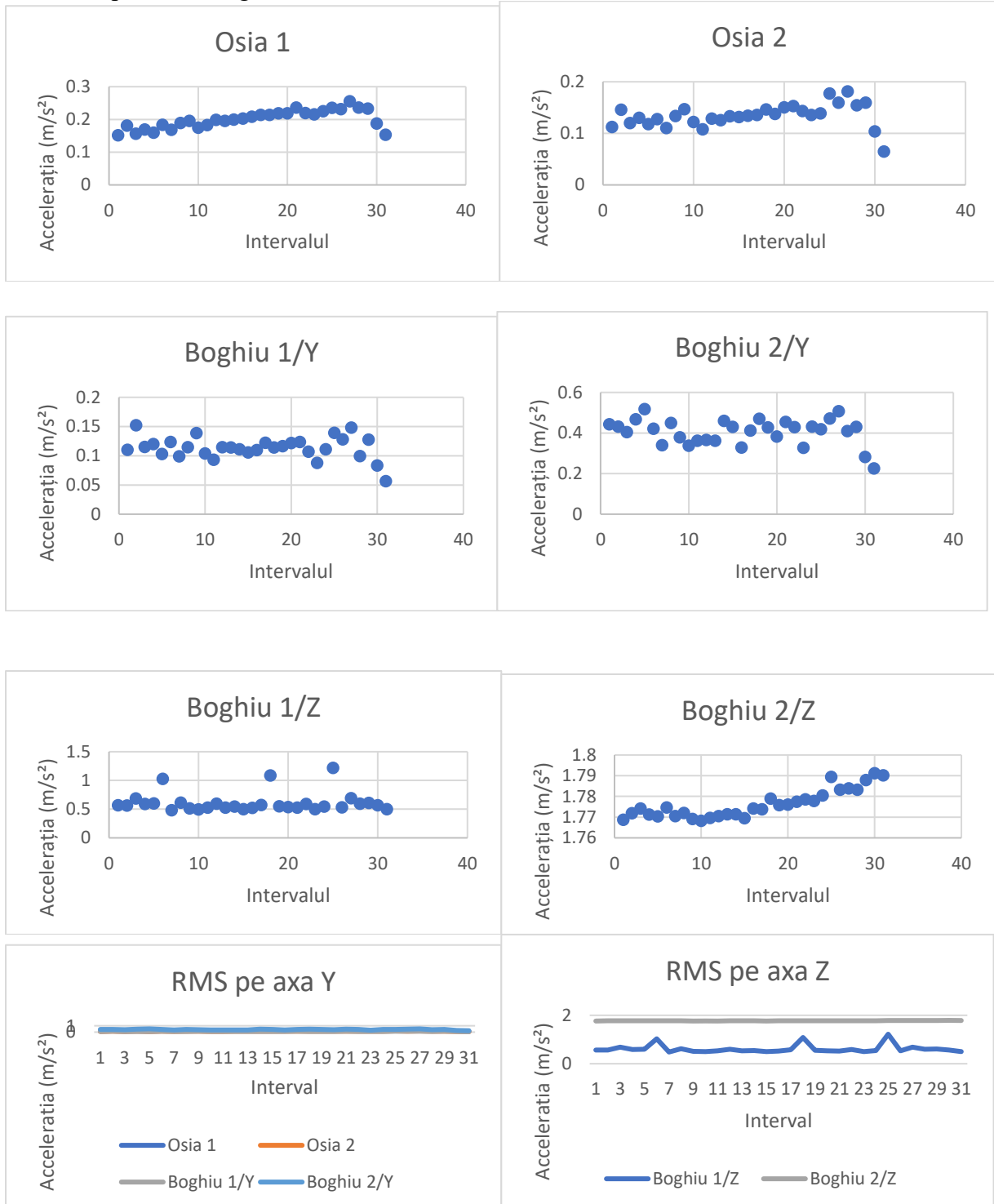


Fig. 10.2.1. Graficele cu valorile RMS pentru vagonul gol, la prima trecere, peste curba 2, cu viteza de 125 km/h

Concluzii

Rădăcina Medie Pătratică calculată pentru valorile măsurate experimental urmează aceeași tendință ca și graficele din Capitolul 8, doar că vârfurile de valori sunt atenuate.

Din analiza graficelor care prezintă valorile RMS, la trecerea peste curba 1, cât și la trecerea peste curba 2, rezultă ca valorile calculate pentru **axa Y** sunt aproximativ aceleași indiferent de variația vitezei sau a curbei pe care s-au făcut înregistrările.

În cazul vagonului descărcat RMS pe axa y cu valorile cele mai mari sunt valorile calculate pentru boghiul al doilea al vagonului.

În cazul vagonului descărcat, RMS pe axa Z cu valorile cele mai mari sunt valorile calculate pentru boghiul al doilea al vagonului.

Când vagonul este gol solicitările cele mai mari sunt la boghiul al doilea atât pentru vibrațiile înregistrate pe axa Y, cât și pe axa Z.

În cazul vagonului **încărcat** valorile calculate pentru accelerometrul montat pe osia a doua a primului boghiu al vagonului sunt cele mai mari, practic în toate graficele linia care ilustrează valorile calculate pentru vibrațiile de pe axa Y, este prima, are valoarea cea mai mare.

În cazul vagonului **încărcat**, vibrațiile înregistrate pe axa Z de accelerometrul montat pe cutia vagonului în dreptul boghiului 2, a înregistrat cele mai mari valori pozitive, indiferent de viteză. În cazul valorilor înregistrate pe axa Z, toate graficele prezintă în aceleași locuri salturi mari ale valorilor. La trecerea peste curba 1 este un singur loc unde valorile înregistrează o dublare a valorilor, atât în spectrul pozitiv cât și în spectrul negativ, la trecerea peste curba 2 sunt 3 locuri unde s-au înregistrat triplari ale valorilor.

Capitolul 11

Analiza valorilor calculate pentru Rădăcina Medie Pătrată a vibrațiilor măsurate pe axa Y

În cazul vagonului descărcat analiza valorilor obținute arată că valorile cele mai mari ale vibrațiilor s-au înregistrat pe cutia vagonului în dreptul boghiului al doilea pe axa Y, iar în cazul vagonului încărcat valorile cele mai mari au fost înregistrate de accelerometrul de montat pe osia 2

În această secțiune este prezentată o analiză a caracteristicilor RMS calculate pentru valorile vibrațiilor, pe axa Y, pe osia 1, osia 2, cutia vagonului la boghiul 1 și 2 pe baza prelucrării datelor experimentale înregistrate.

11.1. Analiza valorilor calculate pentru Rădăcina Medie Pătrată în cazul vagonului gol, la trecerea peste curba 1

Figurile 10.1.1.–10.1.9 ilustrează variațiile valorilor rădăcinilor medii pătratice înregistrate pe curba 1, cu viteze de 125 km/h, 130 km/h, 135 km/h, în dreptul osiei 1, osiei 2, cutia vagonului la mijlocul boghiului 1 și 2 pentru vagonul gol.

În toate graficele, accelerațiile RMS, măsurate pe osie și pe caroserie, scad odată cu viteza.

Valorile RMS calculate pentru boghiul 2 este in toate cazurile mai mare comparativ cu celelalte valori înregistrate pe axa Y.

Valorile RMS calculate pentru boghiul 1 este in toate cazurile mai mica comparativ cu celelalte valori înregistrate pe axa Y

In cazul valorilor calculate pentru vibrațiile înregistrate pe **osia 1**

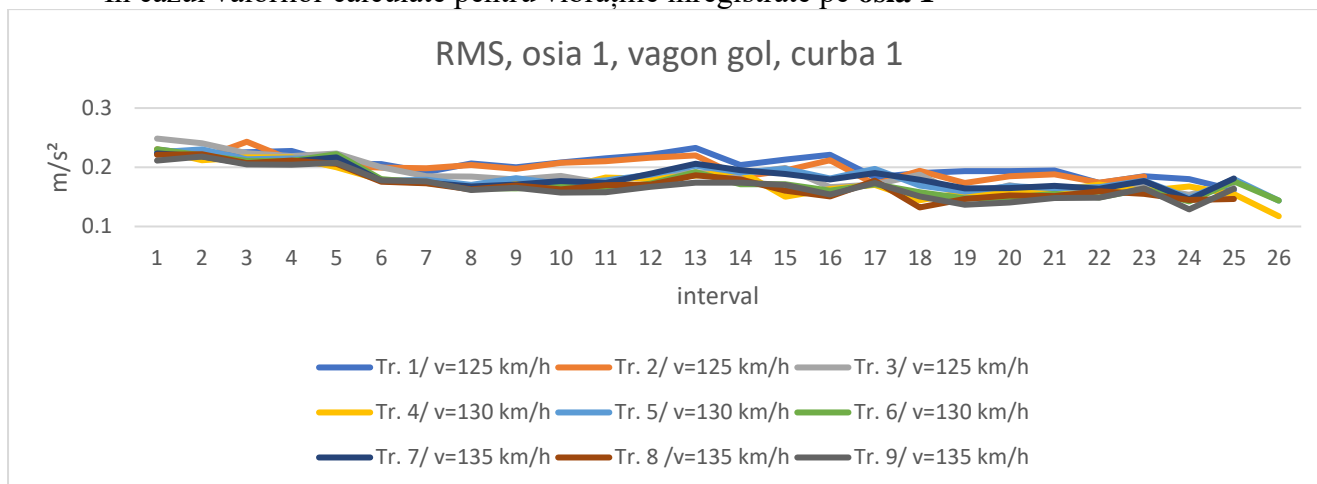


Fig. 11.1.1. Valorile RMS înregistrate de accelerometru montat pe prima osie, cu vagonul gol, pe curba 1, la toate cele 9 treceri succesive .

Pentru primele 5 puncte valorile RMS sunt cuprinse in intervalul 0,248480 – 0,204432, în următoarele 6 puncte valorile scad brusc și se încadrează între valorile 0,197461 – 0,157699, în punctul 12 și 13 valorile cresc și nu mai sunt apropiate, ca valoare, la toate trecerile, având intervalul între 0,232692 – 0,174134, urmează o scădere până în punctul 16 la valorile cuprinse în intervalul 0,220806 - 0,153835, în punctul 17 valorile se grupează in intervalul 0,197093 – 0,173319, în punctul 18 scad valorile, ajung în intervalul 0,193946 – 0,132170, între punctul 19 și 22 valorile variază liniar ajungând la intervalul 0,170736 – 0,148781, în punctul 23 se valorile cresc la intervalul 0,184537 – 0,155089, în punctul 24 scad la valorile 0,167393 – 0,128870.

În cazul valorilor calculate pentru vibrațiile înregistrate pe **osia 2**

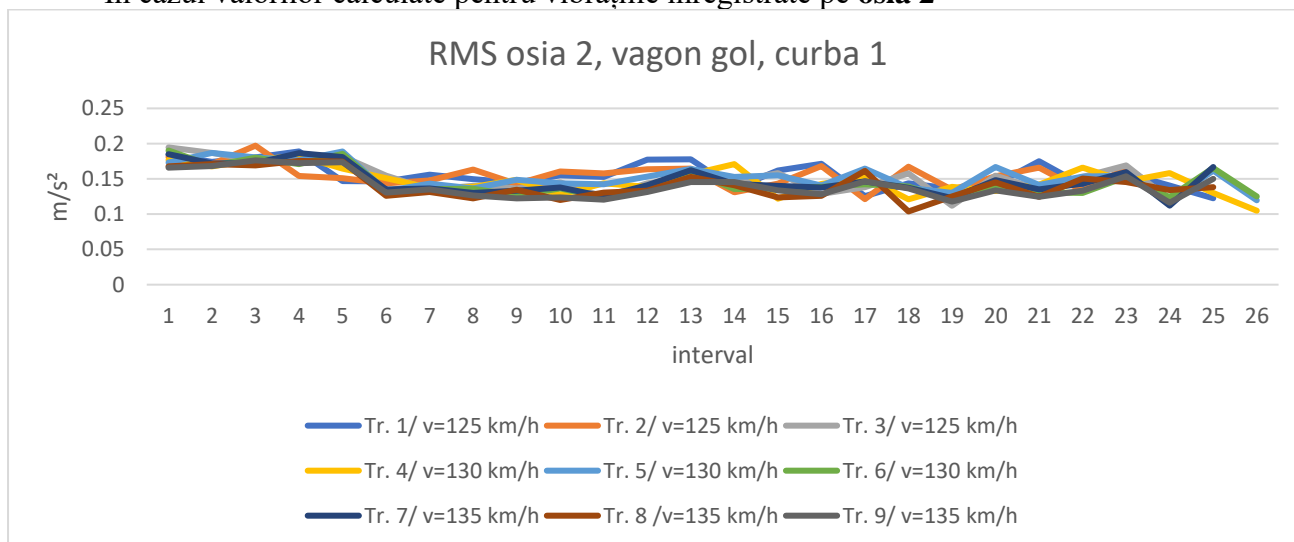


Fig. 11.1.2. Valorile RMS înregistrate de accelerometru montat pe a doua osie, cu vagonul gol, pe curba 1, la toate cele 9 treceri succesive .

Pentru primele 5 puncte valorile RMS sunt aproximativ lineare, cuprinse in intervalul 0,194650 – 0,173658, în următoarele 6 puncte valorile scad brusc, evoluând linear, și se încadrează între valorile 0,177452 – 0,131655, în punctul 12 și 13 valorile cresc, având intervalul între 0,177566

– 0,145342, urmează o variație în zig-zag pana la punctul 26, valorile maxime calculate în punctul 21, cu intervalul valoric 0,175159 – 0,124782.

