

CERCETĂRI PRIVIND VIBRAȚIILE PARAMETRICE ROATĂ-ȘINĂ BAZATE PE METODA MATRICEI GREEN A CĂII

Proiect finanțat de CNCSIS prin Programul PN II - Programul IDEI -
Proiecte de Cercetare Exploratorie - 2008

Număr contract:	68/13.01.2009
Codul CNCSIS al proiectului:	1699
Director proiect:	Conf.dr.ing. Traian Mazilu e_mail: trmazilu@yahoo.com
Instituția gazdă a proiectului:	Universitatea Politehnica din București Facultatea de Transporturi, Catedra Material Rulant de Cale Ferată
Durata proiectului:	2009-2011
Membrii echipei de cercetare:	Prof.dr.ing. Ioan Sebeșan As.drd.ing. Camil Crăciun As.drd.ing. Mădălina Dumitriu As.drd.ing. Cristina Tudorache Drd.ing. Mircea Sebeșan
Domeniul de cercetare:	Științe inginerești. Inginerie mecanică. Locomotive și vagoane

Rezumatul proiectului

Dezvoltarea din ultimii 30 de ani a transportului feroviar prin creșterea vitezei de circulație și a tonajelor a scos în evidență o serie de fenomene negative: solicitările dinamice mari la contactul roată-șină, instabilitatea circulației trenurilor, uzura accentuată a suprafețelor de rulare roată-șină și intensificarea zgomotului de rulare. Aceste fenomene afectează siguranța circulației, confortul călătorilor și condițiile de habitat din zonele învecinate căii ferate, fiabilitatea și rentabilitatea transportului pe calea ferată. Toate aspectele menționate pleacă de la vibrațiile trenului de roți pe calea de rulare care sunt denumite generic vibrații roată-șină. Variația rigidității căii datorită traverselor conferă acestor vibrații caracterul de vibrații parametrică.

Tema propune studiul aprofundat al vibrațiilor parametrică roată-șină cu scopul de a identifica soluții tehnice pentru combaterea fenomenelor negative specifice interacțiunii roată-șină în domeniul frecvențelor medii și înalte. Vor fi studiate defectele suprafețelor de rulare și problemele tribologice ale contactului roată-șină. Se va analiza răspunsul în frecvență al căii de rulare și al roții inclusiv influența osiei. Pe aceasta bază, se va studia răspunsul în frecvență al sistemului roată-șină pentru a identifica modul în care parametrii esențiali ai sistemului influențează nivelul vibrațiilor. Se vor trata vibrațiile roată-șină în domeniul timp pentru cele mai importante tipuri de defecte ale suprafețelor de rulare cu scopul de a evalua nivelul solicitărilor dinamice și potențialul de uzură al suprafețelor de rulare. În fine, se va studia efectul Doppler și stabilitatea rulării pe șină.

Tema abordată are o reală relevanță științifică este tratată cu spirit inovativ privind modelul mecanic al vibrațiilor roată-șină, metoda de rezolvare a ecuațiilor de mișcare, maniera de studiu a fenomenelor specifice și soluțiile tehnice.

Obiectivele proiectului

Obiectivele proiectului sunt centrate pe adâncirea cunoașterii fenomenelor de interacțiune roată-șină în domeniul frecvențelor medii și înalte pentru de a identifica factorii care condiționează nivelul de interacțiune (sensibilitatea sistemului roată-șină) cu scopul de a recomanda soluții tehnice de principiu pentru reducerea solicitărilor dinamice la care sunt supuse calea de rulare și aparatul de rulare al vehiculelor, precum și pentru reducerea uzurii suprafețelor de rulare roată-șină.

Ca obiectiv strategic de cercetare fundamentală se urmărește recunoașterea în teoria vibrațiilor a metodei matriciei Green a căii ca un puternic instrument de studiu a vibrațiilor neliniare ale unui sistem oscilant în mișcare pe o structură infinită periodică.

Criteriul minim de performanță asumat: 2 articole acceptate spre publicare în reviste indexate în baze de date internaționale - unul în 2010 și celălalt în 2011.

Contribuția la dezvoltarea cunoașterii științifice. Aspecte originale ale cercetării

Cercetarea fenomenelor roată-șină prezintă trei aspecte originale mai importante: influența modurilor proprii ale roții asupra vibrațiilor parametrice roată-șină, analiza vibrațiilor parametrice ale roții motoare și extinderea celor două probleme la cazul tandemului de roți; nu se poate cita în literatura de specialitate nici un studiu sistematic al acestor probleme esențiale în dezvoltarea fenomenelor de uzură. Problemele de calcul. pe care tratarea acestor chestiuni le presupune. vor fi rezolvate prin aplicarea metodei originale a matriciei Green a căii, elaborată de directorul de proiect. Prin aplicarea metodei matriciei Green la cazurile prezentate mai sus, inclusiv în problemele de stabilitate se asigură o dezvoltare naturală a acestei metode și i se demonstrează superioritatea.

