

## DINAMICA OSCILATORIE A VAGONULUI CISTERNĂ PE PATRU OSII

### OSCILATION DYNAMICS OF FOUR AXLES TANK WAGON

Gelu DAE<sup>1</sup>, Mihaela CARABINEANU<sup>2</sup>, Gabriel POPA<sup>3</sup>, Alexandru BADEA<sup>4</sup>,  
Claudiu-Nicolae BADEA<sup>5</sup>, George DUMITRU<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Autoritatea Feroviară Română, Calea Griviței nr. 393, sectorul 1, București, România.  
e-mail autor: Gelu DAE: dae\_gelu@afer.ro

<sup>3,4,5</sup>Universitatea Politehnică București, Splaiul Independenței nr. 313, București, România.  
<sup>2,6</sup>Autoritatea Feroviară Română - Calea Griviței nr. 393, sectorul 1, București, România.  
e-mail autor: Mihaela CARABINEANU: carabineanu@afer.ro, Gabriel POPA:  
gabi21popa@yahoo.com, Alexandru BADEA: alexsinaia@yahoo.com, Claudiu-Nicolae  
BADEA: casagalbenas@yahoo.com, George DUMITRU: george.dumitru.cfr@gmail.com

**Rezumat:** Stabilitatea laterală a vehiculelor feroviare a fost un domeniu de cercetare de mai multe decenii, în principal, motivat de deraierea accidentală a vehiculelor și vitezele mai mari de circulație, dar și de problemele legate de consumul redus de energie și de costurile de întreținere a căii, solicitările fiind pentru greutatea cât mai mică ale vehiculului. În timpul funcționării de zi cu zi, vehiculele feroviare sunt supuse la influențe laterale mari, la neregularități ale căii ferate, curbe de cale, ceea ce duce la deviații mari ale suspensiei și creșterii sensibilității la vânt lateral. În prezenta lucrare, s-au efectuat simulări multicorp ale unui vehicul de mare viteză la influență laterală mare din curbele căii și neregularităților căii ferate. Măsurători pe teren corespunzătoare deviațiilor relative laterale și verticale în suspensia secundară au fost efectuate la viteze mari de circulație și au folosit pentru analizarea simulărilor multicorp, din care a rezultat o bună concordanță între măsurători și simulări.

**Cuvinte cheie:** risc de deraiere, simulări multicorp, suspensie, frecvență, arc pneumatic.

**Abstract:** The lateral stability of railway vehicles has been an area of research for many decades, mainly motivated by the derailment accidentally vehicles and higher speeds of movement, but also issues related to low energy consumption and maintenance costs of the path, the application forces for weights being as small for vehicle. During everyday operation, the railway vehicles are subject to influences large side, irregularities in the track, curved track, which leads to large deviations of suspension and increased sensitivity to side wind. In this paper, multibody simulations were made of a high-speed vehicle influence of large lateral track curves and irregularities railway vehicle. Field measurements corresponding lateral and vertical deviations relative to the secondary suspension were carried out at speeds of movement and used for analysis of multibody simulations, which showed a good agreement between measurements and simulations.

**Keywords:** risk of derailment, multibody simulations, suspension, frequency, pneumatic spring

## 1. INTRODUCERE

Un vehicul feroviar constă adesea dintr-o cutie susținută de două roți care rulează cu

viteză dar este proiectat și ca vehicul feroviar pe boghiuri. În figura 1 sunt prezentate schematic elementele de bază ale unui vehicul feroviar, inclusiv sistemul de coordonate al cutiei vehiculului și sunt asociate componentele de mișcare. (citându-se bibliografia corespunzătoare) și se vor preciza obiectivele lucrării.

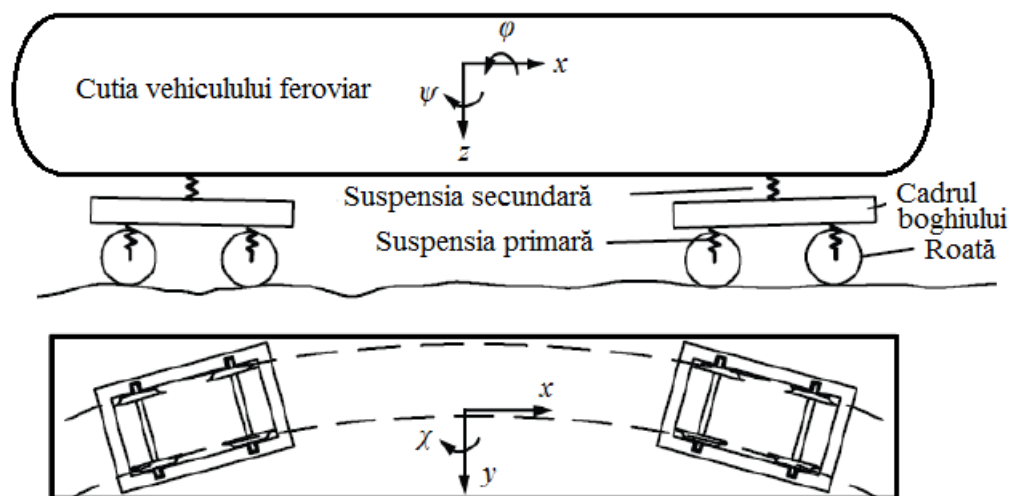


Fig. 1. Vedere laterală și de sus ale unui vehicul feroviar pe boghiuri.  $x$  - mișcare longitudinală,  $y$  - mișcare laterală,  $z$  - mișcare verticală,  $\varphi$  - mișcare de rotație,  $\chi$  - mișcare de translație și  $\psi$  - mișcare de girație [1].