În cazul valorilor calculate pentru vibrațiile înregistrate pe cutia vagonului la **boghiul 1**

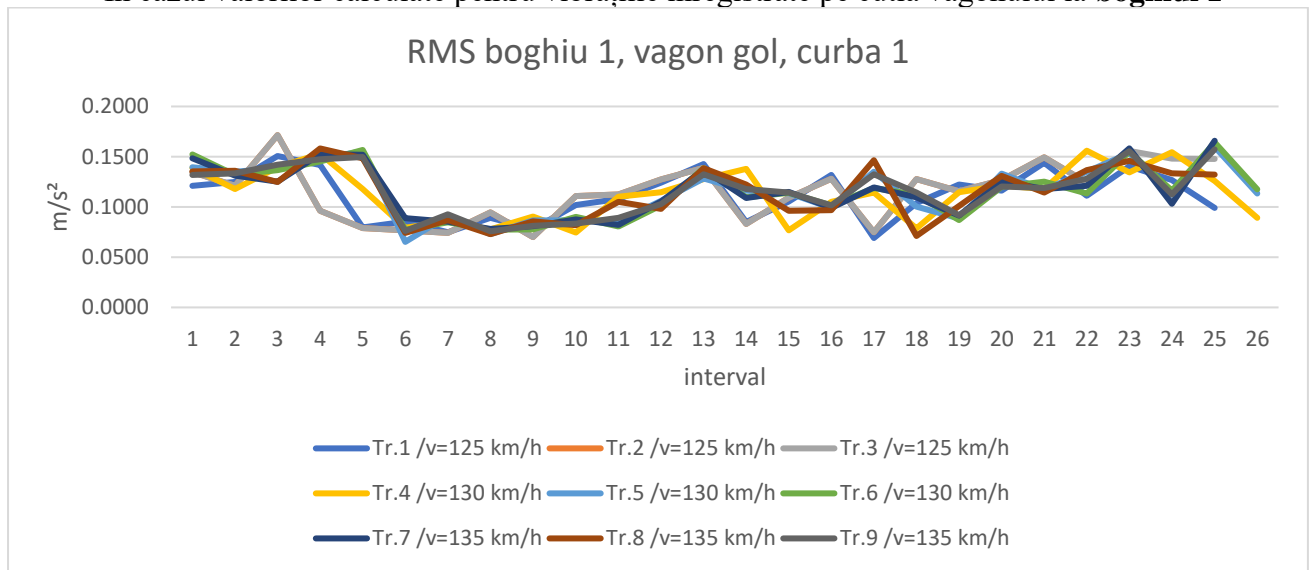


Fig. 11.1.3. Valorile RMS înregistrate de accelerometru montat pe boghiul 1, cu vagonul gol, pe curba 1, la toate cele 9 treceri succesive .

Pentru primele 4 puncte valorile RMS sunt lineare cuprinse in intervalul 0,171452 – 0,124848, în următoarele 2 puncte valorile scad brusc și ajung la valori în intervalul 0,07621 – 0,065196, până în punctul 11 au o variație pe același palier de valori, în punctul 11, 12 și 13 valorile cresc la toate trecerile, alungând la intervalul 0,142754 – 0,132443, până la punctul 24 este o creștere în zig-zag. Valoarea cea mai mare este in punctul 25, cu 0,165872.

În cazul valorilor calculate pentru vibrațiile înregistrate pe cutia vagonului la **boghiul 2**

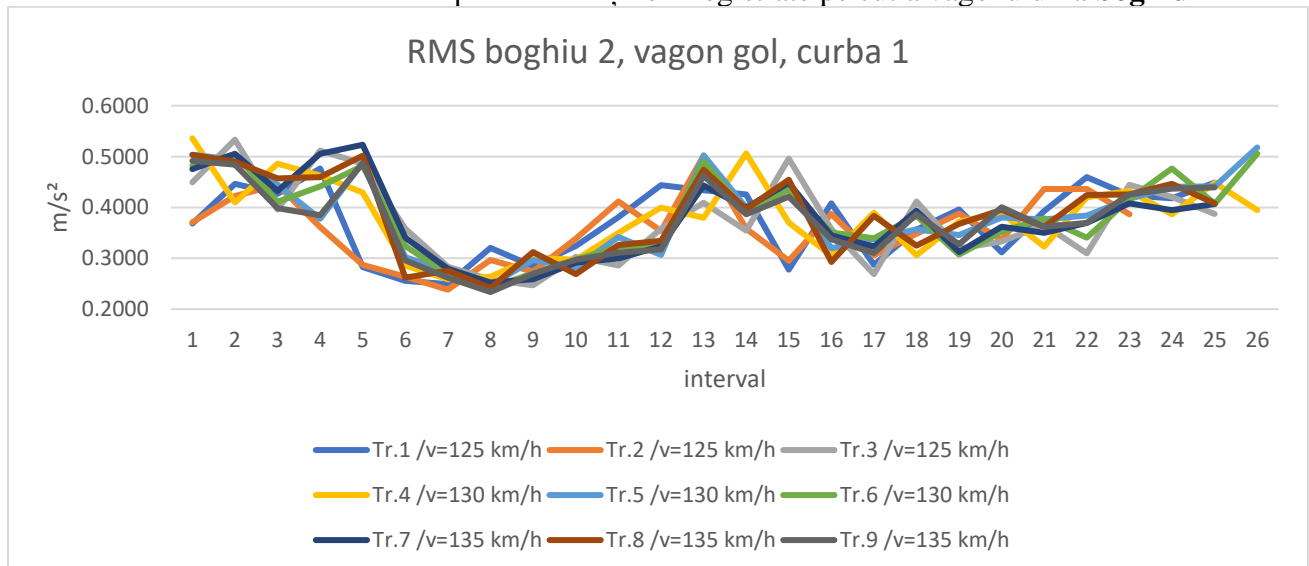


Fig. 11.1.4. Valorile RMS înregistrate de accelerometru montat pe boghiul 2, cu vagonul gol, pe curba 1, la toate cele 9 treceri succesive

Pentru primele 4 puncte valorile RMS sunt lineare cuprinse in intervalul 0,505346 – 0,384466, în următoarele 2 puncte valorile scad brusc și ajung la valori în intervalul 0,279730 – 0,26174, până în punctul 11 au o variație pe același palier de valori, în punctul 12, 13 și 14 valorile

cresc la toate trecerile, alungând la intervalul 0,502476 – 0,420932, până la punctul 24 este o creștere în zig-zag. Valoarea cea mai mare este în punctul 25, cu 0,505571.

11.2. Analiza valorilor calculate pentru Rădăcina Medie Pătrată în cazul vagonului gol, la trecerea peste curba 2

Figurile 10.2.1.–10.2.8 ilustrează variațiile valorilor rădăcinilor medii pătratice înregistrate pe curba 2, cu viteze de 125 km/h, 130 km/h, 135 km/h, în dreptul osiei 1, osiei 2, cutia vagonului la mijlocul boghiului 1 și 2 pentru vagonul gol. În toate graficele, accelerațiile RMS, măsurate pe osie și pe caroserie, scad odată cu viteza.

Valorile RMS calculate pentru boghiul 2 este în toate cazurile mai mare comparativ cu celelalte valori înregistrate pe axa Y, în cazul vagonului gol.

În cazul valorilor calculate pentru vibrațiile înregistrate pe **osia 1** la trecerea peste **curba 2**

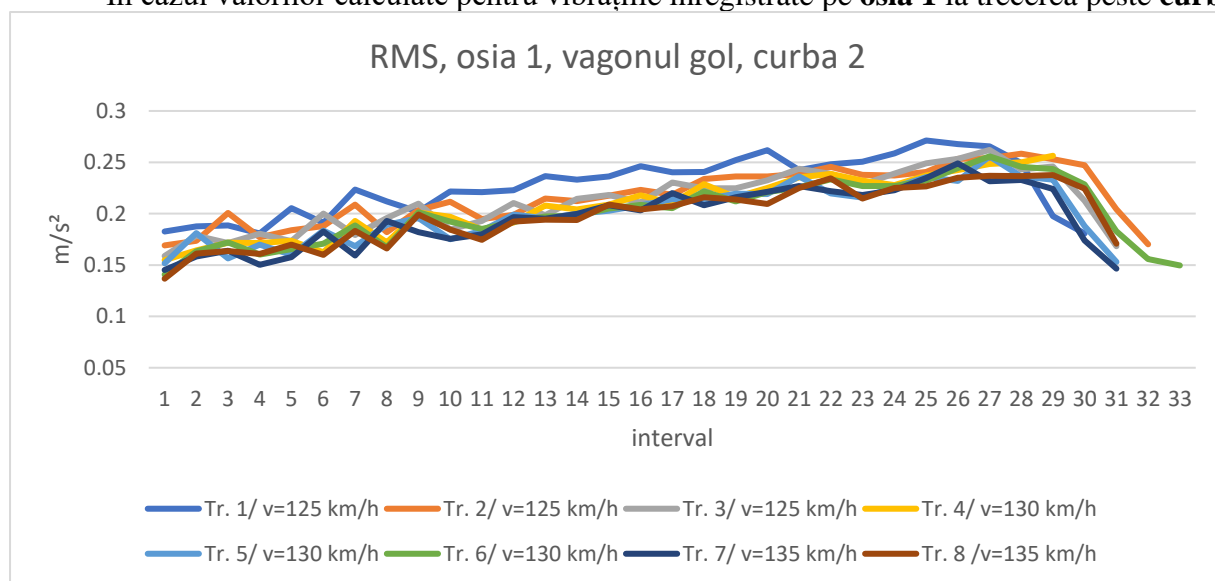


Fig. 11.2.1. Valorile RMS înregistrate de accelerometru montat pe prima osie, cu vagonul gol, pe curba 1, la toate cele 8 treceri succesive

La intrarea în curbă în punctul 1 valorile RMS sunt în intervalul 0,133626 – 0,1827 și până la punctul 26 se înregistrează o creștere în zig-zag până la valorile 0,242023 – 0,271271. Următoarele valori până la punctul 32 sunt descrescătoare ajungând în final la valorile 0,146559 – 0,222386

În cazul valorilor calculate pentru vibrațiile înregistrate pe **osia 2**

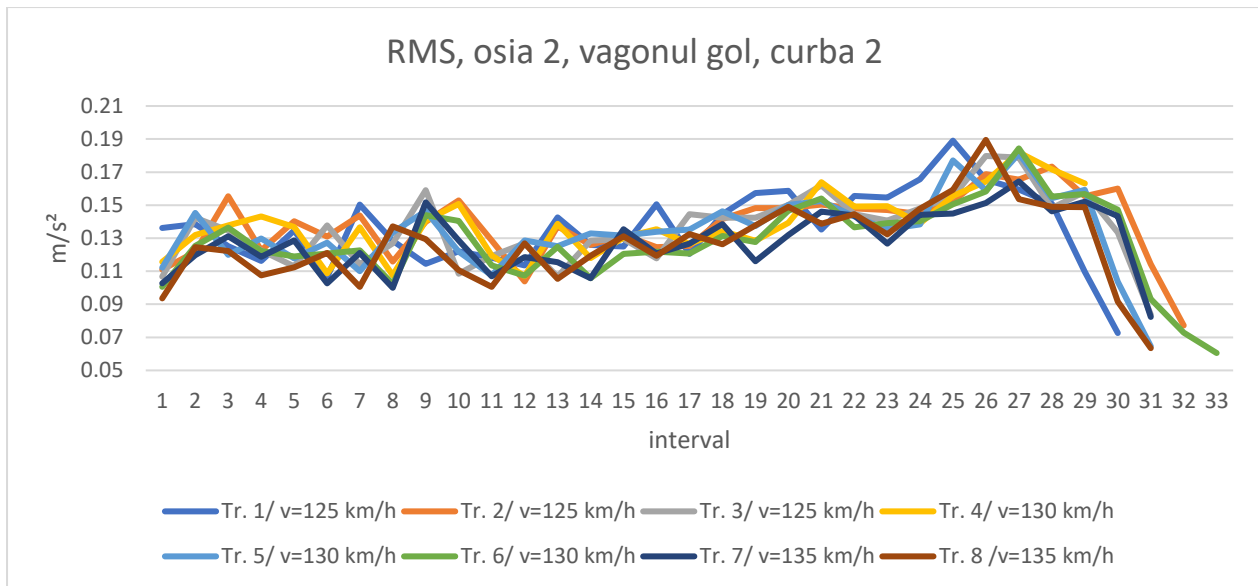


Fig. 11.2.2. Valorile RMS înregistrate de accelerometru montat pe a doua osie, cu vagonul gol, pe curba 2, la toate cele 8 treceri succesive .

Primele 3,4 puncte au valori crescătoare ajungând la valorile 0,132397 – 0,155390, în punctele 8,9 se înregistrează iar un vârf al RMS cuprins în intervalul 0,11121 – 0,15901. În continuare valorile RMS cresc aproximativ liniar până la punctul 23, 24 când s-a înregistrat un vârf al valorilor cuprins în intervalul 0,142555 – 0,189196. Până la sfârșitul graficului, punctul 32, este o scădere bruscă până la valorile 0,143294 – 0,036465.

În cazul valorilor calculate pentru vibrațiile înregistrate pe cutia vagonului la **boghiul 1**

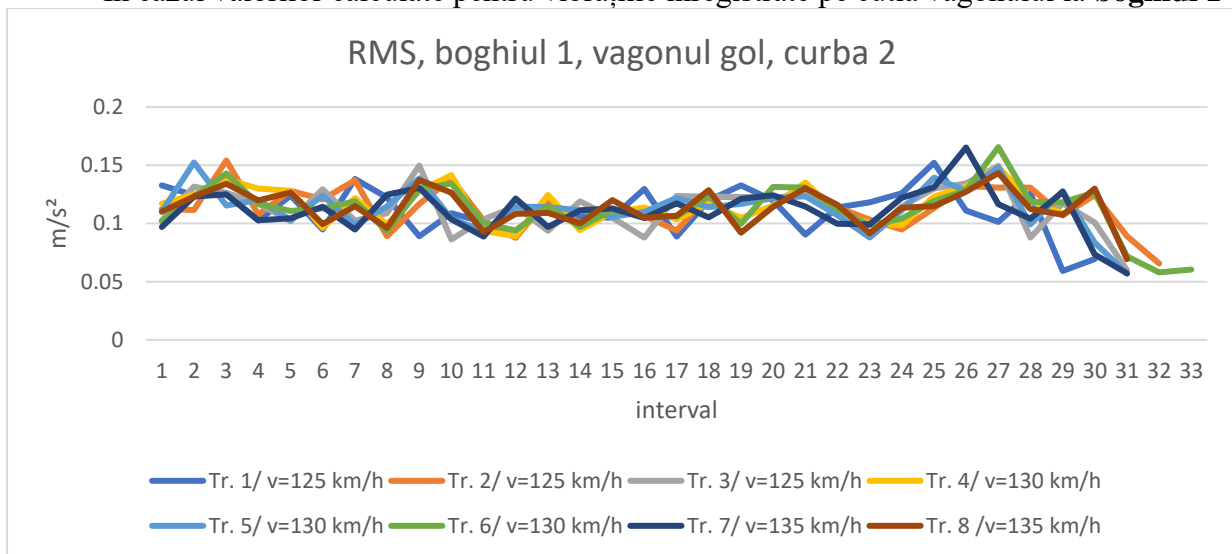


Fig. 11.2.3. Valorile RMS înregistrate de accelerometru montat pe boghiul 1, cu vagonul gol, pe curba 1, la toate cele 9 treceri succesive .