Impactul proiectului

Impactul proiectului este dat de contribuțiile originale în domeniul cercetării fundamentale: modelarea sistemului roată-șină, studiul fenomenelor de vibrații roată-șină și metoda de rezolvare a ecuațiilor de mișcare.

Realizarea temei propuse va contribui în mod semnificativ la dezvoltarea transportului feroviar prin faptul că răspunde unor cerințe obiective legate de sporirea vitezelor de circulație și a confortului călătorilor, îmbunătățind astfel calitatea serviciilor asigurate de vehiculele de cale ferată, sistem de transport recunoscut ca fiind mai economic și ca având un impact mai redus asupra mediului în comparație cu transportul rutier.

Proiectul propus se încadrează în politica generală promovată la nivel național și european de dezvoltare a mijloacelor de transport feroviare.

Potențiali beneficiari

Recomandările tehnice de principiu vor interesa constructorii de material rulant și unitățile de reparații, administrația rețelei naționale de cale ferată, precum și administrațiile rețelelor urbane și subterane. Rezultatele obținute de către echipa de cercetare, vor fi puse în vizorul factorilor cu putere de decizie precum și celor care gestionează problemele legate de siguranța circulației, confortul călătorilor și calitatea de mers a vehiculelor feroviare

Planul de desfășurare al proiectului

An	Obiective generale	Obiective specifice
2009	1 Defectele suprafețelor de rulare	Defectele suprafeței de rulare ale roții
		Defectele suprafeței de rulare ale șinei
		Geometria contactului roată-șină în prezența defectelor suprafețelor de rulare
	2 Tribologia contactului roată-șină	Presiuni de contact - rigiditatea contactului roată-șină
		Coeficienți de frecare, uzura la contactul roată-șină
	3 Răspunsul în frecvență al căii de rulare	Modele de studiu ale vibrațiilor căii Analiza comparativă a modelelor de studiu Funcții Green reale, matricea Green a căii
2010	1 Răspunsul în frecvență al roții	Modele de studiu
		Influența osiei
		Funcția Green a roții
	2 Răspunsul în frecvență al sistemului roată-șină	Stabilirea modelului de studiu
		Analiza sensibilității în frecvență a sistemului roată-șină
	3 Studiul vibrațiilor parametrice roată-șină în cazul poligonalizării roții	Analiza în timp a vibrațiilor
		Studiul sensibilității căii Studiul sensibilității roții, inclusiv cazul roții motoare
	4 Studiul vibrațiilor parametrice roată-șină în cazul dezechilibrului roții	Analiza în timp a vibrațiilor
Studiul sensibilității căii		
Studiul sensibilității roții, inclusiv cazul roții motoare		
2011	1 Studiul vibrațiilor parametrice roată-șină în cazul uzurii ondulatorii a șinei	Analiza în timp a vibrațiilor
		Studiul sensibilității sistemului roată-șină
	2 Studiul vibrațiilor parametrice ale unui tandem de roți-șină	Analiza în frecvență
		Analiza în timp
		Studiul sensibilității
	3 Studiul stabilității vibrațiilor verticale roată-șină	Undele de suprafață Rayleigh
		Efectul Doppler la calea de rulare Analiza stabilității
	4 Recomandări tehnice privind adoptarea soluțiilor constructive și de întreținere a căii de rulare și a aparatului de rulare al vehiculelor.	Recomandări privind construcția și întreținerea căii de rulare
Recomandări privind construcția și întreținerea aparatului de rulare al vehiculului		

Raport de cercetare 2009

Sinteza lucrării

1. Defectele suprafețelor de rulare

Sunt prezentate cele mai importante defecte ale suprafețelor de rulare susceptibile să genereze vibrații roată – șină, identificându-se totodată și o serie de factori care conduc la apariția acestor abateri de la forma ideală a suprafeței de rulare.

Defectele suprafețelor de rulare își au originea în procesul de fabricare, ele amplificându-se apoi în timpul exploatării sau, pur și simplu, sunt defecte care apar ca urmare a uzurii cauzate fie de interacțiunea roată-șină, fie de interacțiunea roată-sabot de frânare. Defectele suprafețelor de rulare se caracterizează prin domeniul lungimilor de undă a cărui limită superioară este de cca. 2-3 metri, și prin amplitudinea lor care atinge cel mult câteva zecimi de milimetru.

1.1. Defectele suprafețelor de rulare ale roții

Sunt prezentate cele mai importante defecte ale suprafeței de rulare a roții care pot amorsa vibrații roată-șină, indicându-se lungimea de undă a defectului, precum și factorii care conduc la apariția acestuia. Defectele suprafeței de rulare a roții sunt în esență abateri de la forma circulară.

Sunt analizate următoarele defecte: excentricitatea, ovalitatea, poligonalizarea roții, uzura ondulatorie a roții, locul plan singular și locul plan multiplu, aplatizarea locală a roții și decojirea roții.