Vehiculul constă dintr-o caroserie susținută de cele două boghiuri prin suspensia secundară. Fiecare boghiu este format dintr-un cadru și două osii montate, unite prin suspensia primară. Atât suspensia primară cât și cea secundară include arcuri și elemente de amortizare. Exemple sunt arcuri cu aer, arcuri elicoidale, arcuri din cauciuc și amortizoare hidraulice [3]. Tipul elementelor de amortizare depinde de caracteristicile suspensiei dorite. În plus, suspensiile includ tampoane și legături de arc pentru omogenizarea șocurilor, delimitând mișcările suspensie în direcție verticală și laterală. Transmiterea forței în direcție longitudinală, se realizează, de obicei, prin tije de tracțiune (nu este reprezentată în figura 1). Suspensia secundară este asemenea, dotată cu o bară antiruliu legată de boghiu, contracarând mișcare de rotație a caroseriei (nu este reprezentată în figura 1). Un accent deosebit este pus pe dinamica laterală a vehiculului feroviar, deoarece încărcările și excitațiile la cea laterală prezintă o importanță deosebită în cadrul acestei lucrări. O definiție a diferitelor tipuri de neregularități ale căii ferate este dată în figura 2.

## 2. DINAMICA LATERALĂ A VEHICULULUI FEROVIAȘ PE CALEA TANGENTĂ

Un vehicul care rulează pe o șină de cale ferată este supus unor influențe laterale datorită neregularităților acestuia [1]. Aceste neregularități reprezintă abateri de la geometria nominală a căii. Acestea influențează mișcările vehiculului din cauza excitațiilor osiilor și în general, au un impact mare asupra forțelor în contactul roată-șină și asupra confortului la mers. Din lateralul căii pot apărea neregularități cu lungime de undă lungă care pot provoca frecvențe joase și mișcări de ruluu la cutia vehiculului, ceea ce poate duce la scăderea stabilității laterale [1].

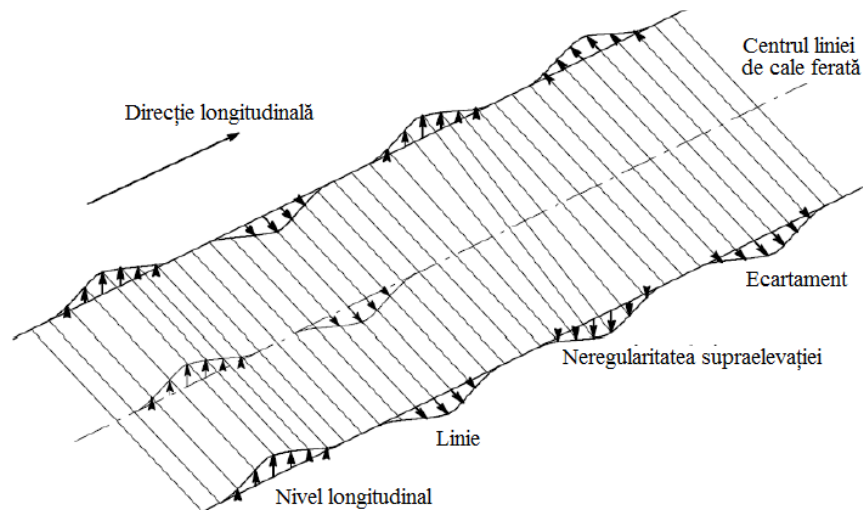


Fig. 2. Definiția neregularităților ale căii ferate [2].

Tangenta (dreapta) de cale ferată a unui vehicul este alături de neregularitățile căii ferate afectată de impacturile laterale din cauza comportamentului de rulare a vehiculului în sine. Deplasarea vehicul peste neregularitățile căii poate avea loc la viteză mare și în unele cazuri, acest lucru ar putea afecta, de asemenea, capacitatea vehiculului de a rezista forțelor laterale.