Valorile RMS calculate pentru vagonul gol, pe cutia vagonului în dreptul boghiului 1, la trecerea peste curba 2, au 3 vârfuri, primul în punctul 2,3 și ajunge la valorile 0,134015 – 0,154112, a doua creștere bruscă s-a înregistrat în punctul 9-11, cu valori cuprinse între 0,086247 – 0,149737, ultimul vârf al valorilor RMS este în punctele 25-27, cu valori cuprinse între 0,11361 – 0,165566.

După aceste creșteri se înregistrează o scădere până la valorile 0,108103 – 0,057972.

În cazul valorilor calculate pentru vibrațiile înregistrate pe cutia vagonului la **boghiul 2**

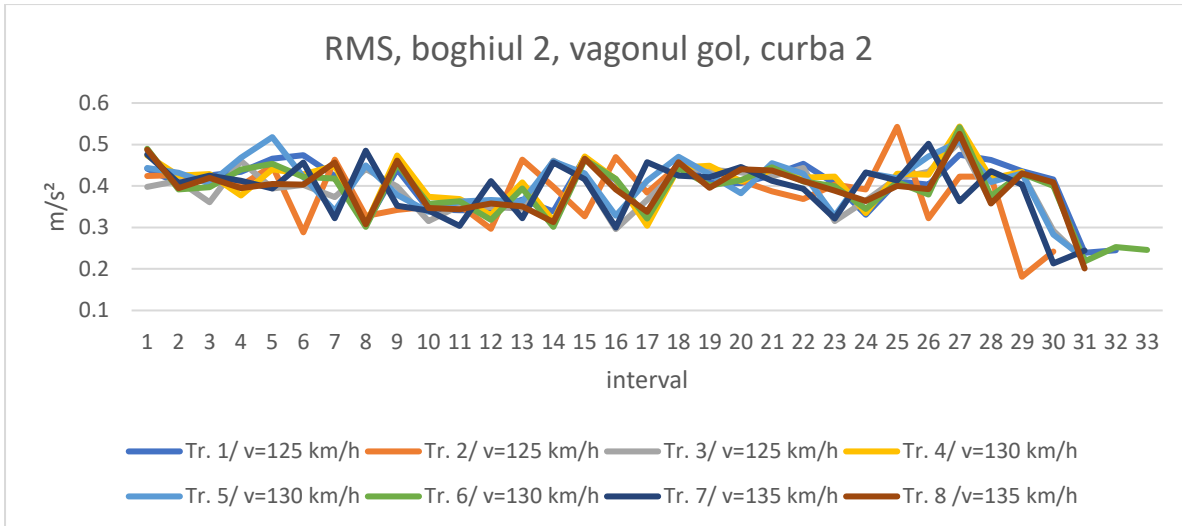


Fig. 11.2.4. Valorile RMS înregistrate de accelerometru montat pe boghiul 2, cu vagonul gol, pe curba 1, la toate cele 8 treceri succesive

Valorile RMS calculate pentru vagonul gol, în dreptul boghiului 2, sunt aproximativ liniare până în punctul 3, 4. Valorile în punctul 4, pentru toate cele 8 treceri, sunt cuprinse în intervalul 0,430237 – 0,394639. În intervalul punctelor 4-20 RMS are valori cu variații mari, în intervalul 0,288351 – 0,469162. Din punctul 24 până în punctul 30 sunt valori care variază brusc în intervalul 0,321755 – 0,574726. Valorile ultimelor puncte coboară brusc până la valoarea 0,181207.

11.3. Analiza valorilor calculate pentru Rădăcina Medie Pătrată în cazul vagonului încărcat, la trecerea peste curba 1.

Figurile 9.3.1.–9.3.5 ilustrează variațiile valorilor rădăcinilor medii pătratice înregistrate pe curba 1, cu viteze de 105 km/h, 110 km/h, 115 km/h, în dreptul osiei 1, osiei 2, cutia vagonului la mijlocul boghiului 1 și 2 pentru vagonul încărcat. În toate graficele, accelerațiile RMS, măsurate pe osie și pe caroserie, scad odată cu viteza.

Valorile RMS calculate pentru osia 2 este în toate cazurile mai mare comparativ cu celelalte valori înregistrate pe axa Y, în cazul vagonului încărcat.

În cazul valorilor calculate pentru vibrațiile înregistrate pe **osia 1**

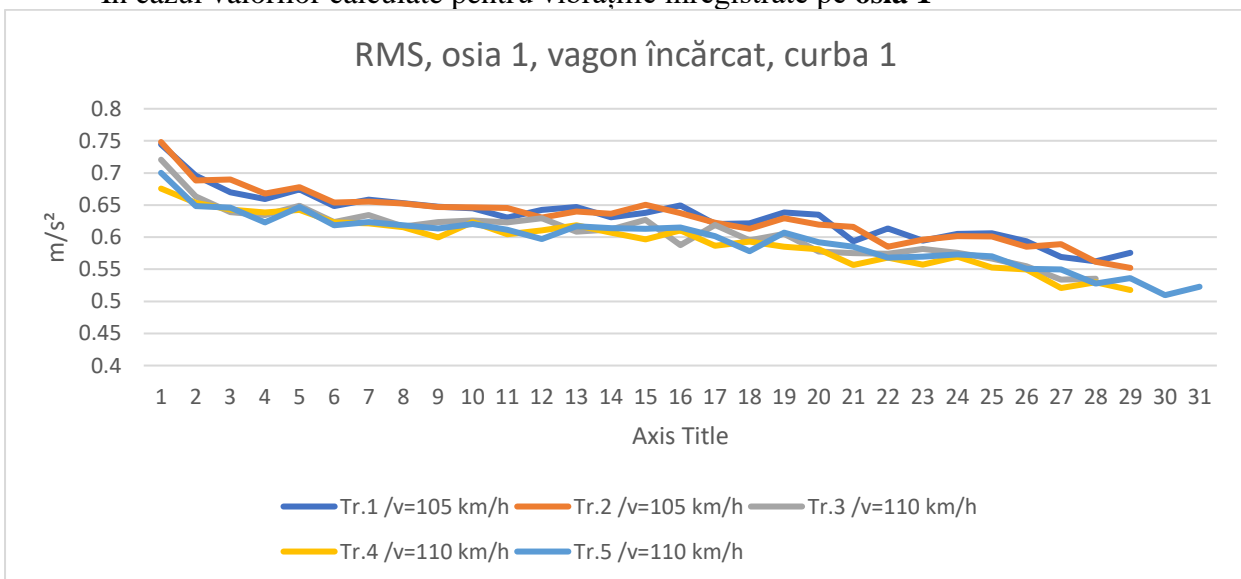


Fig. 11.3.1. Valorile RMS înregistrate de accelerometru montat pe prima osie, cu vagonul încărcat, pe curba 1, la toate cele 5 treceri succesive .

Valoarea RMS în cazul vagonului încărcat, la osia 1, pe curba 1, scade fără variații mari de la valorile 0,700202 – 0,720639 în punctul 1, până la 0,536079 – 0,57564 în punctul 29.

În cazul valorilor calculate pentru vibrațiile înregistrate pe **osia 2**

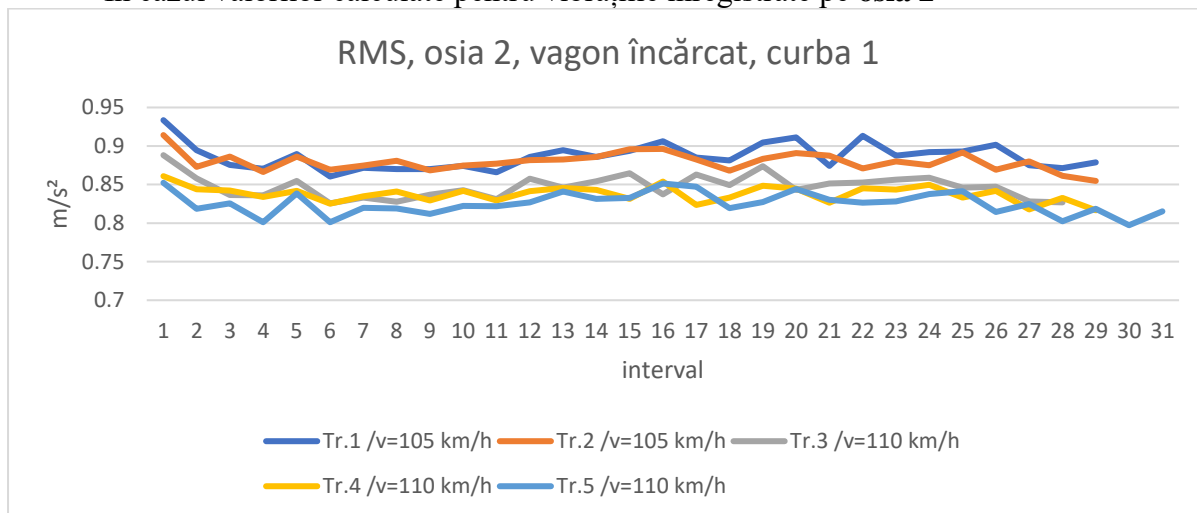


Fig. 11.3.2. Valorile RMS înregistrate de accelerometru montat pe a doua osie, cu vagonul încărcat, pe curba 1, la toate cele 5 treceri succesive .

În cazul vagonului încărcat, valorile RMS, calculate pentru vibrațiile înregistrate pe osia 2, în primele 2 puncte scad de la valorile 0,852322 – 0,935355, pana la valorile 0,873121 – 0,818554, in continuare valorile RMS variază în intervalul 0,801009 – 0,913149 fără variații mari.

În cazul valorilor calculate pentru vibrațiile înregistrate pe cutia vagonului la **boghiul 1**

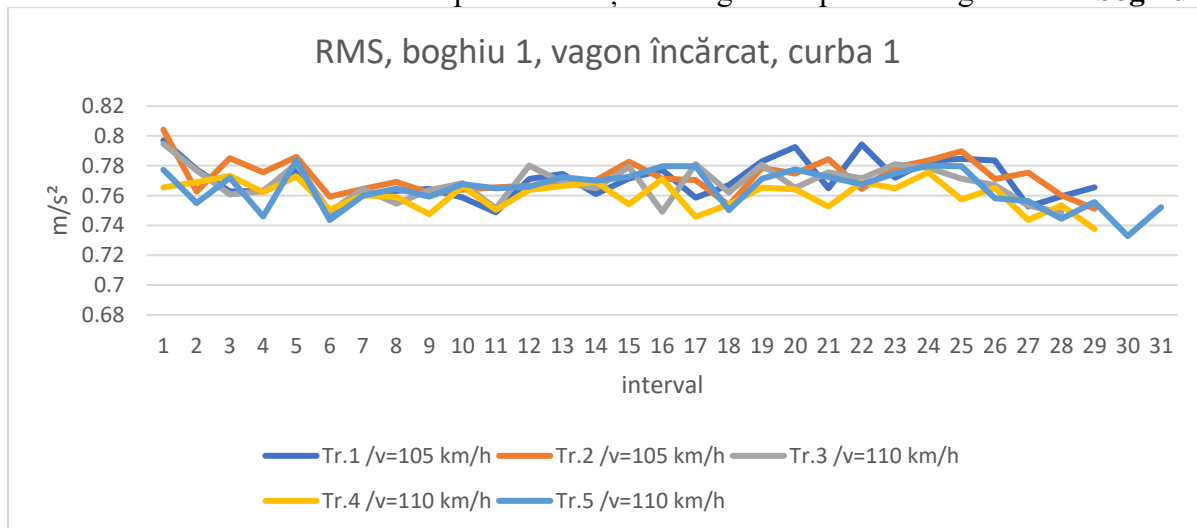


Fig. 11.3.3. Valorile RMS înregistrate de accelerometru montat pe cutia vagonului, în dreptul boghiului 1, cu vagonul încărcat, pe curba 1, la toate cele 5 treceri succesive .

În cazul valorilor RMS calculate pentru vagonul încărcat, în dreptul boghiului 1, înregistrate la toate cele 5 treceri, au o variație în intervalul 0,804203 – 0,737512 pe toată măsurată. Nu se poate stabili o linie care sa ilustreze variația valorilor.

În cazul valorilor calculate pentru vibrațiile înregistrate pe cutia vagonului la **boghiul 2**

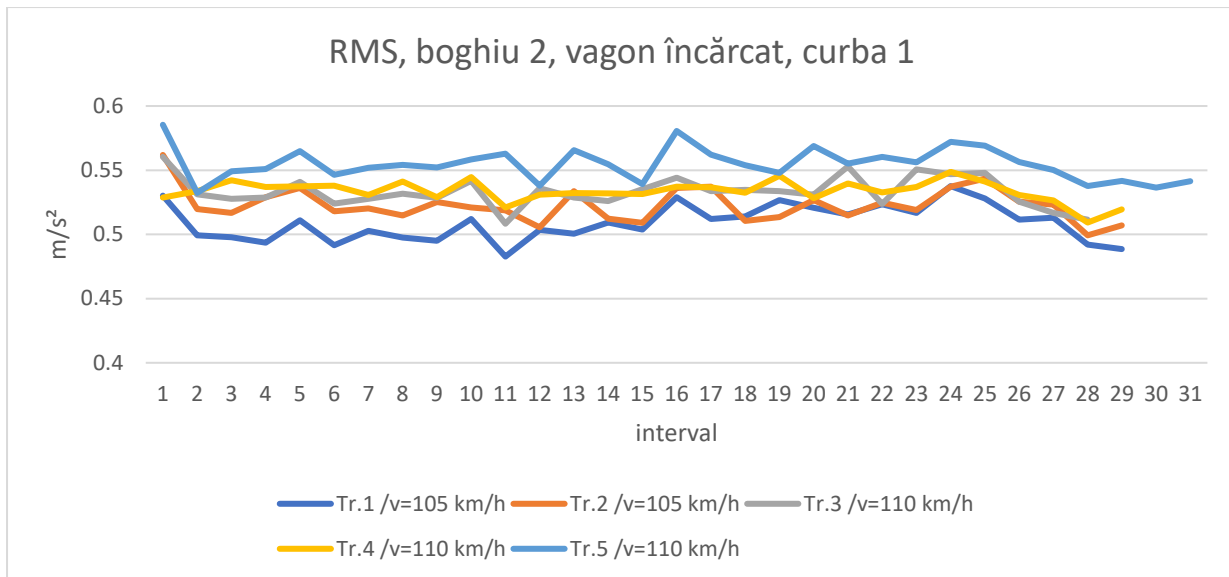


Fig. 11.3.4. Valorile RMS înregistrate de accelerometru montat pe cutia vagonului, în dreptul boghiului 2, cu vagonul încărcat, pe curba 1, la toate cele 5 treceri succesive .