1.2. Defectele suprafețelor de rulare ale șinei

Cele mai importante defecte ale căii de rulare care produc vibrații sunt cele de nivelment, care sunt ale căii în ansamblul ei, și defectele suprafețelor de rulare ale șinelor. Primele se caracterizează prin lungimi de undă mari care pleacă de la valori de 2 - 3 m și care pot atinge peste o sută de metri. Amplitudinea acestor defecte este de ordinul milimetrilor. Datorită domeniului în care se situează lungimea de undă a defectelor de nivelment și luând în considerare vitezele uzuale de circulație, vibrațiile produse de aceste defecte se găsesc în domeniul frecvențelor joase de până la 20-30 Hz. În acest domeniu de frecvență se găsesc și frecvențele proprii ale vehiculului considerat ca sistem mecanic de corpuri rigide cu un etaj sau două etaje de suspensie. În consecință, vibrațiile induse de defectele de nivelment sunt vibrații ale vehiculului și ele nu fac obiectul lucrării de față.

La șină, cel mai important defect al suprafeței de rulare care generează vibrații este *uzura ondulatorie*. Se disting și sunt prezentate trei categorii ale uzurii ondulatorii, în funcție de lungimea de undă: uzura ondulatorie scurtă, medie și lungă. Cele trei tipuri de uzură ondulatorie se deosebesc nu numai prin lungimea de undă și amplitudine, dar și prin mecanismele de apariție, aspecte tratate pe larg în cadrul lucrării elaborate.

1.3. Geometria contactului roată-șină în prezența defectelor suprafețelor de rulare

Scopul principal al acestei secțiuni este de a stabili relațiile de calcul ale deplasării relative roată-șină în prezența defectelor suprafețelor de rulare cu mențiunea că această mărime reprezintă mărimea de intrare a sistemului roată-șină. Sunt examinate trei situații și anume: roata cu loc plan - șină, roată - șina cu joantă și roată - șina cu uzură ondulatorie.

Geometria contactului roată cu loc plan-șină. În mod obișnuit, locul plan (*loc plan nou*) are lungimea de cca. 50 mm și poate atinge 100-120 mm. La început, locul plan are formă de coardă – văzută în secțiunea radială a roții – dar apoi marginile locului plan devin rotunde datorită uzurii. Locul plan cu marginile rotunjite este numit *loc plan uzat* sau *loc plan rotunjit*. Pentru calculul deplasării relative roată cu loc plan-șină se echivalează influența locului plan cu o adâncitură a profilului longitudinal al ciupercii a șinei, considerându-se în același timp roata perfect rotundă.

În cazul locului plan uzat, marginile sunt rotunjite și din acest motiv profilul echivalent al șinei este format din două arce de parabolă pentru racordare și un arc de cerc corespunzător mijlocului locului plan. Din cauza uzurii la margini și a aplatizării, lungimea locului plan uzat este mai mare decât lungimea locului plan nou din care provine. Aplicând o simulare numerică, se observă că din cauza curburii roții apar diferențe sensibile între profilul echivalent al locului plan și deplasarea relativă roată-șină care este mărimea de intrare în sistemul roată-șină când se simulează șocul dat de locul plan.

Geometria roată-șină cu joantă. Dintre discontinuitățile șinei pe care roata este obligată se le traverseze, discontinuitatea din dreptul joantelor este considerată ca fiind cea mai severă. Trebuie observat faptul că și în cazul șocului provocat de trecerea roții peste o șină cu joantă, excitația sistemului roată-șină este cauzată tot de deplasarea relativă dintre roată și șină care îmbracă anumite aspecte particulare. Sunt studiate cazul simplu în care joanta nu are lacună și cazul general în care joanta are lacună și diferență de nivelment. Se pleacă de la profilul longitudinal al șinelor modelat prin arce de parabolă și se calculează traiectoria roții. Se arată că atunci când roata a ajuns în zona centrală a joantei se produce bicontactul longitudinal cu șina, iar traiectoria roții are un punct de întoarcere, ceea ce indică o variație instantanee a componentei verticale a vitezei în condițiile regimului dinamic. Rezultă o variație instantanee a componentei verticale a impulsului roții și deci o sarcină de șoc infinită în ipoteza că se neglijează elasticitatea căii.

În realitate, trecerea roții peste joantă nu prezintă o asemenea variație a impulsului datorită elasticității contactului; traiectoria roții este netedă, cu pantă continuă. Se propune o nouă abordare prin introducerea condițiilor bicontactului elastic considerând contactul neliniar Hertzian. Această abordare va permite o estimare mai corectă a forței de șoc cu punerea în evidență a descărcării șinei din spatele roții concomitent cu încărcarea șinei din față.

Analiza cazului general în care joanta are lacună și diferență de nivelment presupune studierea a trei situații prin care roata poate trece peste lacuna joantei și anume: bicontactul tangențial, bicontactul monotangențial și bicontactul netangențial. Se arată că, din cauza influenței razei roții, deplasarea roții este mai mică decât cea impusă de contactul cu șina, iar traiectoria roții este continuă și netedă ca efect al introducerii bicontactului elastic.