Suprafața de rulare a unei roți de cale ferată are o formă conică și pentru boghiurile cu două osii acest lucru duce adesea la un comportament de autostabilizare laterală a osiilor atunci când rulează de-a lungul liniei tangente. Dar, privind la mijlocul unei osii libere de-a lungul căii, se poate observa o mișcare laterală sinusoidală, (figura 3). Acest fenomen se numește mișcare de șerpuire și a fost descrisă pentru prima dată în [4]. Astfel, presupunând inițial o deplasare laterală  $y_0$  a osiei în cale, deplasarea laterală  $y(t)$  a centrului de greutate a osiei montate în raport cu centrul căii poate fi exprimată prin:

$$y(t) = y_0 \cdot \sin \omega t, \quad (1)$$

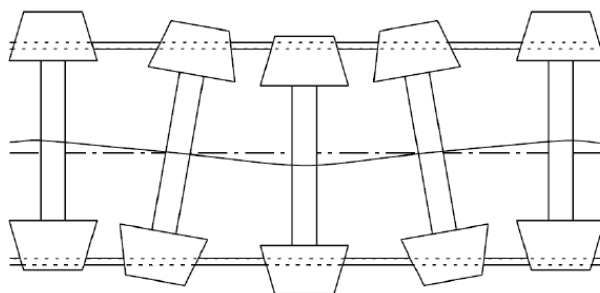


Fig. 3. Mișcare de șerpuire a osiei libere [1].

Lungimea de undă  $L_w$  a acestei mișcări sinusoidale depinde de o jumătate din distanța dintre contactul roții  $b_0$ , raza nominală a roții  $r_0$  și așa-numita conicitate echivalentă  $\lambda$ , și poate fi scrisă prin:

$$L_w = 2\pi \cdot \frac{v}{\omega} = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{b_0 \cdot r_0}{\lambda}} \quad (2)$$

care este cunoscută sub numele de formula Klingel. Lungimea de undă este considerată cu aproximație independentă de viteza  $v$ . Această formulă este valabilă pentru o cale liberă a osiei montate. Pentru osiile din cadrul boghiurilor, influențele suspensiei și forțele de frecare roată - șină duc la o lungime de undă în creștere în cazul creșterii vitezei.

Acum analizând un singur boghiu și presupunând o mișcare relativă zero a cadrului boghiului, stabilitatea de rulare este dependentă de proprietățile suspensiei primare și reprezintă o soluție a unui model liniarizat. Caracteristica ecuației obținute din ecuațiile de mișcare, de obicei conține o soluție complexă conjugată pentru fiecare grad de libertate. Pe baza obținerii soluțiilor rădăcinii locului geometric în diagrame se poate demonstra viteza critică de rulare a boghiului. În plan orizontal suspensia primară este mai rigidă ceea ce conduce la viteze superioare critice. Cu toate acestea, capacitatea de direcție a osiilor în curbe devine limitată și în același timp, creează alte probleme datorită forțelor laterale la contactul roată - șină.

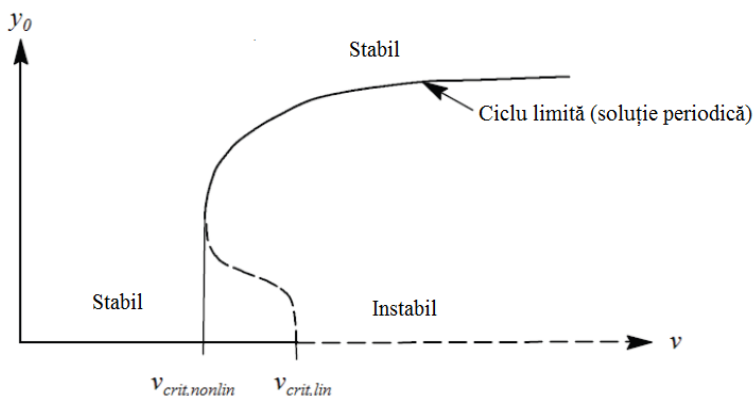


Fig. 4. Diagrama ciclului limită reprezentând amplitudinea mișcării de șerpuire  $y_0$  al unei osii montate într-un cadru de boghiu în funcție de viteza  $v$  a vehiculului [2].

Din moment ce vehiculele feroviare sunt sisteme neliniare din cauza sistemelor de suspensie, contactele roată - șină și conicitatea echivalentă ca funcție a deplasării laterale a osiile montate, alte efecte intră în joc, care nu sunt prezente pentru un sistem liniar. Acest lucru poate avea ca rezultat mai multe soluții stabile pentru același sistem în aceleași condiții. Este atinsă limita de stabilitate pentru sistemul neliniar pentru viteza cea mai mică în cazul în care o soluție periodică, adică o oscilație constantă de amplitudine, se poate produce. Un exemplu de diagramă al ciclului limită al mișcării de șerpuire al unei osii montate într-un cadru de boghiu este prezentată în figura 4, prezentând amplitudinea mișcării de șerpuire  $y_0$  în funcție de viteza  $v$  a vehiculului.