Valoarea RMS în cazul vagonului încărcat, în dreptul boghiului 2, la viteza de 105 km/h, pe curba 1, scade fără variații mari de la valorile 0,585382 – 0,528824 în punctul 1, până la 0,536079 – 0,57564 în punctul 29.

11.4. Analiza valorilor calculate pentru Rădăcina Medie Pătrată în cazul vagonului încărcat, la trecerea peste curba 2

Valorile RMS calculate pentru osia 2 este in toate cazurile mai mare comparativ cu celelalte valori înregistrate pe axa Y, în cazul vagonului încărcat.

În cazul valorilor calculate pentru vibrațiile înregistrate pe **osia 1**

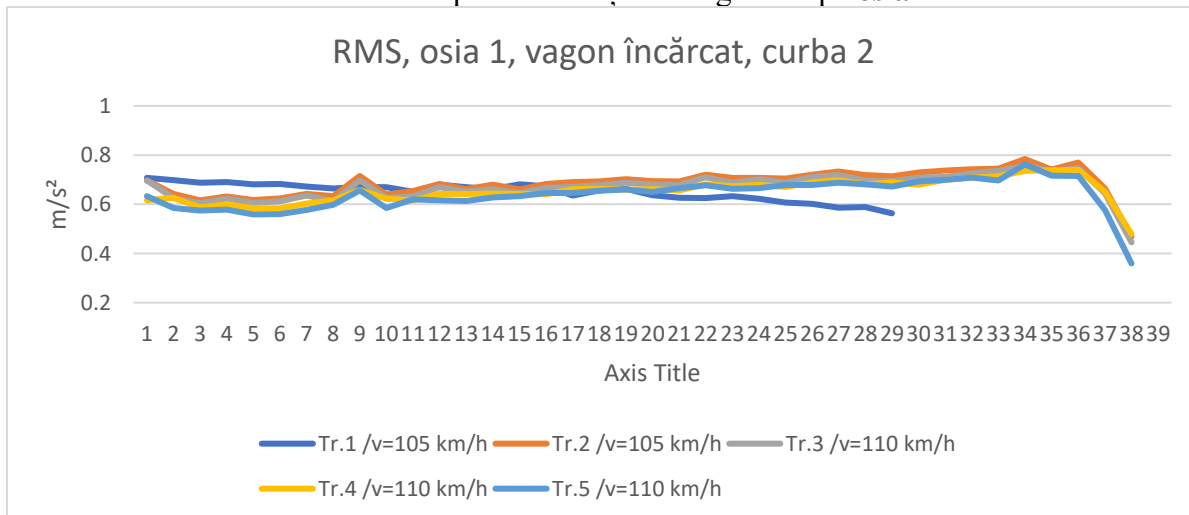


Fig. 11.4.1. Valorile RMS înregistrate de accelerometru montat pe osia 1, cu vagonul încărcat, pe curba 2, la toate cele 5 treceri succesive

În cazul vagonului încărcat valorile RMS, pentru osia 1, sunt aproape liniare pentru punctele de la 1 până la punctul 34 și sunt cuprinse in intervalul 0,783933 – 0,559169 din punctul 34 până în punctul 37 valoarea scade brusc până la 0,359528.

În cazul valorilor calculate pentru vibrațiile înregistrate pe **osia 2**

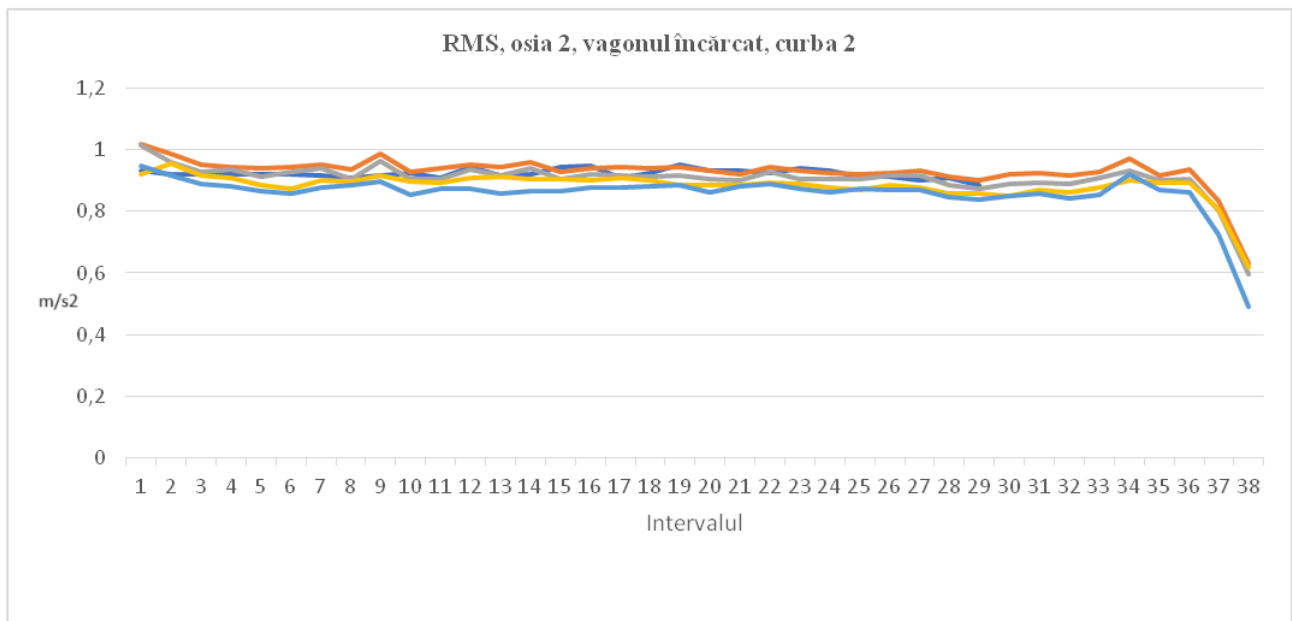


Fig. 11.4.2. Valorile RMS înregistrate de accelerometru montat pe osia 2, cu vagonul încărcat, pe curba 2, la toate cele 5 treceri succesive

În cazul vagonului încărcat valorile RMS, pentru osia 2, sunt aproape liniare pentru punctele de la 1 până la punctul 34 și sunt cuprinse în intervalul 1,015442 – 0,855355 din punctul 34 până în punctul 37 valoarea scade brusc până la 0,491002.

În cazul valorilor calculate pentru vibrațiile înregistrate pe cutia vagonului la **boghiul 1**

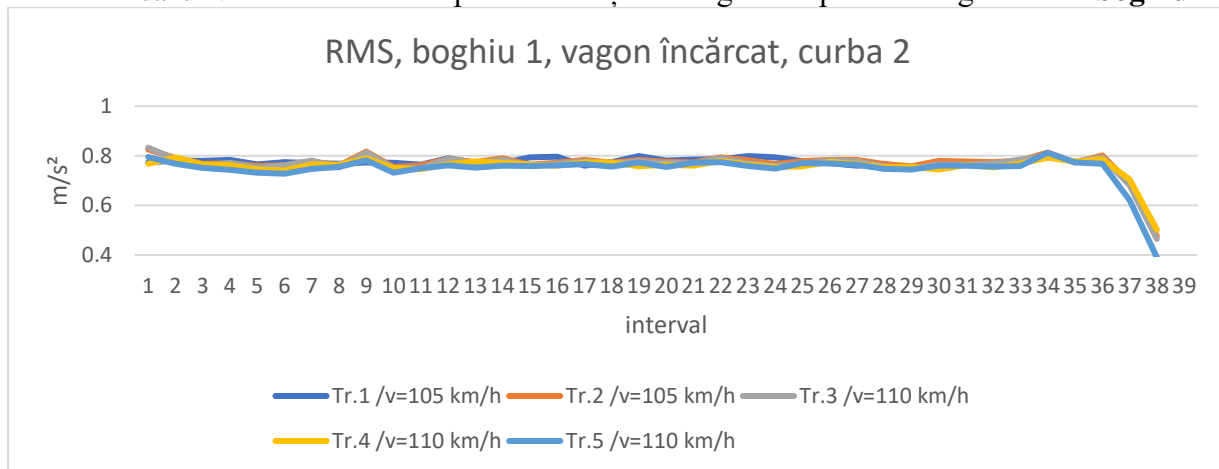


Fig. 11.4.3. Valorile RMS înregistrate de accelerometru montat pe cutia vagonului, în dreptul boghiului 1, cu vagonul încărcat, pe curba 2, la toate cele 5 treceri succesive .

În cazul vagonului încărcat valorile RMS, pentru accelerometru montat pe cutia vagonului, la boghiul 1, valorile RMS sunt aproape liniare pentru punctele de la 1 până la punctul 34 și sunt cuprinse în intervalul 0,83321 – 0,732474 din punctul 34 până în punctul 37 valoarea scade brusc până la 0,390711.

În cazul valorilor calculate pentru vibrațiile înregistrate pe cutia vagonului la **boghiul 2**

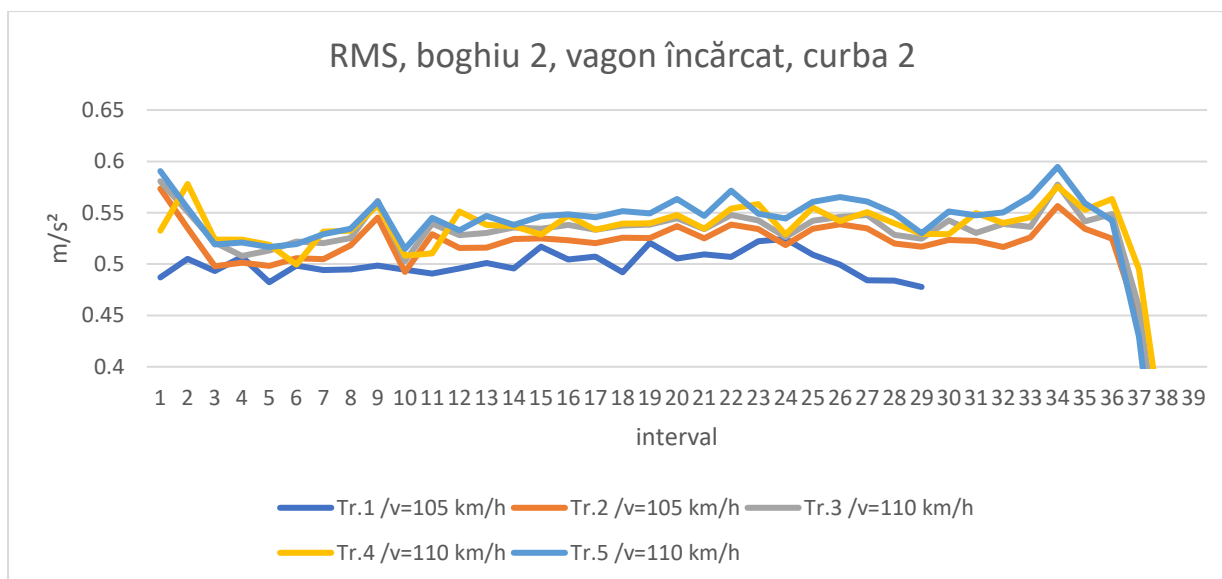


Fig. 114.4. Valorile RMS înregistrate de accelerometru montat pe cutia vagonului, în dreptul boghiului 2, cu vagonul încărcat, pe curba 2, la toate cele 5 treceri succesive .

În cazul vagonului încărcat valorile RMS, pentru accelerometru montat pe cutia vagonului, la boghiul 1, valorile RMS sunt aproape liniare pentru punctele de la 1 până la punctul 34 și sunt cuprinse în intervalul 0,590369 – 0,540111 din punctul 34 până în punctul 37 valoarea scade brusc până la 0,213145.

În cazul vagonului încărcat, intervalul de timp cât s-a făcut înregistrarea măsurătorilor a fost mai lung decât intervalul de timp pentru cazul vagonului gol, astfel s-au măsurat vibrațiile când vagonul iese din curbă, valorile înregistrate, pe axa Y, în ultimele 9 secunde scad brusc, ca urmare a scăderii forței centrifuge care apare în cazul trecerii peste curbe.

Capitolul 12

Analiza valorilor calculate pentru Rădăcina Medie Pătrată a vibrațiilor măsurate pe axa Z

În cazul vagonului descărcat și încărcat, analiza valorilor obținute arată că valorile cele mai mari ale vibrațiilor s-au înregistrat pe cutia vagonului în dreptul boghiului al doilea măsurate pe axa Z.

În această secțiune este prezentată analiza caracteristicilor vibrațiilor, măsurate pe axa Z, pe cutia vagonului la boghiul 1 și 2 pe baza prelucrării datelor experimentale înregistrate.

12.1. Analiza valorilor calculate pentru Rădăcina Medie Pătrată în cazul vagonului gol, la trecerea peste curba 1

Figurile 9.1.1.–9.1.9. ilustrează variațiile valorilor rădăcinilor medii pătratice înregistrate pe curba 1, la viteze de 125 km/h, 130 km/h, 135 km/h, în dreptul cutiei vagonului la mijlocul boghiului 1 și 2 pentru vagonul gol.

În toate graficele, accelerațiile RMS, măsurate pe caroserie, scad odată cu viteza.

Valorile RMS calculate pentru boghiul 2 sunt în toate cazurile semnificativ mai mari comparativ cu celelalte valori înregistrate pe axa Z.

