

SUSPENSIA SECUNDARĂ ACTIVĂ A VEHICULULUI FERROVIAR

ACTIVE SECONDARY SUSPENSION OF THE RAILWAY VEHICLE

Marin PREDA¹, Lucian BLAGA², George MICU³,
Dragoș Marian BALINT⁴, Claudiu-Nicolae BADEA⁵, George DUMITRU⁶

¹Autoritatea Feroviară Română - Calea Griviței nr. 393, sectorul 1, București, România
e-mail autor: Marin PREDA, marinpreda54@yahoo.com

^{2,3,4,5,6}Autoritatea Feroviară Română - Calea Griviței nr. 393, sectorul 1, București, România
e-mail autori: Lucian BLAGA, lucianblaga@afer.ro, George MICU, micu.george@afer.ro
Dragoș Marian BALINT, balint_dragos@yahoo.com, Claudiu-Nicolae BADEA,
badeaclaudiu@gmail.com, George DUMITRU, george.dumitru.cfr@gmail.com

Rezumat: Multe concepte diferite de suspensie activă pentru a îmbunătăți confortul mersului la vehiculele feroviare au fost cercetate de-a lungul anilor. De obicei, este examinat controlul simultan al mai multor modele. Această secțiune oferă o imagine de ansamblu asupra altor studii de cercetare care utilizează dinamică și / sau controlul cvasi-static pentru îmbunătățirea confortului mersului, urmate de implementările practice ale unor astfel de concepte. În plus, cercetarea și compararea a două metode de control, elasticitate infinită și controlul elastic fără amortizare, a fost efectuată în cadrul acestei lucrări. Sunt prezentate conceptele acestor două metode, care se referă la studiile anterioare.

Cuvinte cheie: amortizor, suspensie, boghiu, vibrație, cvasi-static.

Abstract: Many different concepts of active suspension to improve ride comfort in rail vehicles have been investigated throughout the years. Usually, simultaneous control of several modes is examined. This section gives an overview of other research studies applying dynamic and/or quasi-static control to improve ride comfort, followed by practical implementations of such concepts. Further, investigation and comparison of two control methods, sky-hook damping and H_∞ control, has been performed within this work. The concepts of these two methods are presented, referring to previous research studies.

Keywords: damper, suspension, bogie, vibration, quasi-static.

1. INTRODUCERE

Viteza sporită este o modalitate prin care vehiculele feroviare sunt nevoite să concureze cu alte mijloace de transport. Cu toate acestea, vitezele mai mari generează de obicei forțe și accelerații crescute pe vehicul, care afectează negativ confortul în timpul mersului. Prin urmare, tehnologia activă în suspensia secundară a sistemului poate fi o soluție pentru a obține îmbunătățiri ale confortului în timpul mersului în cazurile în care suspensia pasivă convențională nu poate fi optimizată.

Conceptul de tehnologie activă în vehiculele feroviare a fost studiat teoretic și experimental timp de mai multe decenii, prezentând în general îmbunătățiri semnificative ale confortului în timpul mersului comparativ cu un sistem pasiv de suspensie. Cu toate acestea, sistemul de suspensie activă nu a avut încă un progres convingător în exploatare (cu excepția tehnologiei trenului înclinat [1]), așa cum a fost experimentat, de exemplu, în

industria aeronautică și în industria automobilelor. Motivul principal al lipsei de succes este cel mai probabil că soluțiile oferite au fost prea scumpe în raport cu beneficiile obținute. Comparativ cu soluția pasivă, soluția activă a sistemului de suspensie trebuie să se dovedească cel puțin la fel de fiabilă și sigură, pentru a fi luată în considerare ca opțiune. Cu toate acestea, dacă se poate găsi un concept care gestionează simultan performanțe bune și costuri acceptabile, există un potențial semnificativ de implementare viitoare.