Pe lângă proprietățile suspensie, conicitățile echivalente în contactul roată-șină și diferitele mase ale vehiculului influențează stabilitatea rulării. Cu toate acestea, poate fi greu de găsit un caz optim, deoarece diferitele proprietăți se pot contracara adesea reciproc. În literatura de specialitate întâlnim adesea două fenomene de mișcare periodice diferite care provoacă instabilitate laterală și aici se face referire la: frecvență înaltă sau osie/boghiu și frecvență joasă sau instabilitatea cutiei vehiculului [1], [5], [6]. Instabilitatea cu frecvență înaltă apare de obicei în combinație cu conicitatea echivalentă ridicată la viteze de funcționare de 100 [km/h], cu frecvențe între 4 și 10 [Hz]. Pe de altă parte instabilitatea cu frecvență joasă, are loc, de asemenea, la viteze de rulare de 100 [km/h], dar la frecvențe cuprinse între 1 și 2 [Hz] și conicitatea echivalentă joasă. Este un fenomen de rezonanță și poate fi observat în

cazul în care mișcarea de șerpuire are un nivel scăzut al frecvenței unei osii montate care coincide cu o frecvență naturală a vehiculului.

Pe linia tangentă, apare influența unei forțe laterale la care riscul de deraiere al vehiculului este mai mic în comparație cu linia în curbă. Cu toate acestea, o interacțiune între mersul cu instabilitate al cutiei vehiculului și influența unei forțe laterale poate influența vehiculul. Informații suplimentare despre dinamica laterală a vehiculului feroviar de pe linia tangentă, având în vedere în [1], [5], [6], unde se regăsesc explicații detaliate cu privire la stabilitatea laterală a diferitelor tipuri de boghiuri ale vehiculelor sunt prezentate în [6].

### 3. DINAMICA LATERALĂ A VEHICULULUI FEROVIAȘ ÎN CURBĂ

Capacitatea de orientare a unei osii montate s-a descris la punctul 2, de asemenea, există curbe ale căii pe orizontal. Analizând o simplă osie montată într-o curbă, se poate observa în figura 5, osia montată va fi deplasată lateral către exterior,  $r_{ext}$  la  $r_{int}$ , raza de rulare va fi închisă în raport cu distanța de deplasare longitudinală.

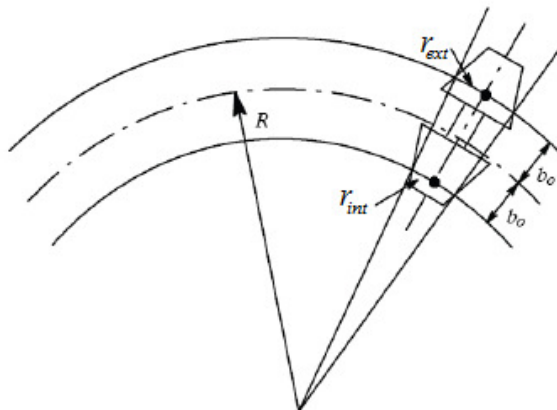


Fig. 5. Curba de direcție a unei osii montate libere, cu roți conice [7]

Pentru direcția radială perfectă, adică în cazul în care punctele de axul roții către centrul curbei, condițiile geometrice pot fi astfel scrise astfel:

$$\frac{r_{ext}}{r_{int}} = \frac{R + b_0}{R - b_0} \quad (3)$$

unde  $R$  este raza curbei căii. Pentru roțile conice raza de rulare  $r_{ext}$  și  $r_{int}$  se pot scrie astfel:

$$\begin{aligned} r_{ext} &= r_0 + \lambda_0 y \\ r_{int} &= r_0 - \lambda_0 y \end{aligned} \quad (4)$$

unde  $r_0$  este raza de rulare nominală și  $\lambda_0$  este conicitatea roții. Deplasarea laterală a roților de care este nevoie pentru direcție perfectă este:

$$y = \frac{r_0 \cdot b_0}{\lambda_0 \cdot R} \quad (5)$$

Ecuatiile de la (3) la (5) reprezintă o simplificare și neglijare a forțelor de frecare pe osia montată.

Instabilitatea la rulare pe linia curbă este o problemă minoră, comparativ cu cea pe linia tangentă. Cu toate acestea, instabilitatea cutiei vehiculului poate să apară în curbe cu raze mari. Explicații mai detaliate ale orientării în curbe a osiilor montate, boghiurilor și vehiculelor feroviare se găsesc, printre altele, în [1], [6].