În cazul valorilor calculate pentru vibrațiile înregistrate pe cutia vagonului la **boghiul 1**

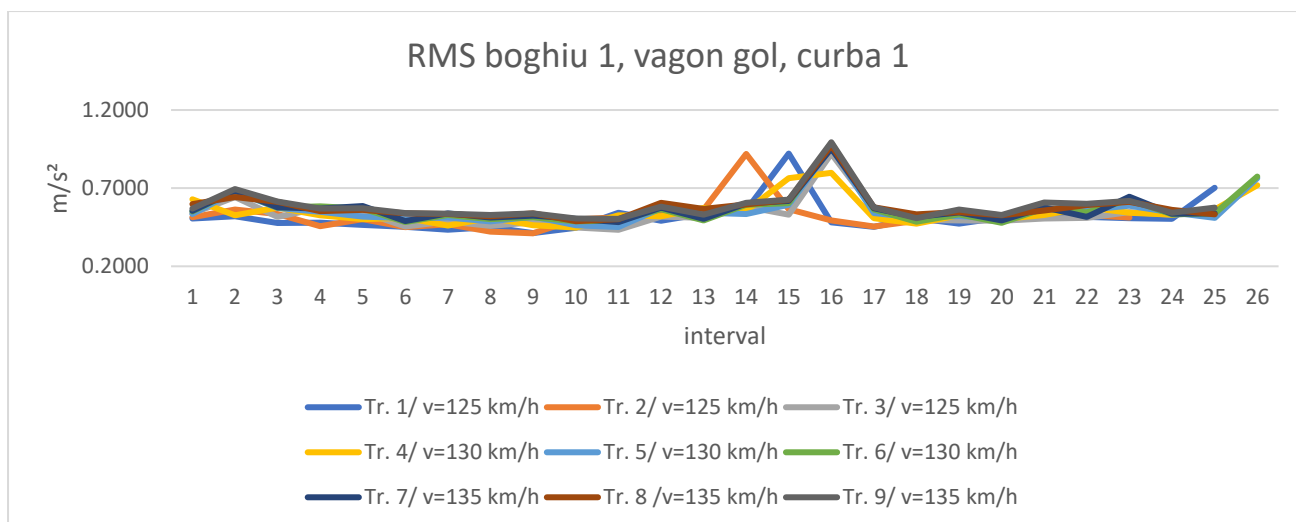


Fig. 12.1.1. Valorile RMS înregistrate de accelerometru montat pe boghiul 1, cu vagonul gol, pe curba 1, la toate cele 9 treceri succesive .

În cazul vagonului gol, la trecerea peste curba 1, valorile RMS, înregistrate pe cutia vagonului la boghiul 1, sunt liniare, cu valori cuprinse în intervalul 0,410781 – 0,574441, cu o singura excepție, în punctele 14, 15, 16 este un vârf care ajunge la valoarea 0,993823. Vârful valoric este decalat, nu este în același punct pentru fiecare trecere, deoarece începerea înregistrărilor nu se face exact din același punct de fiecare dată.

În cazul valorilor calculate pentru vibrațiile înregistrate pe cutia vagonului la **boghiul 2**

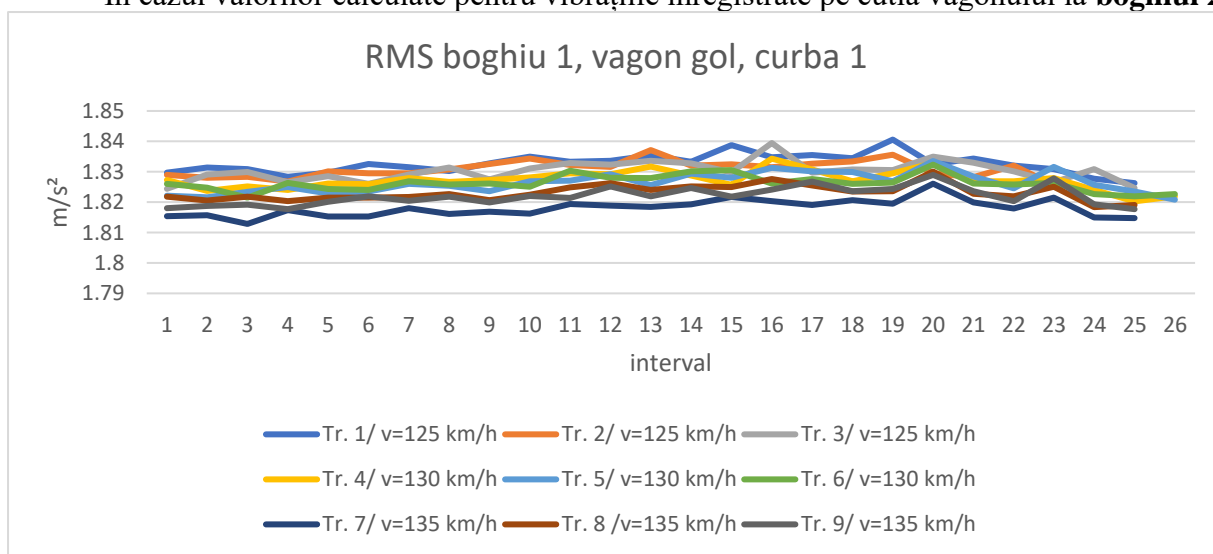


Fig. 12.1.2. Valorile RMS înregistrate de accelerometru montat pe boghiul 2, cu vagonul gol, pe curba 1, la toate cele 9 treceri succesive

În cazul vagonului gol, la trecerea peste curba 1, valorile RMS, înregistrate pe cutia vagonului la boghiul 2, sunt liniare, cu valori cuprinse în intervalul 1,812836 – 1,840583.

12.2. Analiza valorilor calculate pentru Rădăcina Medie Pătrată în cazul vagonului gol, la trecerea peste curba 2

Figurile 9.2.1.–9.2.8 ilustrează variațiile valorilor rădăcinilor medii pătratice înregistrate pe curba 2, cu viteze de 125 km/h, 130 km/h, 135 km/h, în dreptul cutiei vagonului la mijlocul boghiului 1 și 2 pentru vagonul gol. În toate graficele, accelerațiile RMS, măsurate pe boghiul 2 sunt mai mari.

Valorile RMS calculate pentru boghiul 2 sunt în toate cazurile mai mari comparativ cu celelalte valori înregistrate pe axa Z, în cazul vagonului gol.

În cazul valorilor calculate pentru vibrațiile înregistrate pe cutia vagonului la **boghiul 1**

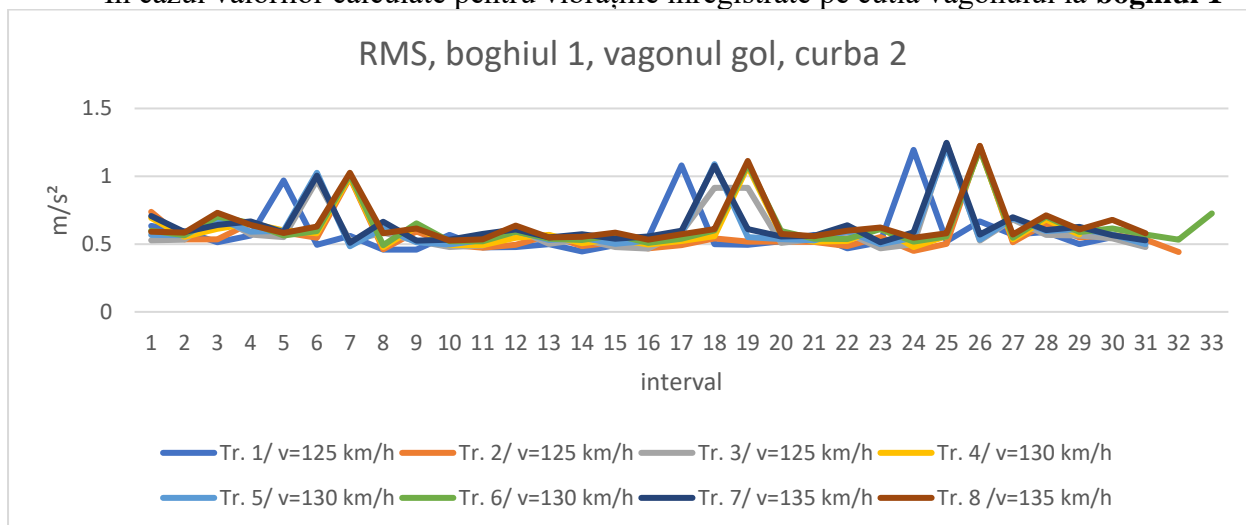


Fig. 12.2.1. Valorile RMS înregistrate de accelerometru montat pe boghiul 1, cu vagonul gol, pe curba 2, la toate cele 9 treceri succesive .

În situația când măsurătorile au fost făcute cu vagonul gol la trecerea peste curba 2, RMS pentru vibrațiile înregistrate pe axa Z, la boghiul 2, au 3 vârfuri. Valorile pentru segmentele liniare sunt cuprinse în intervalul 0,709542 – 0,568399. Vârfurile sunt înregistrate în punctele 7, 19, 26. Valorile sunt cuprinse în intervalul valoric 0,969841 – 1,238311.

Vârfurile valorice sunt decalate, pentru că la fiecare trecere începerea înregistrărilor nu se face exact din același punct.

În cazul valorilor calculate pentru vibrațiile înregistrate pe cutia vagonului la **boghiul 2**

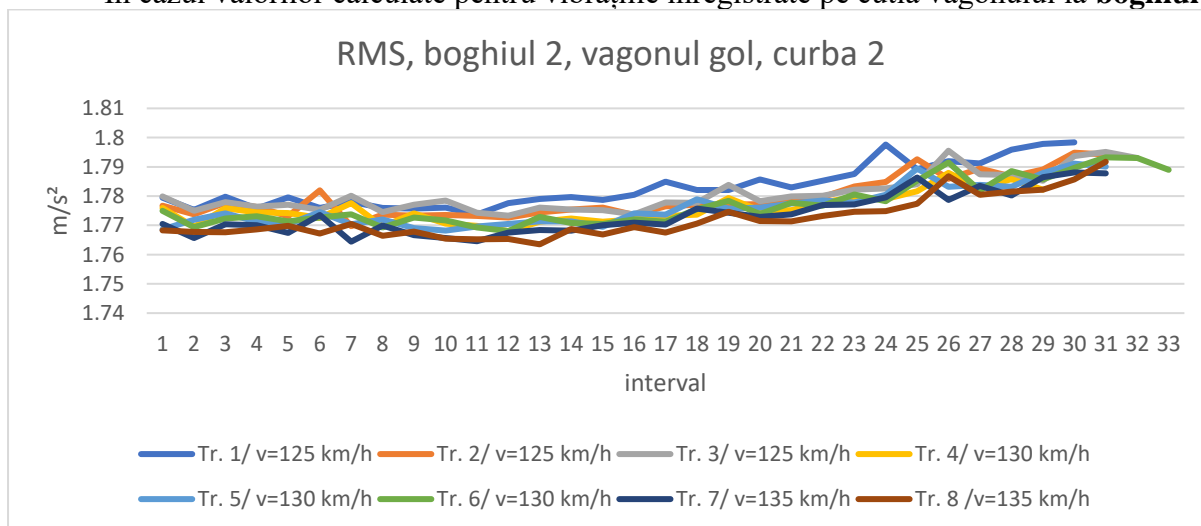


Fig. 12.1.4. Valorile RMS înregistrate de accelerometru montat pe boghiul 2, cu vagonul gol, pe curba 2, la toate cele 8 treceri succesive .

În cazul vagonului gol, la trecerea peste curba 2, valorile RMS, înregistrate pe cutia vagonului la boghiul 2, sunt liniare, ușor crescătoare, cu valori cuprinse în intervalul 1,76645 – 1,797593.

12.3. Analiza valorilor calculate pentru Rădăcina Medie Pătrată în cazul vagonului încărcat, la trecerea peste curba 1.

Figurile 9.3.1.–9.3.5 ilustrează variațiile valorilor rădăcinilor medii pătratice înregistrate pe curba 1, cu viteze de 105 km/h, 110 km/h, 115 km/h, în dreptul cutiei vagonului la mijlocul boghiului 1 si 2 pentru vagonul încărcat.

Valorile RMS calculate pentru boghiul 2 sunt în toate cazurile mai mari comparativ cu celelalte valori înregistrate pe axa Z, în cazul vagonului încărcat. În cazul valorilor calculate pentru vibrațiile înregistrate pe cutia vagonului la **boghiul 1**

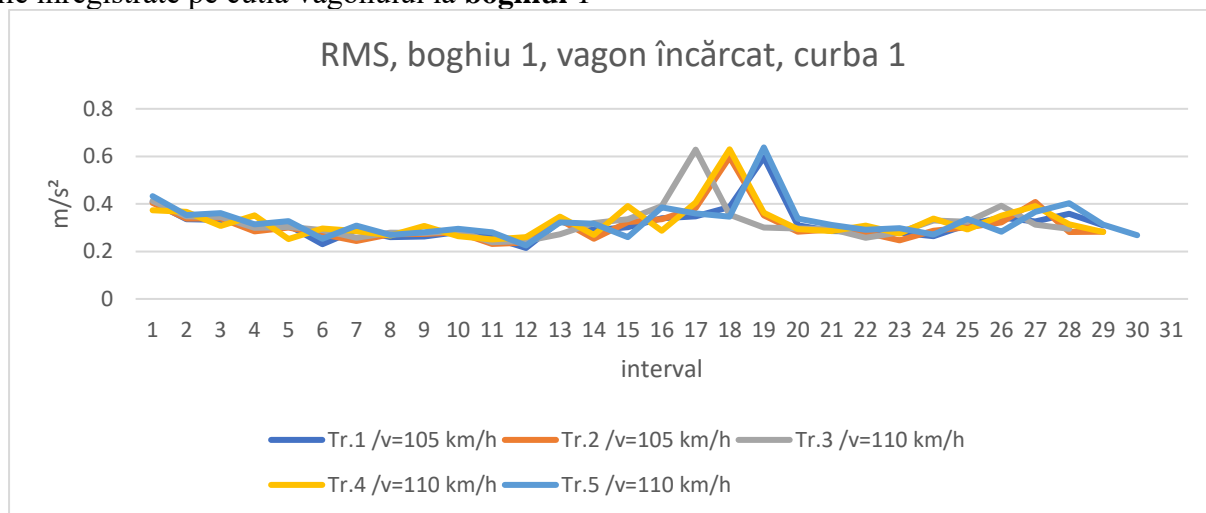


Fig. 12.3.1. Valorile RMS înregistrate de accelerometru montat pe boghiul 1, cu vagonul încărcat, pe curba 1, la toate cele 5 treceri succesive .

În cazul vagonului încărcat, la trecerea peste curba 1, valorile RMS, înregistrate pe cutia vagonului la boghiul 1, pe direcția Z, sunt liniare, cu valori cuprinse în intervalul 0,431953 – 0,224937, cu o singura excepție, în punctele 17, 18, 19 este un vârf care ajunge la valoarea 0,628257. Vârful valoric este decalat, nu este în același punct pentru fiecare trecere, deoarece începerea înregistrărilor nu se face exact din același punct de fiecare dată.