Geometria roată-șină cu uzură ondulatorie. În această secțiune este analizată geometria dintre o roată perfect rotundă și o șină cu suprafața de rulare ondulată fie sinusoidal, fie după o lege oarecare. Prin aceasta, este simulată rugozitatea suprafeței de rulare a șinei, în general, precum și uzura ondulatorie a șinei, în particular. Într-o primă etapă se consideră că roata este în contact cu suprafața de rulare a unei șine cu profil sinusoidal. Aplicația numerică dezvoltată are rolul de a ilustra efectul razei de curbură a roții asupra deplasării relative roată-șină. Acest lucru este realizat prin compararea a două mărimi: deplasarea relativă roată-șină și profilul șinei. Diferența dintre cele două mărimi se mărește pe măsură ce amplitudinea profilului șinei crește sau dacă lungimea de undă a profilului șinei este mai mică. Desigur că în cazul lungimilor de undă mari, ceea ce înseamnă domeniul frecvențelor joase, această influență este nesemnificativă. Ea capătă relevanță în cazul lungimilor de undă mici, așa cum se întâlnește la uzura ondulatorie scurtă a șinei.

Influența razei de curbură a roții asupra deplasării relative roată-șină reprezintă un efect neliniar de natură geometrică care se adaugă celor introduse de contactul mecanic, așa cum se va vedea în secțiunile următoare. Ca urmare, spectrul deplasării relative roată-șină nu are o

singură componentă corespunzătoare numărului de undă, ci mai multe. Componenta fundamentală este mai mică decât cea a rugozității șinei. Amplitudinea primei armonici cauzată de efectul razei de curbură a roții depinde de amplitudinea rugozității, precum și de lungimea de undă a acesteia. Amplitudinea primei armonici crește neliniar cu amplitudinea rugozității, iar această creștere este mai accentuată în cazul reducerii lungimii de undă.

Pe de altă parte, se constată că raza roții joacă un rol important. Roțile cu diametru mai mare dau un efect geometric mai mare. În general, roțile motoare sunt construite cu un diametru mai mare decât cele nemotoare. În plus, trebuie menționat faptul că uzura suprafețelor de rulare este mai intensă în cazul rulării unei roți motoare care dezvoltă forță de tracțiune. Coroborând cele două aspecte menționate, rezultă că efectul geometric al razei roții ar putea juca un rol semnificativ în inițierea, dar mai ales în dezvoltarea uzurii ondulatorii a șinelor.

Analiza geometriei roată-șină cu ondulație oarecare pune în evidență caracterul neliniar al creșterii amplitudinilor componentelor spectrale ale deplasării relative roată-șină în funcție de amplitudinea ondulațiilor.

2. Tribologia contactului roată-șină

Sunt tratate problemele legate de tribologia contactului roată-șină de tip nonconformal, respectiv când pata de contact se află în zona suprafețelor de rulare ale profilurilor transversale ale roții și șinei unde razele de curbură sunt mult mai mari decât dimensiunile petei de contact, în prezența neregularităților suprafețelor de rulare. Interesează în primul rând determinarea rigidității contactului roată-șină, coeficienții de frecare, precum și aspectele esențiale ale uzurii suprafețelor de contact.

Trebuie precizat faptul că problemele de contact dintre două corpuri solide îmbracă două aspecte și anume: problema normală și problema tangențială. În problema normală se pleacă de la forma geometrică a corpurilor și se determină dimensiunile petei de contact, distribuția presiunilor normale de contact și relația dintre apropierea corpurilor și forța normală de contact. În cadrul problemei tangențiale, interesează distribuția presiunilor tangențiale de contact și forțele de frecare având ca punct de plecare vitezele de alunecare ale corpurilor și rezultatele problemei normale. În cazul general, cele două probleme sunt cuplate, dar în anumite condiții, ele pot fi tratate separat, așa cum de altfel este cazul sistemului roată-șină.

2.1. Presiuni de contact - rigiditatea contactului

În condițiile contactului roată-șină de tip nonconformal sunt valabile ipotezele contactului Hertzian. Sunt prezentate relațiile de calcul ale dimensiunilor semiaxelor elipsei de contact, presiunii de contact și rigidității contactului. Acești parametri influențează uzura suprafețelor de rulare și dinamica roată-șină. Se arată că dimensiunile elipsei de contact și distribuția presiunii de contact se modifică din cauza ondulațiilor suprafețelor de rulare. Este pus în evidență caracterul neliniar al rigidității contactului în funcție de sarcina pe roată.