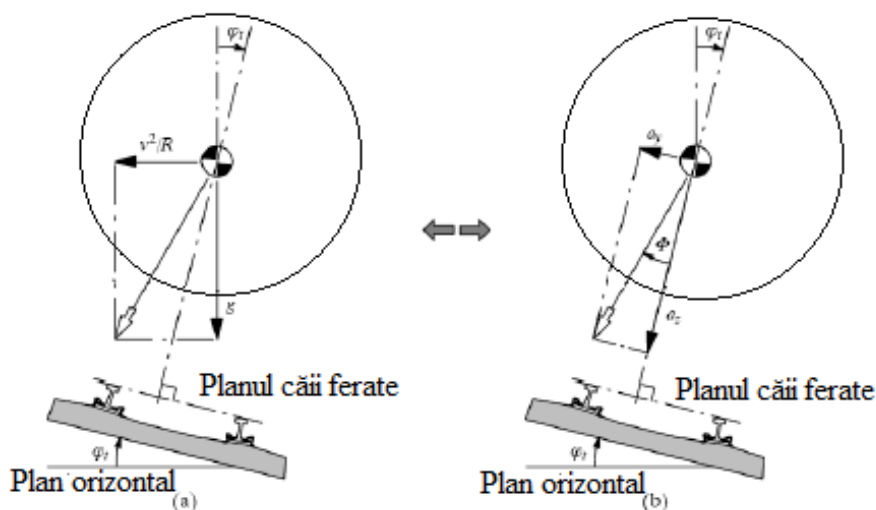


Fig. 6. Vedere din spate a cutiei vehiculului feroviar la circulația în curbă, (a) accelerația laterală în plan orizontal, (b) accelerația laterală în planul căii [2].

Un vehicul feroviar care circulă într-o curbă a căii, în plan orizontal cu neregularități ale căii ferate este supus unor influențe laterale suplimentare [8]. În figura 6 se observă o vedere din spate a cutiei unui vehicul feroviar la circulația în linie curbă. În figura 6 (a) se observă un vehicul care circulă în curbă și care rulează la viteza  $v$  printr-o curbă cu raza  $R$ , supus accelerației centrifuge  $v^2 / R$  și accelerației gravitaționale  $g$ . Folosind ca "rezultat" accelerația, o transformare în planul căii supraînălțate poate fi făcută dând accelerația laterală în planul de cale  $a_y$  și vertical perpendicular pe accelerație în planul de cale  $a_z$ , se observă în figura 6 (b). Supraînălțarea căii cu unghiul  $\varphi_t$ , accelerația cvasistatică laterală corespunzătoare în planul șinelor [9] poate să fie exprimate ca:

$$a_y = \frac{v^2}{R} \cdot \cos \omega_t - g \cdot \sin \omega_t = \frac{v^2}{R} \cdot \cos \omega_t - g \cdot \frac{h_t}{2b_0} \quad (6)$$

unde  $h_t$  este supraînălțarea căii și  $b_0$  este jumătatea distanței nominale dintre punctele de contact roată - șină ale unei osii montate. Considerând  $v^2 / R \leq 0,3$  și unghiuri de supraînălțare mici, ecuația (6) poate fi aproximată prin:

$$a_y \approx \frac{v^2}{R} - g \cdot \sin \omega_t = \frac{v^2}{R} - g \cdot \frac{h_t}{2b_0} \quad (7)$$

Supraînălțarea liniei care duce la zero accelerația laterală în planul de căii, la o anumită viteză  $v$  și raza curbei  $R$ , și se numește echilibrul de supraînălțare  $h_{eq}$ , conform figurii 7 (b). Poate fi exprimată ca:

$$h_{eq} \approx \frac{2b_0}{g} \cdot \frac{v^2}{R} \quad (8)$$

În cazul în care supraînălțarea căii  $h_t$  este la mai mică decât  $h_{eq}$  avem un deficit de supraînălțare  $h_d$  conform figurilor 7 (a) și 7 (c).

$$h_d = h_{eq} - h_t \approx \frac{2b_0}{g} \cdot \frac{v^2}{R} - h_t \approx \frac{2b_0}{g} \cdot a_y \quad (9)$$

Rularea cutiei vehiculului în raport cu calea, se poate observa, figura 7 (a) și 7 (c), care este

de asemenea influențată de suspensia vehiculului și proprietățile de masă.

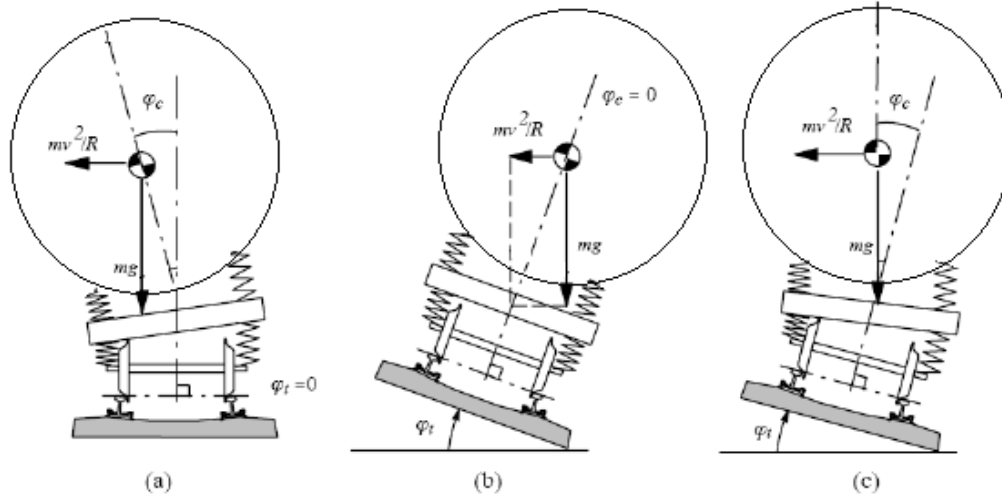


Fig. 7. Vedere din spate a cutiei vehiculului la circulația în partea dreaptă a curbei, (a) nici o deficiență de supraînălțare, (b) supraînălțare echilibrată, (c) supraînălțare și deficiență de supraînălțare [1].