În cazul valorilor calculate pentru vibrațiile înregistrate pe cutia vagonului la **boghiul 2**

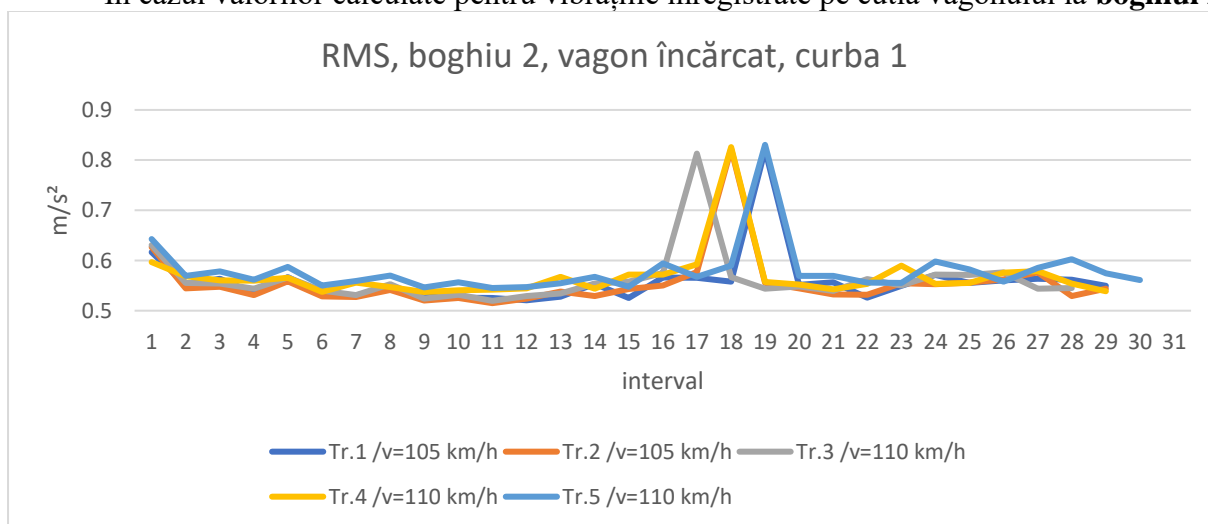


Fig. 12.3.2. Valorile RMS înregistrate de accelerometru montat pe boghiul 1, cu vagonul gol, pe curba 1, la toate cele 9 treceri succesive .

În cazul vagonului încărcat, la trecerea peste curba 1, valorile RMS, înregistrate pe cutia vagonului la boghiul 2, pe direcția Z, sunt liniare, cu valori cuprinse în intervalul 0,642984 – 0,519626, cu o singura excepție, în punctele 17, 18, 19 este un vârf care ajunge la valoarea 0,83044.

Vârful valoric este decalat, nu este în același punct pentru fiecare trecere, deoarece începerea înregistrărilor nu se face exact din același punct de fiecare dată.

12.4. Analiza valorilor calculate pentru Rădăcina Medie Pătrată în cazul vagonului încărcat, la trecerea peste curba 2

Figurile 9.4.1.–9.4.5 ilustrează variațiile valorilor rădăcinilor medii pătratice înregistrate pe curba 2, cu viteze de 105 km/h, 110 km/h, 115 km/h, în dreptul cutiei vagonului la mijlocul boghiului 1 și 2 pentru vagonul încărcat.

Valorile RMS calculate pentru boghiul 2 sunt în toate cazurile mai mari comparativ cu celelalte valori înregistrate pe axa Z, în cazul vagonului încărcat.

În cazul valorilor calculate pentru vibrațiile înregistrate pe cutia vagonului la **boghiul 1**

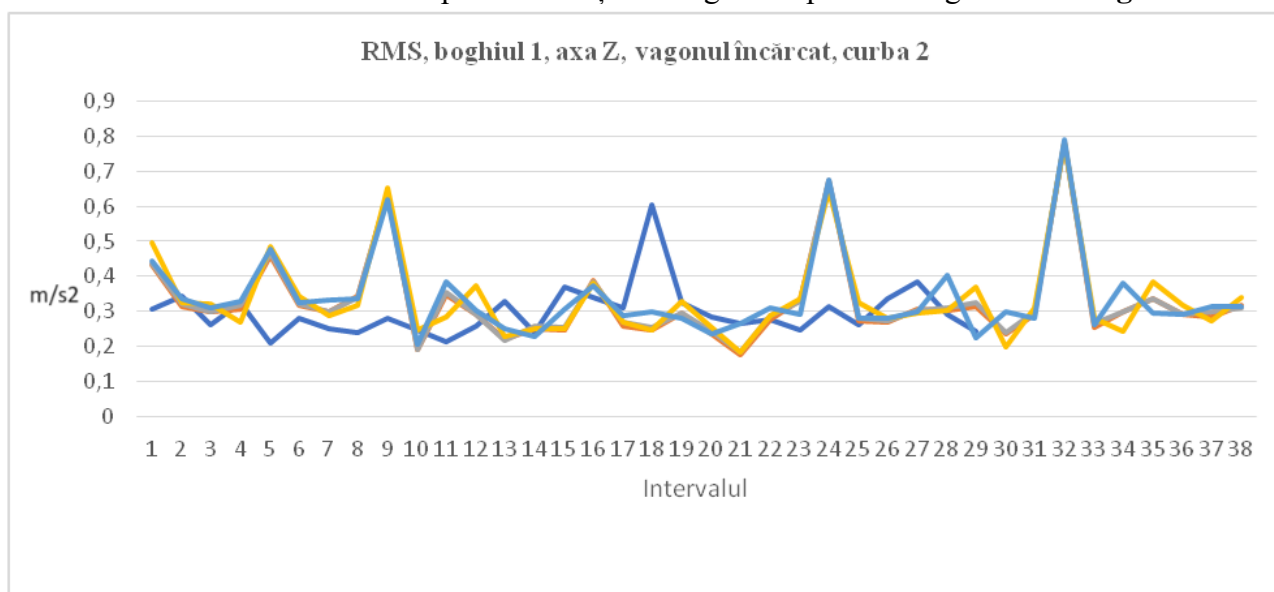


Fig. 12.4.1. Valorile RMS înregistrate de accelerometru montat pe boghiul 1, cu vagonul încărcat, pe curba 2, la toate cele 5 treceri succesive.

Valorile calculate pentru RMS în cazul vibrațiilor, măsurate pe axa Z, înregistrate pe cutia vagonului la mijlocul boghiului 1, când vagonul a fost încărcat și a trecut peste curba 2, au mai multe salturi ale valorilor.

Punctul	5	9	18	24	32
Valoarea RMS	0,479230	0,620311	0,602998	0,674525	0,789077

Valorile calculate pentru punctele intermediare acestor vârfuri sunt cuprinse în intervalul 0,443319 – 0,186427.

În cazul valorilor calculate pentru vibrațiile înregistrate pe cutia vagonului la **boghiul 2**

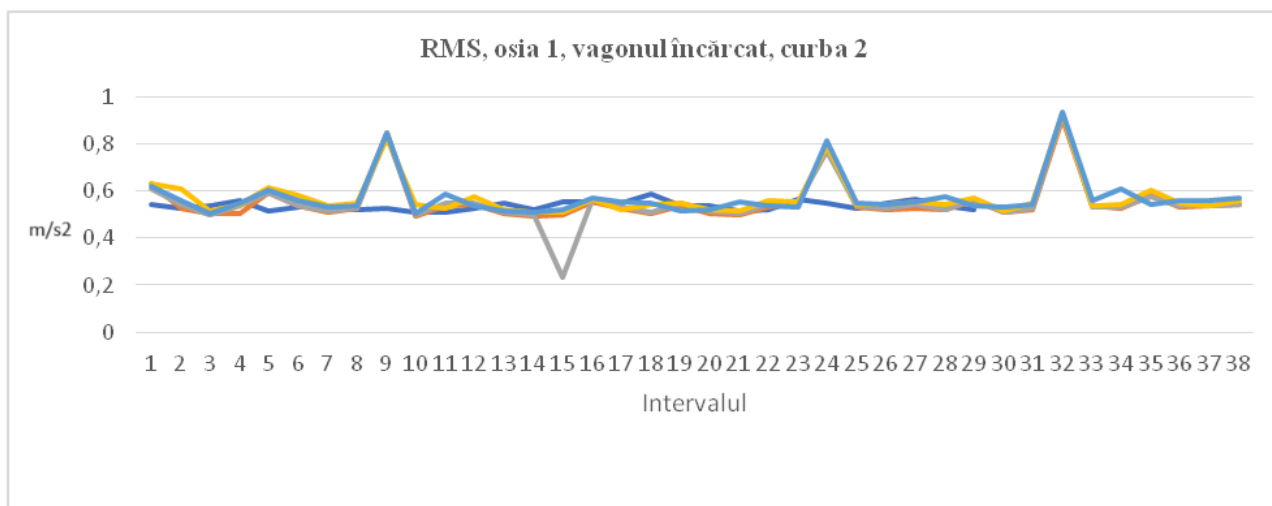


Fig. 12.4.2. Valorile RMS înregistrate de accelerometru montat pe boghiul 1, cu vagonul gol, pe curba 1, la toate cele 9 treceri succesive .

Valorile calculate pentru RMS în cazul vibrațiilor, măsurate pe axa Z, înregistrate pe cutia vagonului la mijlocul boghiului 2, când vagonul a fost încărcat și a trecut peste curba 2, au mai multe salturi ale valorilor.

Punctul	5	9	15	24	32
Valoarea RMS	0,606324	0,847702	0,230913	0,817474	0,938078

Valorile calculate pentru punctele intermediare acestor vârfuri sunt cuprinse în intervalul 0,504703 – 0,585451.

Valorile RMS pentru vibrațiile măsurate pe axa Z au un interval de valori mare, datorită punctelor critice din calea de rulare care determină producerea vibrațiilor pe axa Z.

PARTEA V. SIMULAREA SI COMPARAREA DATELOR

Capitolul 13

Simularea teoretică a comportării vagonului și compararea datelor

Simularea MATLAB se referă la procesul de utilizare a mediului software MATLAB pentru a modela și analiza comportamentul unui sistem sau proces. MATLAB oferă un set cuprinzător de instrumente și funcții care permit crearea de simulări pentru diverse domenii, cum ar fi inginerie, fizică, finanțe și multe altele.

Prezentare generală a pașilor implicați în configurarea și rularea unei simulări MATLAB.

Crearea modelului: primul pas este definirea modelului matematic care reprezintă sistemul sau procesul pe care doriți să-l simulați. Aceasta implică formularea ecuațiilor care guvernează, a condițiilor inițiale și a oricăror parametri relevanți. MATLAB oferă o platformă convenabilă pentru definirea acestor ecuații folosind instrumente matematice simbolice sau prin scrierea de funcții. În cazul tezei am folosit modelul prezentat Dinamica vehiculelor de cale ferată de Ioan Sebeșan

Discretizare: În multe cazuri, modelele matematice continue trebuie să fie discretizate pentru

a efectua calcule numerice. Discretizarea implică împărțirea sistemului în pași de timp sau spațiali mai mici, utilizând de obicei metode precum diferența finită, elementele finite sau tehnicile de volum finit. MATLAB oferă funcții și instrumente încorporate pentru a facilita procesul de discretizare.

Configurarea simulării: Odată ce modelul este definit și discretizat, trebuie să configurați parametrii de simulare. Aceasta include specificarea intervalului de timp de simulare, a mărimii pasului de timp și a oricăror alte setări relevante. MATLAB oferă funcții pentru a configura mediul de simulare, permițându-vă să personalizați simularea în funcție de cerințele dumneavoastră.

Execuția simulării: După configurarea simulării, o puteți executa apelând funcțiile MATLAB corespunzătoare. Simularea va progresa iterativ, avansând starea sistemului în fiecare pas de timp conform ecuațiilor și metodei de integrare definite. MATLAB oferă instrumente pentru monitorizarea și vizualizarea rezultatelor simulării în timp real sau în analiză post-simulare.

Analiza și vizualizarea datelor: Odată ce simularea este completă, MATLAB vă permite să analizați și să vizualizați rezultatele obținute. Capacitățile extinse de elaborare a graficelor și vizualizare ale MATLAB facilitează prezentarea și interpretarea eficientă a rezultatelor simulării.

Analiza și optimizarea sensibilității parametrilor: MATLAB oferă, de asemenea, instrumente pentru efectuarea de analize de sensibilitate și studii de optimizare pe modelul de simulare. Puteți explora efectele variației parametrilor modelului asupra comportamentului sistemului sau puteți optimiza modelul pentru a atinge obiective specifice prin ajustarea anumitor parametri.

13.1. Compararea valorilor de pe axa Y:

Modul de obținere al valorilor	Valoarea maximă pozitivă	Compararea valorilor pozitive	Valoarea maximă negativă	Compararea valorilor negative
Teoretic prin simularea cu ajutorul programului MATLAB	1,651469	Valorile pozitive obținute teoretic sunt cu 2% mai mari decât valorile obținute experimental	- 1,651468	Valorile negative obținute teoretic sunt simetrice față de cele pozitive.
Experiment al, prin măsurare directă pe Inelul Mare de la CTF Făurei	1,619088	100%	-0,27829	

Tabel 13.1. Compararea datelor pentru vibrațiile pe axa X, obținute după simularea comportamentului vagonului

13.2. S-a simulat comportarea vagonului pe axa Z :

Modul de obținere al valorilor	Valoarea maximă pozitivă	Compararea valorilor pozitive	Valoarea maximă negativă	Compararea valorilor negative
Teoretic prin simularea cu ajutorul programului MATLAB	3,076841	Valorile pozitive obținute teoretic sunt cu 2,1% mai mari decât valorile	- 3,193439	Valorile negative obținute teoretic sunt cu 1,9% mai mici decât cele obținute.

		obținute. experimental		experimental
--	--	---------------------------	--	--------------

Tabel 13.1. Compararea datelor pentru vibrațiile pe axa Z, obținute după simularea comportamentului vagonului

CAPITOLUL 14

CONCLUZII FINALE

14.1 CONCLUZII GENERALE

Toate eforturile trebuie îndreptate spre asigurarea siguranței circulației vehiculelor de cale ferată, implicit evaluarea comportamentului dinamic la rulare, ce reprezintă un factor important, mai ales la vehiculele nou construite, la care încă nu a fost demonstrată capacitatea de asigurare a stabilității și securității pe calea ferată.