Suspensia secundară activă a vehiculelor feroviare poate fi pusă în aplicare pentru a realiza una sau mai multe din următoarele obiective: 1) îmbunătățirea confortului pasagerilor; 2) să mențină un confort sporit al mersului chiar și atunci când viteza vehiculului este mărită; 3) să mențină un confort sporit al mersului, când condițiile traseului sunt nefavorabile; 4) lățimea cutiei vehiculului este crescută; 5) greutatea cutiei vehiculului este redusă.

Dacă confortul mersului este deja bun, îmbunătățiri suplimentare la viteza neschimbată a vehiculului și în general, condițiile de parcurs nu sunt justificate din cauza costurilor ridicate ale implementării sistemului activ. Cu toate acestea, obiectivul 2) are mari posibilități pentru îmbunătățiri eficiente din punct de vedere al costurilor, deoarece viteza vehiculului poate fi mărită. Mai mult, obiectivul 3) are un potențial bun de a fi meritat investiția tehnologiei active, deoarece costurile de întreținere a căii pot fi reduse. În plus, lățimea crescută a cutiei vehiculului care permite mai multe scaune (obiectivul 4), precum și greutatea redusă a caroseriei vehiculului (obiectivul 5) poate fi foarte interesantă din punct de vedere economic pentru operatorii feroviari.

În general, principiul unui sistem de suspensie activă se bazează pe ideea de a controla anumite semnale (acelerațiile cutiei vehiculului) cu semnalele în șine, adică prin intermediul unei bucle închise (figura 1).

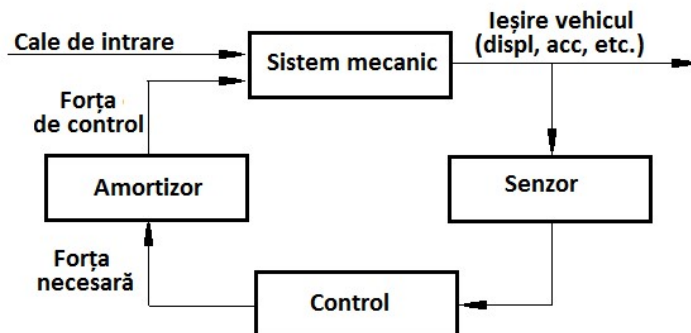


Fig. 1. Principiul unui sistem de suspensie activă.

Pentru a realiza această buclă de control în suspensia unui vehicul feroviar, amortizoarele, senzorii și un controler trebuie să fie incluse în sistemul vehiculului. Amortizorul ideal generează exact aceeași forță pe care i se spune să o genereze pe o lățime de bandă infinită și fără întârziere. În realitate, acest lucru nu este posibil și suspensia activă implică întotdeauna o serie de compromisuri între diferiți parametri, cum ar fi performanța dispozitivului de acționare și cost.

2. SUSPENSIA ACTIVĂ PENTRU ÎMBUNĂTĂȚIREA CONFORTULUI MERSULUI

Există diferite alternative pentru modul de implementare a amortizoarelor în suspensia secundară. O modalitate este de a monta amortizoarele în mediul boghiului în combinație cu

componentele pasive existente, în serie sau în paralel. Montarea amortizorului în paralel cu arcul pasiv permite dimensiunea redusă a amortizorului, deoarece arcul poate fi în principal responsabil pentru preluarea sarcinilor cvasi-statice necesare, fie verticale, fie laterale. Conectarea amortizorului în serie cu componente pasive poate fi benefică dacă performanța dispozitivului de acționare nu este suficientă pentru a avea grijă de vibrațiile de înaltă frecvență. O a doua alternativă este aceea de a înlocui complet componentele pasive cu ajutorul amortizoarelor. Acest lucru necesită dispozitive de acționare fiabile, care asigură capacitatea de a lucra în modul pasiv în cazul defectării amortizorului.

Există două concepte generale de suspensie activă, așa numitele ful-activ și semi-activ, practic guvernate de cantitatea necesară de putere externă [2]. Suspensia pe deplin activă oferă un control de înaltă performanță și oferă cel mai bun răspuns într-un spectru larg de frecvențe. Este capabilă să genereze o forță în direcția opusă vitezei relative a amortizorului, ceea ce înseamnă că energia este transferată și disipată din sistemul de suspensie. Dar necesită mulți senzori și o sursă de alimentare externă, precum și o metodă sofisticată de control [3].