Simularea numerică efectuată pentru o roată prevăzută cu profil S 78 pe șină UIC 60 arată că dimensiunile elipsei de contact, când suprafața de rulare a șinei prezintă o ondulație sinusoidală, variază astfel: axa elipsei de-a lungul șinei se mărește în adâncitura ondulației și se reduce la vârful ondulației, în timp ce axa mare a elipsei de contact, care este orientată perpendicular pe șină, are o variație inversă, adică se contractă în adâncitura ondulației și se dilată la vârful ondulației. De asemenea, se observă că semiaxa mare oscilează mai puțin decât cealaltă și, ca urmare, variațiile semiaxei mici vor dicta și variațiile ariei de contact. În consecință, presiunea maximă de contact va avea o variație contrară variației semiaxei de-a lungul șinei, adică presiunea maximă se înregistrează când roata se află pe vârful ondulației, pentru ca apoi, în timp ce roata coboară în adâncitura acesteia, presiunea de contact să atingă valorile cele mai mici. De altfel, pe baza aceluiași rezultate obținute, se constată că apropierea

roată-șină variază în mod asemănător cu presiunea maximă de contact. În fine, se deduce că rigiditatea contactului are să aibă o variație inversă apropierei, respectiv contactul este mai elastic la vârf și mai rigid în adâncitura undulației.

2.2. Coeficienți de frecare, uzarea la contactul roată-șină

În general, mișcarea roții pe șină este însoțită de alunecări pe direcție longitudinală și transversală, precum și de pivotare (spin) datorate fixării rigide a roților pe osie și conicității inversate a profilurilor de rulare ale roților. De asemenea, circulația osiei în regim de tracțiune sau frânare conduce la intensificarea alunecărilor longitudinale. Aceste alunecări sunt date de mișcarea osiei ca și corp rigid și pot fi descrise prin vitezele de alunecare (creep).

Raportul dintre viteza de alunecare datorată mișcării osiei considerată corp rigid și viteza de rostogolire a osiei se numește *pseudoalunecare* (creepage). În elipsa de contact apar și alunecări elastice. În condițiile încărcării osiei cu sarcini în planurile vertical și orizontal, în aria de contact, pe lângă tensiunile normale, se dezvoltă tensiuni tangențiale distribuite care însumate dau forța de frecare și momentul de pivotare (spin). Elipsa de contact se împarte în două zone, una în care se produc numai deformări elastice, numită *zonă de adeziune*, și o alta în care apar alunecări numită *zonă de alunecare*.

Pentru elipsa de contact se deosebesc două margini ale elipsei, respectiv marginea frontală și cea posterioară. Când o particulă intră prin marginea frontală în elipsa de contact ea trece de la starea nedeformată la cea deformată cauzată de transmiterea forței din plan orizontal dintre roată și șină. Practic, particula este supusă unei tensiuni tangențiale și atât timp cât această tensiune este mai mică decât tensiunea tangențială limită dată de tensiunea normală multiplicată de coeficientul de frecare, particula este în zona de adeziune. Pe măsură ce particula se depărtează de marginea frontală, cresc deformația și tensiunea tangențială astfel că aceasta ajunge să fie egală cu tensiunea tangențială limită, moment în care, conform legilor frecării, particula intră în zona de alunecare. Esența problemei tangențiale a contactului roată-șină se referă la stabilirea corelației între pseudoalunecări, forța normală de contact și forța de frecare.

Trebuie menționat faptul că actualele locomotive ale trenurilor de mare viteză sunt construite astfel încât regimul de demarare este mult extins, până la viteze de cca. 100 km/h și chiar mai mult. Pe durata acestui regim, motoarele electrice de tracțiune sunt astfel reglate încât să funcționeze la cuplu constant ceea ce presupune regimul de tracțiune la limita de aderență când pseudoalunecările sunt importante. Așadar, influența vitezei de alunecare asupra coeficientului de frecare nu mai poate fi ignorată și trebuie subliniat că acest aspect nu a mai fost studiat în literatura de specialitate. Este de subliniat faptul că frecvența proprie a sistemului osie-cale este situată între 30-60 Hz și că pentru o distanțare a traverselor la 0,6 m, frecvența de rezonanță apare la viteze de 18-36 m/s, adică 65-130 km/h. Rezultă importanța studierii vibrațiilor parametrice al osiile motoare de la trenurile de mare viteză în perioada regimului de demaraj atât pentru performanțele sistemului de reglare a tracțiunii, cât și pentru problemele de uzură a suprafețelor de rulare.

Pentru calculul forței de frecare se pleacă de la relațiile existente în literatura de specialitate, ca apoi acestea să fie completate astfel încât studiul să fie centrat numai pe cazul alunecărilor longitudinale care interesează în mod deosebit în problema vibrațiilor osiilor motoare în regim de demaraj.

Concluzii edificatoare se obțin pe baza simulării numerice cu aplicație pentru o roată motoare având profil conic în contact cu o șină UIC 60 prezentând o undulație pe suprafața de rulare. Astfel, se observă că viteza de circulație a roții influențează coeficientul de frecare în sensul reducerii acestuia la pseudoalunecări mai mari de 2-3 ‰; rata de creștere coeficientului de frecare la pseudoalunecare zero este mai mare când roata este în adâncitura undulației. Coeficientul de frecare este mai mare pe cea mai mare parte a domeniului pseudoalunecării

considerat pentru simulare. Pentru pseudoalunecări mai mari de 4-5 %, coeficientul de frecare nu mai este influențat de poziția roții pe undulația șinei.