Îmbunătățirea performanțelor dinamice ale vagoanelor de marfă este importantă avându-se în vedere și faptul că acestea nu circulă pe linii speciale, ci exploatarea lor are loc în trafic mixt. Traficul mixt nu trebuie să afecteze regimul de mers al vagoanelor de călători, motiv pentru care îmbunătățirea performanțelor dinamice este esențială.

La circulația vagoanelor de marfă pot apărea uzuri importante ale șinelor și deteriorări ale acestora, care pot afecta atât calitatea mersului, dar mai ales siguranța circulației.

În curbele cu supraînălțare, vagoanele de marfă circulă în general sub viteza nominală a curbei, ceea ce duce la o înclinare a caroseriei către interiorul curbei cu efect de solicitare mai mare a firului interior decât a celui exterior.

De asemenea, în curbe, la liniile cu joante, calea de rulare poate să prezinte așa-zisele coturi discontinue, cu apariția unor unghiuri de șoc. La circulația peste aceste coturi, vor apărea forțe dinamice de șoc, care pe lângă faptul că deteriorează profilul roții și al șinei, poate să producă chiar deraierea vehiculului.

Trebuie avut în vedere faptul că vagoanele de marfă circulă în trafic internațional, iar în țările din vestul Europei, condițiile legate de protecția căii de rulare sunt mult mai restrictive.

În acest sens determinarea, studierea și evaluarea comportamentului dinamic de rulare al vagoanelor de marfă devine o necesitate. Aprecierea comportamentului dinamic se face pe baza a doi parametri bine definiți, și anume, determinarea siguranței circulației și determinarea comportamentului vehiculului la mers. Aceste două aprecieri sunt considerate cuprinzătoare în ceea ce privește determinarea comportamentului dinamic de rulare al unui vehicul feroviar.

Totuși, această demonstrație a asigurării capacității de securitate a unui vagon nu este ușor de realizat în practică, multe administrații de cale ferată neavând modalitățile tehnice pentru demonstrarea capacităților de siguranță ale materialului rulant. Acest lucru ține de adaptările liniilor ferate ale companiilor de infrastructură feroviară naționale sau de existența poligoanelor feroviare de încercări, apte pentru condițiile de validare ale proiectelor tehnice feroviare pentru diversele tipuri de vehicule nou realizate sau care efectuează modernizări și reînnoiri tehnice.

În același timp, pentru demonstrarea și validarea noilor proiecte tehnice feroviare privind materialul rulant nou realizat, este necesară existența unui personal specializat cu înaltă pregătire profesională, cu expertiză în domeniul materialului rulant, pentru asigurarea unei certificări și atestări cât mai apropiate de condițiile tehnice cerute și cu reducerea la maxim a erorilor tehnice. Acest lucru nu se poate realiza decât prin asigurarea unei calificări ridicate a personalului tehnic, prin participarea la cursuri de perfecționare, simpozioane și conferințe,

schimburi de experiență cu specialiști din alte țări, precum și prin implicarea în proiecte europene multidisciplinare în domeniul materialului rulant cu dezvoltare într-un anumit interval de timp.

De asemenea, tot pentru o validare corespunzătoare a proiectelor noi de material rulant, pe lângă capacitățile tehnice (de ex.: linii de încercare, poligoane de testări feroviare, etc...) și personalul tehnic trebuie să fie cu înalt grad de calificare. Este absolut necesară etalonarea dispozitivelor, aparatelor și standurilor, cât mai des din punct de vedere tehnologic, pentru verificarea caracteristicilor vehiculelor feroviare și aprecierea rezultatelor. Această capacitate de analiză și certificare a rezultatelor obținute, trebuie validată prin etalonarea aparatelor și demonstrată prin verificarea periodică a acestora și evaluarea anuală a personalului tehnic care deservește aceste dispozitive de către un organism de acreditare național.

14.2 CONTRIBUȚII ORIGINALE

Am ales studierea comportării dinamice a materialului rulant la circulația în curbă pentru ca în aceste zone apare forța centrifugă și pericolul deraierii este mai mare. Dacă în curbă vagonul îndeplinește toate condițiile de siguranță, de regulă, în aliniament, nu mai apar condiții de deraiere.

Materialul rulant care a fost planificat să fie studiat a fost un vagon pe boghiuri, s-a ales un vagon cisternă deoarece pentru acest tip de vagon s-a primit acceptul de la Autoritatea Feroviară Română – AFER, proprietarul Centrului de Testări Feroviare Făurei.

Rezultatele obținute se pot generaliza la toate vagoanele de marfă pe boghiuri și la vagoanele de călători, principiile sunt aceleași.

Am validat rezultatele teoretice prin probe și testări, efectuate personal la Centrul de Testări Feroviare, pentru vagonul cisterna. În același timp, în urma analizei rezultatelor obținute, cu ajutorul programului MATLAB am simulat condițiile încercărilor, și rezultatele obținute teoretic le-am comparat cu rezultatele obținute practic.

Prin amplasarea traductorilor de accelerație în plan orizontal la nivelul cadrelor de boghiu, deasupra osiilor dinspre firul exterior al căii de rulare a liniei poligonului de încercări de la Făurei, s-a evaluat siguranța circulației vagonului cisternă.

Măsurile de apreciere a calității de mers au fost valorile maxime ale accelerațiilor verticale și transversale obținute, precum și valorile RMS pe direcțiile verticală (axa Z) și orizontală (axa Y).

Rezultatele obținute au generat o amplă analiză a acestora, pe baza căreia s-a putut efectua o evaluare adecvată a vagonului cisternă în ceea ce privește comportamentul dinamic la rulare. În urma evaluării, s-a stabilit că în ceea ce privește siguranța la rulare și calitatea de mers, materialul rulant îndeplinește foarte bine cerințele impuse în ceea ce privește comportamentul dinamic de rulare. În plus, siguranța contra deraierii este asigurată, neexistând niciun fel de pericol în ceea ce privește deraierea acestuia în condiții de funcționare și exploatare normală.

Evaluarea datelor procesate a constituit un fundament esențial în analiza și aprecierea siguranței circulației și a calității de mers a vagonului cisternă, constatându-se încadrarea proiectului tehnic al acestora în limitele impuse.

Din studiul vibrațiilor măsurate de accelerometrele montate pe cutia vagonului în dreptul boghiului 1 și 2, pe axa Z, reiese că în anumite locuri sunt valori mult mai mari decât valorile medii.

În funcție de viteza de circulație și de momentul în care s-au înregistrat vârfurile valorilor s-a stabilit locul unde au fost înregistrate.

În Capitolul 6 sunt prezentate caracteristicile liniei de pe inelul mare de încercare de la Făurei, locul unde s-au desfășurat încercările. Cu datele obținute teoretic și cu verificările de pe teren s-au stabilit zonele care au determinat valorile maxime ale vibrațiilor.

La circulația pe prima curbă de la km 2 pana la km 5 s-a înregistrat un singur vârf al valorilor, in dreptul unui pasaj de nivel între km 3+050 pana la 3+650, prezentat in figura 1.



Fig. 1. Pasajul peste calea ferată de la km 3+050 până la km 3+650

La circulația pe a doua curbă de la km 9 până la kilometrul 12 s-au înregistrat 3 vârfuri ale valorilor.

Primul vârf s-a măsurat la trecerea peste pasajul aflat între pozițiile kilometrice 9+800 si 10+350 ilustrat în fig.2.



Fig.2. Pasajul de la km 9+800 până la km 10+350

Al doilea vârf s-a înregistrat la trecerea peste podețul aflat între pozițiile kilometrice 10+850 si 11+180, prezentat în figura 3.



Fig.3. Podețul de la km 10+850 până la poziția 11+180

Al treilea vârf s-a înregistrat la joanta de la semnalul de intrare pe inelul mare, figura 4.



Fig.4. Joanta de pe linia Inelului Mare de la Centrul de Testări Feroviare Făurei

Cea mai mare valoare a vibrațiilor s-a înregistrat la trecerea peste joantă. Întreruperea firului căii ferate generează cele mai mari vibrații.

În centrul inelului de încercări se afla o exploatare petrolieră (o sonda), ceea ce duce la trecerea mașinilor grele peste pasajul studiat. Valorile mari ale vibrațiilor măsurate pe axa Z ilustrează efectele negative asupra stării căii ferate ale trecerii de nivel.

Pentru o monitorizare eficientă, la costuri minime, propun o metoda de depistare a defectelor căii ferate în timp real, fără costuri suplimentare generate de circulația unui automotor de măsurare a căii sau a tractării unui vagon de măsurare a căii ferate.

În prezent există sisteme de achiziții de date care funcționează wireless.

Prezentarea unui sistem universal de achiziție de date

Sistemul de achiziție de date este instrumentul perfect pentru toate situațiile de testare și măsurare. Acesta are capacitatea unică de a înregistra orice semnal sau informații primite de la terminale.

Fiecare modul este o unitate de achiziție de date mobile autonom pentru testarea vehiculelor, integrat în timp real, pentru testarea pe banc sau portabil, pentru lucrări de service, sau pentru activități de monitorizare permanentă.

Sistemul are precizie mare de măsurare datorită tehnologiei brevetate, stabilitate pe termen lung împreună cu un certificat de calibrare integrat.

Ușor de folosit, mic și portabil, operare intuitivă prin software-ul Catman de la HBM.

Deschis pentru platforme software diferite: LabView, Visual Studio .NET, DIAdem, CANape, DASYlab și multe altele!

Un lanț de măsurare fiabil, sistemul de achiziție de date extrem de precis, poate fi combinat perfect cu senzorii pentru a avea o soluție completă de măsurare și testare. De la senzor la software: pur și simplu „conectați și măsurați”. Aplicații versatile, se pot folosi pentru monitorizarea sănătății infrastructurii.



Fig. 1 prezentarea lanțului de măsură a sistemului de achiziție de date

Montarea acestui sistem de achiziție de date în locomotiva și a receptorilor care măsoară vibrațiile pe axa Z, pe cutia vagonului, în dreptul boghiului 1 și 2, face ca la sfârșitul unei curse, după examinarea datelor înregistrate de sistem să putem spune cu precizie unde sunt puncte critice la infrastructura parcursă.

14.3. PERSPECTIVE DE DEZVOLTARE ULTERIOARĂ

Metoda propusă duce la întreținerea preventivă sau predictivă a podurilor, tunelurilor, și căilor ferate.

Este o soluție modulară pentru monitorizarea eficientă a șinelor, dar și a trenurilor supuse diversilor factori interni și externi care pot cauza uzură sau defecțiuni.

Acest lucru se poate întâmpla, de exemplu, din cauza deteriorării, a unui proces de construcție incorect sau a unei situații extreme care rezultă dintr-un accident sau o încărcătură de mediu. Pentru a putea observa aceste modificări ale materialului și pentru a reacționa într-un mod corespunzător înainte de a se produce daune grave, implementarea unui sistem de identificare a daunelor este crucială.

Monitorizarea comportamentului structural poate detecta în timp anomaliile, permițând astfel implementarea mai eficientă a acțiunilor de întreținere și reparare, cu impact direct asupra reducerii costurilor de exploatare.

Înlocuirea întreținerii bazate pe program cu întreținerea bazată pe condiție este obiectivul principal al monitorizării infrastructurii, oferind următoarele beneficii:

- Crește siguranța circulației.
- Observație continuă
- Automatizarea întreținerii

Detectarea daunelor în stadiu incipient permite răspunsul imediat, prelungirea ciclului de revizie majoră, economie de costuri și timp.

Sistem structural de monitorizare a calitatii infrastructurii feroviare.

Industria feroviară a suferit evoluții și schimbări tehnologice de-a lungul timpului. În ultimele secole, oamenii au avut încredere în serviciile de transport feroviare, în interiorul și între orașe. Căile ferate joacă, de asemenea, un rol important în logistica modernă și distribuția de mărfuri.

Soluții pentru rezultate fiabile și solide de măsurare, testare și analiză a căilor ferate

Indiferent dacă testarea fizică a componentelor individuale sau a vehiculelor întregi este efectuată în laborator, pe bancuri de testare de dezvoltare sau pe pistă, în condiții realiste, este necesar să se examineze:

- operațiuni sigure și fiabile
- durabilitate structurală, oboseală, robustețe și fiabilitate
- performanța și eficiența propulsiei
- îndeplinirea cerințelor legale și a standardelor internaționale (de exemplu, EN 15227, EN 14363)
- testare și analiză eficientă a datelor

Integrarea flexibilă a măsurătorilor de toate tipurile într-o singură configurație, sporește eficiența dezvoltării, făcând procesul de dezvoltare și testare mai ușor și mai puțin riscant, permițând producătorilor să dezvolte vehicule eficiente și concepute pentru siguranță maximă.

Analiză și diagnosticare, întreținere și reparații: măsurători în și pentru calea ferată.

Monitorizarea predictivă și bazată pe condiție este importantă pentru a asigura siguranța, eficiența costurilor și funcționarea lină și ușoară a căii ferate.

Inspecțiile regulate și întreținerea căilor ferate sunt obligatorii pentru a evita condițiile care cauzează defecte ale vehiculului sau ale infrastructurii.

Măsurătorile foarte precise ale trenurilor cu sistemele de monitorizare la bord, care captează fie vehiculul în sine, fie starea căii, oferă date și perspective importante pentru soluțiile moderne de întreținere.

Metodele de măsurare anterioare, de diagnoză sau monitorizare, furnizează de obicei doar rapoarte privind timpul de oprire sau date de măsurare lipsite de precizie. De obicei, astfel de date nu oferă o privire generală și nu pot fi utilizate pentru procese sigure de prognoză. Echiparea vehiculului și a infrastructurii cu tehnologie de măsurare dedicată este, prin urmare, indispensabilă [140-143].

Monitorizarea tunelurilor, podurilor și a trenurilor de pe marginea drumului în infrastructura feroviară și inginerie civilă

Măsurătorile sarcinilor și tensiunilor aplicate sunt necesare pentru a observa modificările materialului și pentru a reacționa la timp. Un sistem de monitorizare fiabil poate detecta anomaliile în timp, permițând astfel implementarea mai eficientă a întreținerii și reparațiilor, ceea ce duce imediat la reducerea costurilor de operare.

Înlocuirea întreținerii bazate pe program cu întreținerea bazată pe condiție este obiectivul principal al monitorizării infrastructurii.

În prezent sunt implicată în propunerea pentru un proiect de realizare a unui prototip ce va detecta punctele critice a infrastructurii feroviare, ce urmează a fi montat pe toate tipurile de vagoane.