Între sistemul pasiv și cel complet activ există sistemul de suspensie semi-activ. Forța de acționare depinde de viteza relativă a amortizorului, adică de diferența de viteză dintre cele două corpuri în care este amplasat amortizorul. În comparație cu sistemul complet activ, acesta este mai puțin complex, mai ieftin și nu necesită o sursă externă de alimentare [2]. Cu toate acestea, energia nu poate fi transferată în sistem, ci doar disipată de ea.

Aceasta înseamnă că amortizorul dintr-un sistem semi-activ nu poate dezvolta o forță în direcția opusă vitezei relative a amortizorului. Forțele de acționare mari nu pot fi generate la viteze reduse [4]. În ciuda acestor dezavantaje, suspensia semi-activă poate funcționa în continuare în modul pasiv dacă apare defecțiunea sistemului de control.

2.1. Controlul dinamic

Controlul dinamic este preocupat de reducerea vibrațiilor cutiei vehiculului din cauza imperfecțiunilor căii de rulare. Amortizoarele sunt de obicei concepute pentru a controla vibrații între aproximativ 0,5 Hz și 4-10 Hz, în funcție de aplicație.

S-a studiat suspensiile active ale unui vehicul feroviar [5], și s-a concentrat asupra aplicării în cazul vehiculelor feroviare de mare viteză pentru a menține sau îmbunătăți confortul mersului la viteze mai mari. Au fost luate în considerare atât direcțiile laterale cât și cele verticale ale unui model de vehicul în întregime. Studiul se referă la cercetarea modului în care dinamica amortizorului influențează funcționarea globală a unui sistem al suspensie activ. Rezultatele simulării arată că suspensia secundară activă aplicată unui singur vehicul feroviar poate îmbunătăți confortul de rulare cu 30% pe direcție verticală și cu 45% pe direcție laterală. Cu toate acestea, cu dinamica dispozitivului de acționare inclusă, avantajele confortului la deplasare pot fi degradate cu până la 15% la anumite tipuri de amortizoare.

Un studiu japonez [6] descrie un sistem de suspensie secundară activă pentru a reduce mișcările laterale, de închidere și rotire ale cutiei vehiculului. Studiul descrie simulările și testele de funcționare efectuate cu un vehicul experimental. Într-un alt studiu japonez, s-au efectuat experimente pe o platformă de testare cu role folosind suspensii secundare laterale și suspensii verticale laterale active pentru îmbunătățirea confortului mersului [7]. Reducerea cu până la 50% a acestor moduri de vibrație poate fi prezentată împreună cu sistemul activ.

Într-un studiu italian [8], amortizoarele pasive verticale din suspensia secundară au fost înlocuite cu amortizoare magneto-reologice semi-active. Amortizoarele au fost controlate în mod independent pentru a reduce accelerațiile verticale, de înclinare longitudinală și de ruluu ale cutiei vehiculului. În comparație cu un sistem pasiv, accelerațiile verticale sunt reduse cu 10-20%.

În alt studiu [9], primul mod de deformare pe verticală a cutiei vehiculului este suprimat prin adăugarea unui amortizor electromagnetic între centrul cutiei vehiculului și o masă auxiliară de o tonă. În plus, dispozitivele de acționare hidraulice au fost amplasate pe suspensia secundară în partea din față și din spate a vehiculului. Au fost cercetate trei configurații diferite ale așa-numitului control modal cu elasticitate infinită - pentru a se ocupa separat de modurile de declanșare și tangaj ale cutiei vehiculului. Amortizorul central reduce în mod efectiv efectul de flexibilitate asupra confortului la mers. În comparație cu un sistem pasiv, una dintre configurațiile de control avute în vedere cu dinamica amortizorului include reducerea accelerațiilor verticale cu aproximativ 60% în partea posterioară a vehiculului.