Folosind raportul dintre unghiul de rulare al cutiei vehiculului  $\varphi_c$  la supraînălțarea căii cu unghiul  $\varphi_t$  la menținerea silențioasă în curbă, se poate defini coeficientul de flexibilitate a vehiculului adimensional.

$$C_\varphi = \frac{\varphi_{c,v=0}}{\varphi_t} \quad (10)$$

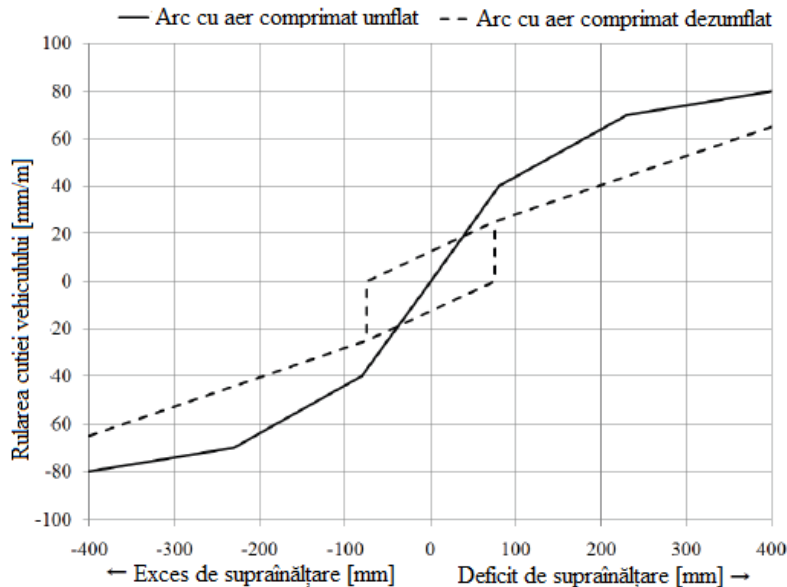


Fig. 8. Exemplu de unghiul de rulare al unei cutii a unui vehicul feroviar suspendat de arcuri pneumatice pentru exces de supraînălțare și deficit de supraînălțare. Rularea pozitivă carosierii reprezintă rularea spre partea exterioară a curbei [5]

Rolul unui arc pneumatic la un vehicul feroviar la mersul în curbă este prezentat în figura 8. Relația este neliniară și simplificată folosind linii drepte. Punctele critice pentru

arcuri de aer comprimat provin de la ciocnirile în punctele de contact, în momentele opririlor, atât în suspensia primară și cât și în cea secundară. Pentru arcuri pneumatice defecte, cutia vehiculului feroviar este sprijinită pe arcuri de cauciuc auxiliare, care sunt incluse din construcție în arcurile cu aer comprimat. Arcurile auxiliare pot limita mișcarea suspensiei laterale și astfel obținându-se o mișcare mai mică a cutiei vehiculului și pentru o deficiență redusă de supraînălțare sau exces, poate fi observat fenomenul de histerezis din cauza caracteristicilor arcului.

În cazul deficienței de supraînălțare, forțele din contactul roată - șină sunt net superioare în ambele direcții laterale și verticale (figura 9).

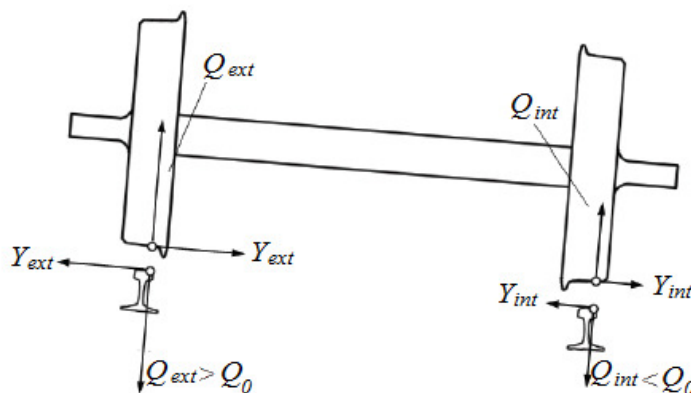


Fig. 9. Forțele roată - șină în timpul mersului în curbe la deficiența de supraînălțare [2]

Așa cum s-a arătat anterior distribuția forțelor verticale la contactul roată - șină din cadrul unei osii montate depinde, de asemenea, de defecțiuni ale suspensie și de proprietățile masei cutiei vehiculului feroviar. Micșorarea forței verticale la contactul roată - șină (interior) este numită roată descărcată.