Rezultatele calculului efectuate pentru cazul în care profilul roții este concav arată că, în general, se mențin aceleași aspecte în sensul că viteza duce la reducerea relativă a coeficientului de frecare, iar pe de altă parte, coeficientul de frecare este mai mare când roata calcă peste adâncitura undulației decât atunci când este în vârful acesteia. În fine, trebuie arătat, că în cazul profilului concav, coeficientul de frecare este mai mare.

Uzarea la contactul roată-șină. *Uzarea* este o consecință a procesului de frecare și constă în desprinderea de material și modificarea stării inițiale a suprafețelor de contact. În practică, se întâlnesc frecvent patru tipuri de uzură: uzarea de aderență, de abraziune, de oboseală și de coroziune. *Uzarea de adeziune* se produce prin sudarea și apoi ruperea punților de sudură între microzonele de contact. *Uzarea de abraziune* este provocată de prezența particulelor dure între suprafețele de contact și poate fi observată datorită urmelor disperse de microașchiere. *Uzarea de oboseală* se produce în urma solicitărilor ciclice a suprafețelor de contact, urmate de deformări plastice, de fisuri, ciupituri sau exfoliere. Acest tip de uzare apare mai frecvent la roată. În fine, *uzarea de coroziune* este cauzată de acțiunea factorilor chimici agresivi în conjuncție cu solicitările mecanice.

Dintre cele patru tipuri de uzare, literatura de specialitate indică uzarea de adeziune ca fiind responsabilă de remodelarea suprafețelor de rulare și apariția uzurii ondulatorii atât la șină, cât și la roată.

În această secțiune sunt prezentate câteva aspecte legate de problema modelării uzării de adeziune pentru a identifica parametrii mecanici de care aceasta depinde cu scopul de evalua pe baza lor efectele vibrațiilor parametrice din punct de vedere al uzării.

Modelelor empirice propuse în literatura de specialitate indică lucrul mecanic consumat prin frecare ca mărimea care interesează din punct de vedere al potențialului de uzare a suprafețelor de rulare. Trebuie observat că acesta este o mărime variabilă în timp și că are două componente: o componentă este constantă în timp iar cea de a doua este variabilă. Prima componentă este responsabilă de uzura uniformă a șinei și ca o consecință a acestui fapt este aplatizarea profilului transversal al șinei și deci creșterea razei de curbura a profilului. Ca urmare, contactul roată-șină devine mai rigid. Componenta variabilă în timp este responsabilă de apariția uzurii ondulatorii. Mai trebuie adăugat faptul că uzura se produce în zona de alunecare a petei de contact, dar nu și în zona de adeziune unde nu există mișcare relativă între roată și șină. Deci pentru evaluarea lucrului mecanic consumat prin frecare, trebuie înțeleasă numai partea aferentă zonei de alunecare. Pentru a calcula deci acest lucru mecanic este necesar să se cunoască divizarea petei de contact în cele de două zone.

Pentru cazul analizat, cel al roții motoare, s-a efectuat calculul elipsei de contact, cu demarcarea zonelor de aderență și de alunecare. Se observă diferența considerabilă în ceea ce privește zona de alunecare când roata este în adâncitura undulației comparativ cu situația când roata este pe vârful undulației. Lățimea maximă a zonei de alunecare crește liniar cu pseudolaunecarea.

3. Răspunsul în frecvență al căii de rulare

3.1. Modele de studiu ale vibrațiilor căii

Sunt prezentate elementele importante de construcție ale căii pe traverse de beton. Sunt analizate caracteristicile reologice ale suportului de șină și ale balastului, precum și modelele utilizate pentru acestea. De asemenea, sunt prezentate modelele mecanice pentru studiul vibrațiilor șinei, respectiv modelele cu suport continuu elastic care neglijează influența traverselor ca suport periodic pentru șină și modelele cu rezeme elastice echidistante care iau în calcul și această influență.

3.2. Analiza comparativă a modelelor de studiu

În această secțiune se tratează problemele răspunsului șinei la o forță armonică verticală cu suport fix. Răspunsul șinei va fi evaluat pentru toate cele trei tipuri de modele de cale: model cu suport continuu cu un etaj elastic, cu două etaje elastice, precum și model cu reazeme elastice echidistante. Sunt analizate caracteristicile răspunsului șinei și sunt identificate posibilitățile de aplicare ale celor trei tipuri de modele. Astfel, se arată că modelul cu suport continuu cu un etaj elastic poate fi utilizat în cazul căii pe traverse de lemn, iar domeniul de aplicabilitate se întinde de la 50 Hz până la 6-700 Hz. Pentru acest interval de frecvență, răspunsul șinei este dominat de o rezonanță datorată efectului inerțial cumulat al șinei și traverselor pe suportul elastic dat de traversele de lemn și patul de balast.