Atât suspensiile primare cât și cele secundare pot fi luate în considerare atunci când se utilizează amortizoare active pentru a suprima modurile care afectează în mod semnificativ confortul la mers. În alt studiu [10], amortizarea semi-activă se aplică amortizoarelor verticale ale cutiei de osie din suspensia primară pentru a suprima vibrațiile verticale ale boghiurilor, ceea ce, la rândul lor, reduce vibrațiile de încovoiere ale cutiei vehiculului (aproximativ 8-10 Hz). Mai mult, amortizarea activă în suspensia secundară este aplicată pernei pneumatice pentru a suprima modurile de vibrație rigidă de săltare și tangaj (aproximativ 1 Hz). Studiul include simulări și teste de funcționare cu un vehicul la viteze de până la 315 km/h. Sistemul de amortizare cercetat arată îmbunătățiri ale confortului și a atins stadiul aplicării practice.

2.2. Controlul cvasi-static

Atunci când se deplasează în curbe la viteze mari (acclerațiile superioare ale căii), cutia vehiculului se deplasează lateral spre exterior în raport cu boghiul, generând o deplasare cvasi-statică între cutie și boghiuri. Această deplasare laterală a cutiei vehiculului crește riscul de lovire a limitatorilor de oprire, ceea ce afectează în mod semnificativ confortul mersului în mod negativ (figura 2). Dacă deplasarea cvasi-statică poate fi redusă, nu numai că poate fi menținut un confort sporit al mersului, dar este posibil și un profil mai larg al cutiei vehiculului, deoarece jocul între cutie și boghiuri nu trebuie să fie la fel de mare ca înainte. Mai mult, dacă se modifică poziția limitatorilor de oprire și prin urmare, jocul dintre cutia vehiculului și boghiuri este scăzut, stabilitatea laterală poate fi îmbunătățită.

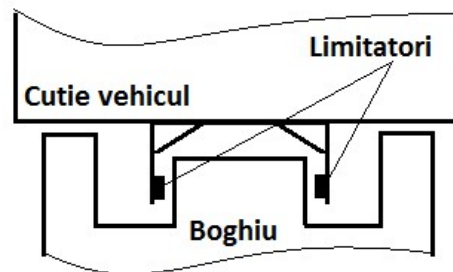


Fig. 2. Amortizoarele de oprire limitează deplasarea laterală în raportul cutiei cu boghiu.

Controlul lateral cvasi-static este aplicat pentru a centra cutia vehiculului deasupra boghiurilor în curbe. Această aplicație este, de asemenea, numită control al lățimii de bandă joasă, deoarece detectează frecvențele joase ale intrărilor determinate de cale, adică curbele, pentru a minimiza deplasarea laterală a cutiei vehiculului față de boghiuri. Acest concept de dispozitiv oprire a fost introdus la începutul anilor 1990 [11]. Într-un studiu de cercetare spaniol [12], centrarea cutiei vehiculului este realizată printr-un amortizor pneumatic lateral conectat la arcul pneumatic. În curbe, amortizorul este controlat de aerul sub presiune al

arcului pneumatic interior.

Cutia vehiculului care se înclină spre interior în curbe la accelerațiile înalte ale traiectoriei este aplicată pentru a permite viteze mai mari fără a afecta negativ confortul mersului (figura 3). O modalitate obișnuită de a implementa controlul înclinării este folosirea controlului de prioritate [13]. Aceasta înseamnă că informațiile pentru siguranța boghiului sunt folosite și pentru restul vehiculului pentru a obține un control mai precis. Proiectul de control trebuie să ia în considerare viteza și lungimea vehiculului, precum și întârzierile introduse de filtre. Obiectivul controlului de înclinare este acela de a reduce accelerația laterală, resimțită de călători, la zero, care este denumită înclinare nulă. Cu toate acestea, o problemă cu trenurile înclinate este numărul de persoane care nu pot fi ignorate și care suferă de „rău de mișcare”. Prin urmare, este normal să nu se compenseze complet accelerația pentru a reduce la minimum acest fenomen de „rău de mișcare”. Aceasta se referă la compensarea parțială a înclinării, cu o compensare tipică în jur de 60-70%.