Apariția vântului poate duce la forțele verticale roată - șină chiar mai mici. Roata descărcată poate fi utilizată ca și criteriu de deraiere a vehiculului [10]. Deficiența de supraînălțare trebuie să fie limitată din cauza riscului de disconfort la mers și la deplasare laterală a căii. Viteza limită poate fi găsită utilizând ecuația (7), astfel:

$$v_{lim} = \sqrt{R \left( a_{y,lim} + g \frac{h_t}{2b_0} \right)} = \sqrt{R(h_{d,lim} + h_t) \frac{g}{2b_0}} \quad (11)$$

#### 4. ARCURI PNEUMATICE ȘI TAMPOANE

Arcuri pneumatice au devenit elemente comune de suspensie în suspensia secundară a vehiculelor feroviare de mare viteză [11], deoarece acestea oferă un confort bun la mers și comportamentul dinamic este aproape independent de sarcina verticală a cutiei vehiculului. În afara de direcția verticală, arcuri pneumatice transferă forțe în direcție longitudinală și laterală. Din cauza forfecării, de asemenea, momente sunt transferate prin intermediul arcului. Arcurile pneumatice reprezintă componente extrem de neliniare cu caracteristici de histerezis.

Arcurile pneumatice pot fi montate în două, trei sau patru puncte ale vehiculului feroviar. La montarea în două puncte ale vehiculului, volumele de aer din ambelor arcuri pneumatice de pe un boghiu sunt conectate între ele, în timp ce montarea în patru puncte



implică patru arcuri independente de aer pe un vehicul. Pentru montarea în trei puncte a arcurilor pneumatice, acestea sunt independente doar pe un singur boghiu. Montarea arcurilor pneumatice în două puncte poate fi un avantaj în ceea ce privește controlul, egalizarea și mișcarea. De asemenea, arcul pneumatic este utilizat și ca mecanism simplu de înclinare [1]. La deficiențe de supraînălțare ridicată, vehiculul reacționează în mod normal, cu o deviație laterală mare a suspensiei, în special în suspensia secundară și deplasarea laterală a cutiei vehiculului în raport cu centrul căii. Cutia vehiculului se deplasează de obicei spre exteriorul curbei (figura 7). În acest caz, suspensia secundară are șocuri de forfecare laterală substanțiale, și comportamentul său la abateri mari devine de interes deosebit.

Deformarea laterală este în cele din urmă delimitată de tampoane, conform figurii 10, care introduc, de asemenea, alte caracteristici neliniare la suspensie.

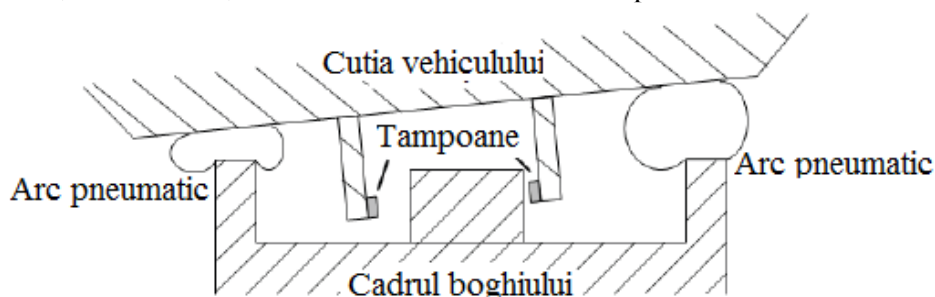


Fig. 10. Deformarea laterală a cutiei vehiculului

Modelarea arcurilor pneumatice a fost subiect pentru mai multe studii [12], [13], [14]. Din aceste modele se pot distinge două tipuri, modelul stabilit după proprietățile termodinamice ale arcurilor sunt [13], [14], sau modelul stabilit după dispozitivul mecanic [12]. Diferența dintre modelele termodinamice constă în modelarea fluxului de aer între mai puțin și volumul auxiliar. Debitul de se presupune a fi fie o masă constantă în mișcare dinamică [12], sau o masă a fluxului [14]. În [13], [14] caracteristicile laterale ale arcului sunt reprezentate și modelate ca arcuri liniare [14] sau ca o combinație liniară între arc și amortizor care este conectat în paralel [13]. În ambele modele caracteristicile verticale și laterale sunt independente unele de altele și forțele laterale sunt derivate din deformarea laterală și viteza de deviere. Modelul mecanic al arcului pneumatic prezentat în [12] consideră caracteristicile laterale în trei părți, contribuții elastice, vâscoase și de fricțiune. Aici piesa elastică depinde și momentul de rotație, între partea superioară și partea inferioară a arcului.