Modelul de cale cu suport elastic continuu cu două etaje elastice poate fi aplicat în cazul căii pe traverse de beton de asemenea în domeniul de frecvență cuprins între 50 și 6-700 Hz. În acest caz, răspunsul șinei se aseamănă cu cel al unui sistem elastic cu două grade de libertate și reflectă existența a două frecvențe de rezonanță. Prima frecvență este datorată vibrației sinfazice a șinei și traverselor pe patul de balast, în timp ce la a doua frecvență de rezonanță, șina și traversele vibrează în opoziție de fază. Între cele două frecvențe de rezonanță este intercalată o frecvență de antirezonanță a șinei datorată vibrației traverselor care joacă rolul de absorbitor dinamic. Modelele cu suport elastic continuu prezintă o deficiență structurală care nu permite studiul influenței suportului periodic dat de traverse și acest aspect limitează domeniul lor de aplicabilitate.

Această deficiență este eliminată în cazul modelelor cu reazeme elastice echidistante care sunt capabile să descrie regimul de vibrație al șinei la frecvențele de rezonanță datorate suportului periodic când șina vibrează ca o coardă prinsă de traverse. Caracteristic acestui regim de vibrație este faptul că răspunsul șinei se modifică sensibil după cum forța este aplicată între traverse sau în dreptul unei traverse. Dacă forța de excitație este aplicată între traverse, șina prezintă o frecvență de rezonanță situată la cca. 1070 Hz în cazul șinei UIC 60 pe traverse poziționate la 60 cm una de alta. Dacă forța de excitație este aplicată în dreptul unei traverse, atunci regimul de vibrație al șinei este marcat de o frecvență de antirezonanță situată la o valoare mai mare decât cea a rezonanței (cca. 1100 Hz pentru cazul menționat).

Există o problemă majoră: modelul de șină tip grindă Euler-Bernoulli nu este potrivit pentru că frecvențele de rezonanță-antirezonanță calculate sunt mult mai mari decât cele obținute experimental. Ca urmare, trebuie utilizat modelul de grindă Timoshenko care ia în seamă efectul rotirii secțiunilor datorită forței tăietoare, precum și efectul inerțial al rotirii secțiunilor grinzii. În acest mod, frecvențele de rezonanță-antirezonanță sunt calculate cu acuratețe. Cu toate acestea, receptanța șinei la rezonanță este sensibil supraestimată. Pentru a corecta această deficiență, literatura de specialitate menționează introducerea unei amortizări structurale suplimentare a șinei sau amortizarea suplimentară a modurilor proprii din zona rezonanței. În lucrarea se propune un nou model de suport de șină alcătuit din trei sisteme Kelvin-Voigt orientate tridirecțional care modelează corect modul în care suportul de șină inhibă propagarea undelor de încovoiere prin limitarea rotației secțiunilor șinei în dreptul traverselor.

O altă problemă o reprezintă răspunsul șinei la frecvențe joase, sub 50 Hz. La scăderea frecvenței sub 50 Hz, conform rezultatelor experimentale, receptanța șinei crește, iar acest lucru nu poate fi obținut prin modelele actuale. În lucrare se propune un nou model prin care efectul inerțial al balastului este introdus de un bloc rigid cu un grad de libertate, proprietățile reologice ale balastului sunt modelate prin trei sisteme Kelvin-Voigt orientate tridirecțional, iar terasamentul este modelat de un sistem Kelvin-Voigt în paralel cu un sistem Maxwell. Rezultatele obținute cu acest model sunt în concordanță cu cele experimentale indicate de literatura de specialitate.

3.3. Funcții Green reale, matricea Green a căii

În această secțiune sunt calculate funcțiile Green reale ale șinei care reprezintă răspunsul acesteia la o forță impuls unitar aplicat la un moment dat într-o anumită secțiune a șinei. Funcțiile Green reale sunt calculate (numeric) prin aplicarea transformatei Fourier inverse funcțiilor Green complexe (receptanțele). Cu ajutorul funcțiilor Green reale este asamblată matricea Green a căii care descrie răspunsul șinei de-a lungul distanței dintre două traverse la o forță impuls unitar mobilă. Matricea Green a căii este periodică, atenuată în timp și spațiu și permite simularea răspunsului șinei la o forță armonică mobilă.

Este introdus conceptul de receptanță a șinei sub forță armonică mobilă, iar calculul acestei receptanțe se face pornind de la matricea Green a căii. Se analizează răspunsului dinamic al șinei sub forță armonică mobilă cu evidențierea influenței efectului Doppler în zona de rezonanță a șinei pe suportul periodic al traverselor. Astfel, în locul rezonanței semnalată în cazul excitației cu forță armonică cu suport fix, apar două rezonanțe ale căror frecvențe împreună cu frecvența de rezonanță dată de forța cu suport fix formează o progresie aritmetică. Aceasta face ca odată cu creșterea vitezei, receptanța șinei să scadă și acest aspect este de natură să influențeze mărimea forțelor de contact roată-șină și procesul de apariție și dezvoltare a uzurii ondulatorii a șinei.

Metoda matricei Green a căii este extinsă apoi pentru a studia răspunsul șinei sub acțiunea unor forțe armonice mobile. Sunt introduse conceptele de matrice Green directă și matrice Green conjugată care permit punerea în evidență a componentelor deplasării șinei sub acțiunea unor forțe armonice mobile. Comparând răspunsul șinei la o forță armonică mobilă cu răspunsul la două forțe armonice mobile aflate la o distanță egală cu ampatamentul unui boghiu, simulările numerice arată diferențe semnificative între cele două cazuri.