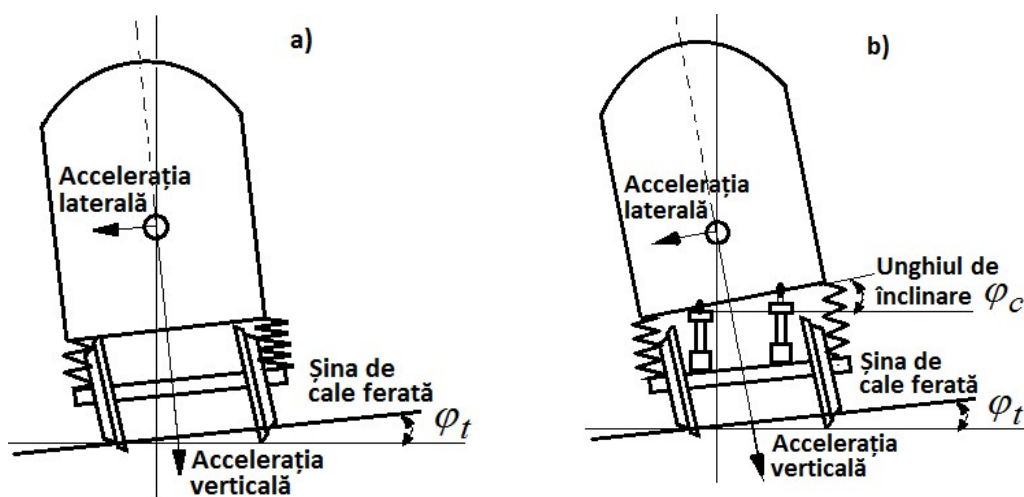


Fig. 3. a) Înclinarea cutiei vehiculului prin intermediul dispozitivelor de acționare pe verticală.
b) Accelerația laterală este scăzută datorită înclinării cutiei vehiculului.

Arcul pneumatic poate fi folosit pentru a controla mișcarea cvasi-statică a cutiei vehiculului și, prin urmare, pentru a genera înclinare. Într-un studiu [14], arcurile pneumatice active combinate cu un dispozitiv de acționare laterală în suspensia secundară sunt utilizate pentru a obține o înclinare și o centrare a cutiei vehiculului în curbe. Rezultatele simulării experimentale și numerice arată că sistemul de suspensie activă îmbunătățește confortul mersului și permite viteze mai mari în curbe. Alt studiu [16] se arată că confortul mersului este îmbunătățit într-un vehicul feroviar la viteze mari prin intermediul unui control lateral dinamic în combinație cu înclinarea cutiei vehiculului. Testele au fost efectuate la viteze de până la 365 km/h.

În plus, înclinarea cutiei vehiculului poate fi realizată prin adăugarea unui element activ la bara anti-ruliu din suspensia secundară (figura 4).

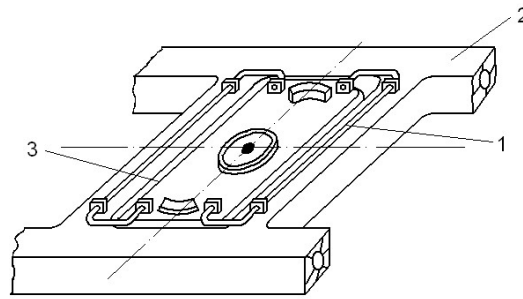


Fig. 4. Dispozitiv stabilizator antiruliului:
 1 – bară de torsiune; 2 – cadrul boghiului; 3 – traversă dansantă [18].

Bara anti-ruliu activă poate fi integrată cu un amortizor cu acționare laterală în suspensia secundară pentru a obține o înclinare a caroseriei și un control lateral dinamic.