Prezentarea sistemului de monitorizare propus

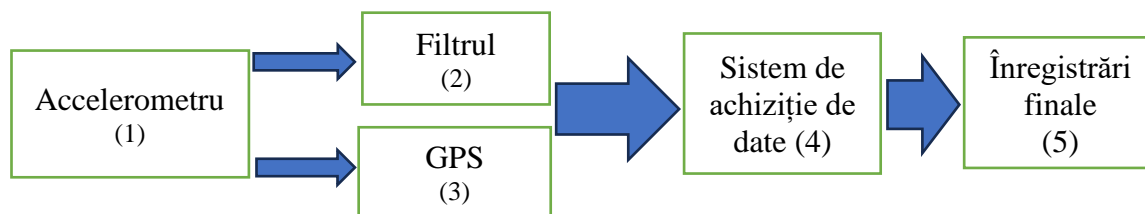


Fig.13.5. Schema logică a sistemului de monitorizare a datelor

Prezentarea detaliată a componentelor din schema logică

(1) **ACCELEROMETRU** avem 2 situații, în funcție de scopul măsurătorilor:

Dacă urmărim monitorizarea materialului rulant, încadrarea lui în limitele impuse de siguranța

circulației, se vor înregistra vibrațiile **transversale, (pe axa Y)**; pentru acest caz sunt necesare 2 accelerometre în funcție de greutatea vagonului,

- dacă vagonul este încărcat accelerometrul va fi amplasat pe osia a doua a primului boghiu
- dacă vagonul este gol accelerometrul va fi montat pe al doilea boghiu

În toate înregistrările studiate, valorile cele mai mari, ale vibrațiilor transversale, au fost măsurate, în cazul vagonului încărcat pe osia 2 a primului boghiu, iar în cazul vagonului gol pe boghiul al doilea. Valorile au fost clar mai mari, astfel se poate considera concludentă înregistrarea vibrațiilor captate de la un singur accelerometru.

Dacă urmărim starea infrastructurii, se vor înregistra vibrațiile **verticale (pe axa Z)**; în acest caz este necesar un singur accelerometru indiferent de greutatea vagonului (D_2).

În toate înregistrările studiate, valorile cele mai mari, ale vibrațiilor verticale, au fost măsurate, indiferent de greutatea vagonului pe boghiul al doilea. Valorile au fost clar mai mari, prin urmare se poate considera concludentă înregistrarea vibrațiilor înregistrate de la un singur accelerometru. Astfel se poate face întreținerea eficientă a caii ferate prin identificarea punctelor critice în timp real și nu după un plan stabilit de mentenanță (D_3)

Dacă transmisia datelor măsurate, către sistemul de achiziție de date, se poate face fără fir, wireless, accelerometrul poate fi pus foarte ușor, la orice vagon, în oricare loc.

Și dacă contactul accelerometrului pe punctul în care se fac măsurătorile este magnetic, instalarea sistemului de monitorizare este foarte ușoară.

(2) FILTRU

Datele înregistrate în timpul experimentelor sunt foarte multe. Când s-au desfășurat testările pe inelul de la Făurei pe o distanță de 3 km s-au memorat 3800 - 4000 de rânduri. Prin analogie, pe o distanță de sute de kilometri, datele rezultate vor fi foarte multe, greu de gestionat și în final neconcludente.

Un alt aspect pe care trebuie să-l urmărim este faptul că măsurătorile se fac la interval de 0,02 secunde. La o viteză de 100 km/h în 0,02 s vagonul parcurge 0,55 m, distanță în care se pot parcurge puncte critice ale infrastructurii. Mărind perioada de măsurare a vibrațiilor există riscul trecerii peste defecțiunile căii fără a fi detectate.

Astfel, pentru ca datele înregistrate să fie folositoare trebuie păstrat intervalul de timp dintre măsurători, dar trebuie pus un filtru care să înregistreze doar valorile care depășesc limitele medii, adică doar vârfurile. Mai ales în cazul vibrațiilor verticale în punctele critice valorile sunt de 4, 5 ori mai mari. Nu există pericolul pierderii înregistrării.

(3) SISTEMUL DE POZIȚIONARE GLOBALĂ (GLOBAL POSITIONING SYSTEM) – GPS

În cazul în care valorile înregistrate depășesc limitele impuse, trec de filtru, GPS transmite sistemului de achiziție de date poziția în care se afla vagonul pe care s-a montat accelerometrul. S-ar mai putea crea un program care în funcție de momentul când se face înregistrarea și viteza trenului să poată stabili locul înregistrării. GPS este mai exact, nu depinde de alți factori.

(4) SISTEMUL DE ACHIZITIE DE DATE

Pentru acesta situație este necesar un sistem cu 3 canale de înregistrare, pentru cazul în care se urmărește înregistrarea vibrațiilor transversale și verticale, pentru vagonul încărcat și pentru vagonul gol. La testări s-a folosit un sistem care are 12 canale de înregistrări. În cazul cel mai complex, sunt necesare doar 3 canale. Astfel se reduce mărimea cutiei, se reduc costurile. Pentru a reduce și mai mult volumul sistemului propus, sistemul de achiziție de date poate fi echipat cu un

card pe care se vor memora datele urmând ca de pe trenul odată ajuns la destinație sa se extragă cardul și sa fie introdus într-un laptop care are instalat programul de citirea a datelor înregistrate, astfel se poate renunța la laptop.

(5) DATELE OBȚINUTE

După decodarea datelor înregistrate, aceste date pot fi folosite în foarte multe aplicații. Obiectivul principal este înlocuirea întreținerii bazate pe program cu întreținerea bazată pe datele obținute pe baza monitorizării infrastructurii.

Un al doilea obiectiv îl reprezintă măsurarea sarcinilor și tensiunilor aplicate, care sunt necesare pentru a putea observa modificările materialului și astfel să se poată reacționa la timp pentru a evita apariția unor evenimente feroviare. Un sistem de monitorizare fiabil poate detecta anomaliile din timp, permițând astfel implementarea mai eficientă a întreținerii și reparațiilor, ceea ce duce imediat la reducerea costurilor de operare.

Noutatea acestui studiu este de a determina amplasarea optimă a senzorilor de accelerație pentru monitorizarea online a performanței materialului rulant și înregistrarea accelerațiilor cu ajutorul diferiților senzori așezați pe structura materialului rulant.

Măsurarea vibrațiilor vagoanelor-cisternă poate duce la analize experimentale și pot ajuta inginerii de vagoane să proiecteze sisteme de suspensie mai performante cu extensie la toate tipurile de vehicule feroviare.

Datele culese corelate cu o analiză statistică îi pot ajuta să înțeleagă și să rezolve fenomenele/cauzele apariției unor neconformități ale sistemului, care pot avea un grad de particularitate ridicat.

Extinderea acestei cercetări/analize și la alte tipuri de material rulant ar putea permite inginerilor să îmbunătățească tehnologia și soluțiile constructive ale vagoanelor de marfă și pasageri, mai ales în condițiile creșterilor vitezelor de circulație pentru traficul de marfă și călători impuse de dezvoltarea/dinamica economică și socială europeană.

Proiectul se desfășoară cu colaborarea Universității Politehnice București, Facultatea de Transporturi, catedra de Material Rulant, Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare pentru Inginerie Electrică **ICPE-CA** București și **TEHMIN** Brașov.

BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ

1. Aster, R. C., Borchers, B., Thurber, C. H., Parameter estimation and inverse problems, Elsevier, 2018
2. Ayasse, J. B., Chollet, H., Wheel-rail contact. Handbook of railway vehicle dynamics, 85-120, 2006
3. Baeza, L., Vila, P., Xie, G., Iwnicki, S. D., Prediction of rail corrugation using a rotating flexible wheelset coupled with a flexible track model and a non-Hertzian/non-steady contact model, Journal of Sound and Vibration, 330(18-19), 4493-4507, 2011.
4. Bosso, N., Zampieri, N., Experimental and numerical simulation of wheel-rail adhesion and wear using a scaled roller rig and a real-time contact code, Shock and Vibration, 2014.
5. Chen, H., Ishida, M., Namura, A., Baek, K. S., Nakahara, T., Leban, B., Pau, M., Estimation of wheel/rail adhesion coefficient under wet condition with measured boundary friction coefficient and real contact area, Wear, 271(1-2), 32-39, 2011.

6. Doi, H., Miyamoto, T., Nishiyama, Y., Ohe, S., Kamachi, H., A new experimental device to investigate creep forces between wheel and rail, *Wear*, 271(1-2), 40-46, 2011
7. Dumitriu, M., Gheți, M.A., Evaluation of the vertical vibrations behaviour of the bogie at failure of the dampers in the primary suspension of the railway vehicle, *MATEC Web of Conferences - Vol. 178*, 2018, Numărul articolului 06001
8. Dumitriu, M., Gheți, M.A., Cross-correlation analysis of the vertical accelerations of railway vehicle bogie, *Engineering, Procedia Manufacturing*, Vol. 32, 2019, pp. 114-120.
9. Dumitriu, M., Gheți, M.A., Cruceanu, I.C., Experimental analysis of the vertical vibration of the railway bogie during braking, *Procedia Manufacturing*, Vol. 46, 2020, pp. 49-54.
10. Dumitriu, M., Gheți, M.A., Influence of the interference of bounce and pitch vibrations upon the dynamic behaviour in the bogie of a railway vehicle, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, Vol. 400.
11. Dumitriu, M., Gheți, M.A., Numerical study on the influence of primary suspension damping upon the dynamic behaviour of railway vehicles, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 444, 2018.
12. Dumitriu, M., Gheți, M.A., On the longitudinal vibration of the railway bogie, *MATEC Web of Conferences*, Vol. 290, 2019, Numărul articolului 08008.
13. Dwyer-Joyce, R. S., Yao, C., Lewis, R., Brunskill, H., An ultrasonic sensor for monitoring wheel flange/rail gauge corner contact, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 227(2), 188-195, 2013.
14. Hussain, I., Mei, T. X., Multi Kalman filtering approach for estimation of wheel-rail contact conditions, *UKACC International conference on Control 2010* (pp. 1-6), 2010. Hussain, I., Mei, T. X., Ritchings, R. T., Estimation of wheel-rail contact conditions and adhesion using the multiple model approach, *Vehicle System Dynamics*, 51(1), 32-53, 2013.
15. Iwnicki, S., Spiriyagin, M., Cole, C., McSweeney, T., *Handbook of Railway Vehicle Dynamics*, Second Edition, CRC Press, Taylor& Francis Group, Boca Raton, 2020.
16. Iwnicki, S., Spiriyagin, M., Cole, C., McSweeney, T., *Handbook of Railway Vehicle Dynamics*, Second Edition, CRC Press, Taylor& Francis Group, Boca Raton, 2020.
17. Kalker, J. J., A Fast Algorithm for the Simplified Theory of Rolling Contact, *Vehicle System Dynamics* 11, 1-13, 1982.
18. Kim, M. S., Study on the adhesion characteristic between wheel and rail using the scaled test-bench, *Int J Mechanics*, 9, 198-205, 2015.
19. Kouroussis, G., Connolly, D. P., Verlinden, O., Railway-induced ground vibrations—a review of vehicle effects, *International Journal of Rail Transportation*, 2(2), 69-110, 2014.
20. Lewis, R., Olofsson, U., *Wheel-rail interface handbook*, Elsevier, 2009.
21. Malvezzi, M., Pugi, L., Papini, S., Rindi, A., Toni, P., Identification of a wheel-rail adhesion coefficient from experimental data during braking tests, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of rail and rapid transit*, 227(2), 128-139, 2013
22. Martínez-Casas, J., Giner-Navarro, J., Baeza, L., Denia, F. D., Improved railway wheelset-track interaction model in the high-frequency domain, *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 309, 642-653, 2017.
23. Meymand, S. Z., Craft, M. J., Ahmadian, M., On the application of roller rigs for studying rail vehicle systems, *Rail Transportation Division Conference* (Vol. 56116, p. V001T01A015). American Society of Mechanical Engineers, 2013.
24. Onat, A., Voltr, P., Swarm intelligence based multiple model approach for friction estimation at wheel-rail interface, *Proceedings of the 5th International Symposium on Engineering, Artificial Intelligence and Applications (ISEAIA 2017)*, Kyrenia, Cyprus (pp. 8-10), 2017

25. A. M. Kaynia, C. Madshus, and P. Zackrisson, "Ground vibration from high-speed trains: prediction and countermeasure," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 126, no. 6, pp. 531–537, 2000. View at: [Publisher Site](#)
26. K. E. Vogiatzis, "Athens metro extension project to Piraeus ground borne noise and vibration assessment and control," *International Journal of Mechanics*, vol. 6, no. 2, pp. 130–139, 2012.
27. D. P. Connolly, G. Kouroussis, A. Giannopoulos, O. Verlinden, P. K. Woodward, and M. C. Forde, "Assessment of railway vibrations using an efficient scoping model," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 58, pp. 37–47, 2014.
28. X. Sheng, C. J. C. Jones, and D. J. Thompson, "A theoretical study on the influence of the track on train-induced ground vibration," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 272, no. 3–5, pp. 909–936, 2004.
29. G. Lombaert, G. Degrande, J. Kogut, and S. François, "The experimental validation of a numerical model for the prediction of railway induced vibrations," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 297, no. 3–5, pp. 512–535, 2006
30. Pau, M., Aymerich, F., Ginesu, F., Ultrasonic measurements of nominal contact area and contact pressure in a wheel-rail system, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 214(4), 231-243, 2000.
31. Pichlík, P., Zděnek, J., Extended Kalman filter utilization for a railway traction vehicle slip control, 2017 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM) & 2017 Intl Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP) (pp. 869-874). IEEE, 2017
- Piotrowski, J., Chollet, H., Wheel–rail contact models for vehicle system dynamics including multi-point contact, *Vehicle System Dynamics*, 43(6-7), 455-483, 2005.
32. Polach, O., A fast wheel-rail forces calculation computer code, *Vehicle System Dynamics*, 33(sup1), 728-739, 1999.
33. Polach, O., Creep forces in simulations of traction vehicles running on adhesion limit, *Wear*, 258(7-8), 992-1000, 2005
34. Sichani, M., Enblom, R., Berg, M., An alternative to FASTSIM for tangential solution of the wheel–rail contact, *Vehicle System Dynamics*, 54(6), 748-764, 2016.
35. Spiriyagin, M., Cole, C., Sun, Y. Q., McClanachan, M., Spiriyagin, V., McSweeney, T. Design and simulation of rail vehicles, CRC press, 2014
36. Strano, S., Terzo, M., On the real-time estimation of the wheel-rail contact force by means of a new nonlinear estimator design model, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 105, 391-403, 2018.