Contribuții științifice originale

- studierea geometriei contactului roată cu loc plan/șină;
- studierea geometriei contactului roată/șină cu joantă cu introducerea condițiilor de bicontact elastic, acest aspect reprezintă o noutate absolută de mare finețe și constituie premisa studierii dinamice a interacțiunii roată/șină cu joantă cu luarea în considerare a efectului de încărcare-descărcare a contactelor concomitente (bicontact) ale roții cu cele două capete de șină îmbinate prin joantă;
- analiza geometriei roată-șină cu ondulație sinusoidală și generalizare pentru o cazul ondulației oarecare a suprafeței de rulare, cu luarea în considerare a neliniarității introdusă de efectul razei roții asupra poziției punctelor de contact roată/șină și cu evidențierea armonicelor superioare ale deplasării relative roată-șină, factor important privind excitația vibrațiilor parametrică roată-șină cu implicații, în special, asupra fenomenului de uzură;
- analiza presiunilor de contact roată-șină și a rigidității contactului, în ipoteza contactului neliniar de tip Hertzian, atunci când roata se află pe o șină având pe suprafața de rulare o ondulație sinusoidală cu referire la profilul de roată S78 și profilul de șină UIC 60;
- analiza coeficienților de frecare roată/șină și a mărimilor de influență a uzurii în condițiile geometriei contactului roată-șină cu ondulație pe suprafața de rulare; este evaluată variația acestor coeficienți precum și modificarea elipsei de contact incluzând zona de alunecare (responsabilă de uzură) și zona de aderență în funcție de poziția roții de-a lungul ondulației suprafeței de rulare a șinei cu referire la profilul de roată S78 și profilul de șină UIC 60;
- elaborarea unui model complex al căii de rulare având următoarele repere: șina este considerată o grindă infinită Timoshenko pe reazeme elastice echidistante, suportul de șină este modelat prin trei sisteme Kelvin-Voigt orientate tridirecțional, semitraversa este considerată corp rigid cu trei grade de libertate, efectul inerțial al balastului este introdus

de un bloc rigid cu un grad de libertate, proprietățile reologice ale balastului sunt modelate prin trei sisteme Kelvin-Voigt orientate tridirecțional, iar terasamentul este modelat de un sistem Kelvin-Voigt în paralel cu un sistem Maxwell;

- analiza răspunsului în frecvență al șinei cu ajutorul modelului complex descris mai sus cu evidențierea principalelor aspecte caracteristice pe un domeniu extins de frecvență (0-2000 Hz) în acord cu rezultatele experimentale;
- introducerea conceptului de receptanță a șinei sub forță armonică mobilă și calcularea acestor receptanțe pornind de la matricea Green a căii;
- analiza răspunsului dinamic al șinei sub forță armonică mobilă cu evidențierea influenței efectului Doppler în zona de rezonanță a șinei pe suportul periodic al traverselor;
- extinderea metodei matricei Green a căii pentru a studia răspunsul șinei sub acțiunea unor forțe armonice mobile; introducerea conceptelor de matrice Green directă și matrice Green conjugată care permit punerea în evidență a componentelor deplasării șinei sub acțiunea unor forțe armonice mobile.

Lucrări științifice publicate/acceptate spre publicare

a. Lucrări publicate/ acceptate spre publicare în reviste cotate ISI:

Traian Mazilu, *On the dynamic effects of wheel running on discretely supported rail*, in PROCEEDINGS OF THE ROMANIAN ACADEMY SERIES A: MATHEMATICS, PHYSICS, TECHNICAL SCIENCES, INFORMATION SCIENCE - volumul 10, nr. 3 sept.-oct. 2009, pag. 269-276.

<http://www.academiaromana.ro/sectii2002/proceedings/doc2009-3/09-Mazilu.pdf>

Traian Mazilu, *Prediction of the interaction between a simple moving vehicle and an infinite periodically supported rail – Green’s functions approach*, in VEHICLE SYSTEM DYNAMICS revista cu factor de impact 0,724 (Science Index Expanded), 22 pag.

http://www.informaworld.com/smpp/content~db=all?content=10.1080/00423110903248694&jumptype=alert&alerttype=ifirst_author_alert,email

b. Lucrări în curs de publicare în volumul Simpozionului Național de Material Rulant de Cale Ferată ediția a VII-a, 2009:

Traian Mazilu, Mădălina Dumitriu, Cristina Tudorache, Mircea Sebeșan, *Geometria roată-șină la trecerea peste joante*.

Traian Mazilu, Cristina Tudorache, Mădălina Dumitriu, Mircea Sebeșan, *Geometria roată-șină cu uzură ondulatorie*.

Traian Mazilu, Camil Crăciun, Mircea Sebeșan, *Considerații privind răspunsul în frecvență al șinei*.