La sfârșitul anilor 1990, a fost dezvoltat un sistem cuprinzător de suspensii secundare active [17]. Sistemul de control al suspensiilor a inclus amortizoare semi-actives laterale și verticale care au reușit să realizeze controlul vibrațiilor laterale și verticale ale cutiei vehiculului, precum și centrarea și înclinarea cutiei vehiculului în curbe. Rezultatele simulării au fost confirmate prin teste pe teren realizate cu boghiuri prototip echipate cu sistemul de amortizare activă.

3. METODE DE CONTROL

3.1. Amortizare prin suspendare

O strategie de control în domeniul tehnologiei active la vehiculele feroviare este amortizarea prin suspendare [19]. În sistemul de suspensie convențional, amortizorul pasiv reacționează la viteza relativă dintre cutia vehiculului și boghiu. În sistemul de amortizare prin suspendare, viteza absolută a cutiei vehiculului este amortizată de un mecanism de acționare, deoarece forța necesară este generată independent de viteza boghiului (figura 5).

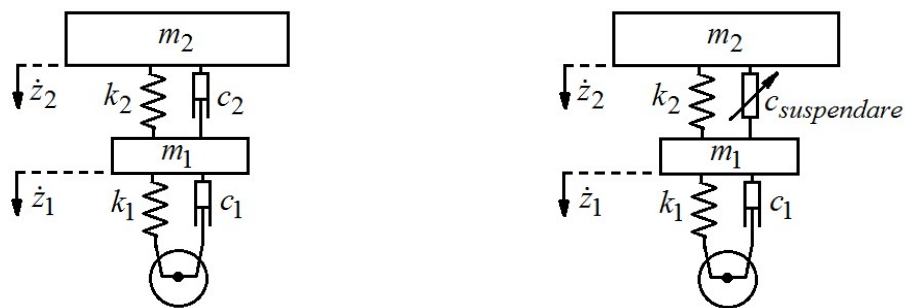


Fig. 5. a) Modelul suspensiei convenționale; b) modelul de amortizare a cârligului.

Pentru amortizarea pasivă convențională, ecuația de mișcare este exprimată ca:

$$m_2 \ddot{z}_2 = (\dot{z}_1 - \dot{z}_2)c_2 + (z_1 - z_2)k_2 \quad (1)$$

unde m reprezintă masa [kg]; z deplasare verticală [m]; \dot{z} viteza pe verticală [m/s]; \ddot{z} accelerația pe verticală [m/s²]; c amortizarea [Ns/m]; k rigiditatea [N/m].

Întrucât ecuația corespunzătoare pentru amortizarea prin suspendare poate fi exprimată ca:

$$m_2 \ddot{z}_2 = -\dot{z}_2 c_{ma} + (z_1 - z_2) k_2 \quad (2)$$

ecuațiile de mișcare pentru cele două sisteme diferite de amortizare pot fi rescrise ca următoarele funcții de transfer între boghiu și cutia vehiculului:

$$G_{pasivă} = \frac{c_2 s + k_2}{m_2 s^2 + c_2 s + k_2} \quad (3)$$

$$G_{suspendată} = \frac{k_2}{m_2 s^2 + c_{ma} s + k_2} \quad (4)$$

Absența influenței vitezei boghiului în numărător este cea mai importantă diferență dintre cele două funcții de transfer. Acest lucru permite, de asemenea, ca amortizarea prin suspendare să fie mai mare decât amortizarea convențională, reducând astfel în continuare transferul de vibrații de la boghiu la cutia vehiculului.

În practică, amortizarea prin suspendare este de obicei implementată așa cum se arată în figura 6. De fapt, semnalul de viteză absolută necesar este, în mod normal, un semnal de accelerare integrat măsurat de un senzor din cutia vehiculului feroviar. Mai mult, semnalul de viteză este filtrat de înaltă trecere și înmulțit cu coeficientul de amortizare prin suspendare pentru a genera forța necesară de acționare [4].