## 6. CONCLUZII

Scopul acestui studiu a fost de a investiga răspunsul și stabilitatea laterală a unui vehiculului feroviar de mare viteză sub influența unor forțe laterale mari ale neregularităților căii ferate, curbe și vânt lateral inconstant. În lucrarea s-a studiat dinamica vehiculului, la viteze mari de deplasare, în zona deformațiilor mari a suspensiei datorită impactului lateral mare din curbele căii și neregularitățile căii ferate, în scopul de a analiza fiabilitatea simulării multicorp în aceste condiții și în ceea ce privește riscul de răsturnare a vehiculului. Simulările multicorp au fost realizate, utilizând diferite modele de suspensie și comparate cu măsurătorile de pe teren.

S-ar putea demonstra că simulările multicorp estimează mișcările relative din suspensia secundară. Simulările multicorp au arătat un acord bun cu măsurătorile de pe

teren în deplasările laterale ale cutiei vehiculului cu boghiurile, în timp ce rularea de mișcare relativă a fost supraestimată de cutia vehiculului, simulările sunt mai mari la deficiențe sau devieri ale suspensie și supraînălțări din cauza efectelor de nivelare a arcurilor pneumatice. Lipsa frecării la arcurile pneumatice a dus la deplasări mai mari. Mai mult decât atât, a fost analizat răspunsul unui vehicul feroviar de mare viteză supus vântului lateral inconstant în timpul rulării acestuia în curbă

În ceea ce privește efectele la devieri mari ale suspensie și efectele suplimentare în ceea ce privește aerul s-a constatat că acestea pot fi corectate cu ajutorul arcurilor pneumatice. Aceasta include mecanismul de nivelare a arcurilor precum și eventualele legături pneumatice ale arcurilor pneumatice. De asemenea, alte modele existente de arcuri pneumatice pot fi utilizate la construcția suspensie vehiculelor feroviare supuse la deformări mari. În general, influența neregularităților căii ferate poate duce la deraierea vehiculului feroviar fapt care prezintă un interes deosebit pentru cercetările ulterioare.

## BIBLIOGRAFIE

- [1] **E. Andersson, M. Berg, S. Stichel**, „*Rail Vehicle Dynamics*”, Dep. of Aeronautical and Vehicle Engineering, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden, 2007.
- [2] **I. Sebeșan și D. Hanganu**, „*Proiectarea suspensiilor pentru vehicule pe șine*” Editura Tehnică, București 1993.
- [3] **I. Sebeșan, C. N. Badea, V. Ștefan, M. R. Sebeșan, A. Badea, M. Litră**, „*Aspects of the Operation Shock Absorber on Freight Wagons*”. Journal of the Balkan Tribological Association, Volume: 21 Issue: 3, pp.700-710 (2015).
- [4] **J. Klingel**, „*Über den Lauf von Eisenbahnwagen auf gerader Bahn*”, Organ für die Fortschritte des Eisenbahnwesens, Neue Folge 20, pp 113–123, Tafel XXI, 1883.
- [5] **S. Iwnicki**, „*Handbook of Railway Vehicle Dynamics*”, Textbook, CRC Press, Taylor & Francis, Boca Raton, USA, 2006.
- [6] **K. Knothe, and S. Stichel**, „*Schienenfahrzeugdynamik*”, Springer, Berlin, Germany, 2003.
- [7] **E. Andersson, and M. Berg**, „*Railway Systems and Rail Vehicles*” (in Swedish: Spårtrafiksystem och spårfordon), Dep. Of Aeronautical and Vehicle Engineering, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden, 2007.
- [8] **I. Sebeșan, G. Popa, C. N. Badea, A. Badea**, „*Influence shock attack on safety guidance*”, *Applied Mechanics and Materials*, Vols. 809-810, pp 1091-1096 © 2015 Trans Tech Publications, Switzerland.
- [9] **I. Sebeșan**, „*Dinamica Vehiculelor Feroviare*”, Editura MatrixRom, București 2011.
- [10] **G. Popa, I. Sebeșan, M. A. Spiroiu, C. N. Badea**, „*Safety Against Derailment for Railway Vehicles*”, *Applied Mechanics and Materials* Vol. 659 (2014) pp. 223-230 © (2014) Trans Tech Publications, Switzerland.
- [11] **G. Popa, C. N. Badea, A. Badea**, „*Pneumatic air springs for railway vehicles*”, *Bulletin of the Transilvania University of Brasov*, vol. 7 (56), Special ISSUE No. 1, 2014.
- [12] **M. Berg**, „*A three-dimensional airspring model with friction and orifice damping*”, *Vehicle System Dynamics* 33 Supplement, pp. 528–539, 2000.
- [13] Intec GmbH: SIMPACK Reference Guide - SIMPACK Release 8.9, 2008, software available at <http://www.simpack.de>.
- [14] **O. Krettek, and J. Grajnert**, „*Die Modelldarstellung pneumatischer*”, *Fahrzeugfederungen und die Vorauswahl der Modellparameter*, ZEV + DET Glas. Ann. 115 Nr. 5, pp. 142–153, 1991.