Fig. 6. Implementarea practică a amortizării prin suspendare

Conceptul de amortizare prin suspendare a fost introdus pentru prima dată de Karnopp la sfârșitul anilor 1970, ducând la un studiu amplu publicat în 1983 [19]. Amortizarea prin suspendare a fost cercetată și analizată în detaliu de diverși cercetători. Stribersky [17] a demonstrat prin simulări că amortizarea prin suspendare reduce în mod semnificativ vârfurile de rezonanță și accelerațiile, îmbunătățind astfel confortul mersului, atât pe direcție verticală, cât și pe direcție laterală. Rezultatele simulării au fost, de asemenea, confirmate prin teste pe teren realizate cu boghiuri prototip echipate cu amortizare activă. Mai mult decât atât, un studiu suedez [20] arată, de asemenea, îmbunătățirea confortului la mers prin simulări și teste pe teren, folosind șocuri de amortizare semi-actives în direcția laterală.

O problemă dificilă și, prin urmare, o mare provocare în ceea ce privește amortizarea prin suspendare, este de a optimiza compromisul dintre îmbunătățirea confortului și deformarea suspensiei în timpul mersului în linie curbă. Cu toate acestea, pot fi obținute rezultate acceptabile prin optimizarea filtrării semnalului de viteză absolută. S-au analizat teoretic trei abordări liniare și două non-liniare pentru amortizarea prin suspendare în direcție verticală, cu diferite soluții de filtrare [21]. Metoda liniară, cu așa numitul filtru complementar, îmbunătățește confortul de deplasare cu aproape 23%, păstrând în același timp o deformare a suspensiei la același nivel ca pentru un sistem pasiv. Cele două metode neliniare, bazate pe filtrarea Kalman, arată o îmbunătățire a confortului mersului de peste 50%, cu o deformare mai mare a suspensiei decât în cazul sistemului pasiv.

Hohenbichler și Six [22] au analizat compromisul dintre confort și deformarea suspensiei prin simulări cu abordări ușor diferite de amortizare prin suspendare. S-a ajuns la concluzia că, pentru condițiile de cale considerate, amortizarea prin suspendare nu oferă o îmbunătățire a confortului cu mai mult de 10% comparativ cu un caz pasiv.

S-au efectuat simulări utilizând datele de previzualizare (accelerații) în combinație cu amortizarea prin suspendare pentru a optimiza controlul amortizorului și, astfel, pentru a

îmbunătăți calitatea confort în direcția verticală [23]. Accelațiile filtrate cu trecere mică, intrarea deterministică a căii, fără neregularități variabile, de la primul boghiu au fost scăzute din accelerațiile măsurate pe următoarele boghiuri (integrate cu viteza în conformitate cu principiul "amortizării prin suspendare"). Prin urmare, amortizoarele din boghiuri care utilizează date de previzualizare sunt compensate numai pentru neregularități ale căii și nu pentru curbura deterministică a liniei.

3.2. Controlul elastic fără amortizare H_∞

În comparație cu amortizarea prin suspendare, controlul elastic fără amortizare H_∞ poate fi proiectat pentru mai mult de un obiectiv, de exemplu pentru a reduce vibrațiile cutiei vehiculului și deplasarea laterală relativă în curbele de tranziție simultan. Controlul elastic fără amortizare H_∞ se referă la găsirea unui regulator (K) pentru un sistem cu buclă deschisă (G_0) astfel încât sistemul cu buclă închisă (G_{ec}) să aibă o bună performanță, stabilitate și robustețe (figura 7). (G_{ec}) este matricea de transfer de la vectorul de perturbare externă w la vectorul de semnal de eroare z . Mai mult, vectorul de măsurare y este utilizat în K pentru a calcula vectorul de intrare de comandă u . Pentru a obține stabilitatea și robustețea garantată a sistemului, semnalul z trebuie minimizat.

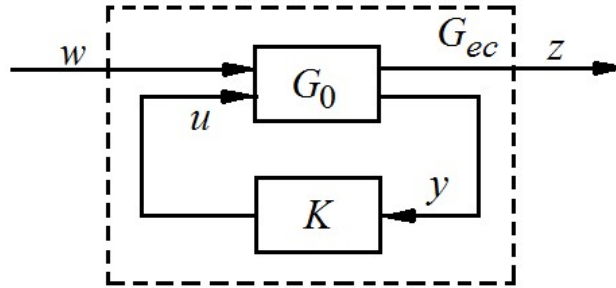


Fig. 7. Configurația tipică a unui sistem general de control.

Relațiile semnalelor din sistem pot fi descrise ca fiind:

$$\begin{bmatrix} z \\ y \end{bmatrix} = G_0(s) \begin{bmatrix} w \\ u \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$u = K(s)y \quad (6)$$

$$z = G_{ec}(G_0, K)w \quad (7)$$

Sarcina este de a găsi controlerul K astfel încât:

$$\|G_{ec}\|_\infty = \max_{\omega} \bar{\sigma}(G_{ec}(i\omega)) < \gamma \quad (8)$$

unde γ este un criteriu de graniță ales și G_{ec} matricea de transfer care descrie sistemul închis. Ideea este găsirea regulatorului K care minimizează așa numita normă H_∞ , adică cea mai mare valoare singulară $\bar{\sigma}$ a plantei G_{ec} la o anumită frecvență ω . Dacă se poate găsi o soluție, aceasta poate fi acceptată sau criteriul limită poate fi redus pentru a găsi o soluție și mai bună. Prin urmare, este un proces iterativ de optimizare a criteriului limită [24]. În proiectarea controlului elastic fără amortizare H_∞ , funcțiile de greutate sunt aplicate semnalelor de intrare și ieșire ale sistemului pentru a defini cantitatea de influență pe care fiecare semnal trebuie să o aibă în calculul controlerului.

Un avantaj general cu controlul elastic fără amortizare H_∞ este capacitatea acestuia de a aborda un sistem multi-variabil. Un dezavantaj este că modelul de control elastic fără amortizare H_∞ tinde să atingă un număr de ordine destul de ridicat, deoarece este inclus numărul de ordine al funcțiilor de greutate. Reducerea modelului este adesea necesară pentru a face controlerul realizabil.

Controlul elastic fără amortizare H_∞ este aplicat la suspensia secundară a unui vehicul pentru a reduce mișcările laterale, de rulare și de încovoiere ale cutiei vehiculului [6]. Studiul descrie simulările și testele de funcționare efectuate cu un vehicul experimental. Rezultatele testelor experimentale arată că mișcările controlate pot fi reduse semnificativ. Deci, vibrațiile de joasă frecvență cauzate de rezonanța suspensiei pot fi atenuate.

La sfârșitul anilor 1990, testele teoretice și experimentale au fost efectuate aplicând controlul elastic fără amortizare H_∞ la suspensia secundară laterală, pentru a îmbunătăți stabilitatea și comportamentul dinamic al unui vehicul de cale ferată de mare viteză. Suspensia activă arată îmbunătățiri ale confortului la deplasare în comparație cu un caz pasiv, atât prin simulări, cât și prin încercări inițiale pe o platformă cu role [25].

Abordare de control elastic fără amortizare H_∞ modificată pentru controlul vibrațiilor verticale a unui vehicul feroviar a fost comparată cu amortizarea prin suspendare și cu un sistem pasiv [26]. Un model de simulare cu patru grade de libertate a fost utilizat cu dispozitivele de

acționare amplasate de-a lungul suspensiei secundare pentru a obține un confort sporit în timpul mersului, menținând în același timp o deformare acceptabilă a suspensiei. Modulul de control H_∞

modificat sa dovedit oarecum mai eficient în minimizarea accelerațiilor și deformării suspensiei prin reglarea parametrilor de control comparativ cu amortizarea prin suspendare și sistemul pasiv.

4. CONCLUZII

Tehnologia activă în suspensia secundară a unui vehicul feroviar poate fi utilizată pentru a obține îmbunătățiri ale confortului mersului în cazurile în care suspensia pasivă convențională nu poate fi optimizată în continuare. Această lucrare descrie dezvoltarea conceptului de suspensie secundară activă pentru vehiculele feroviare de mare viteză. În primul rând, a fost dezvoltat un sistem secundar suspensiv activ prin intermediul simulărilor de mai multe corpuri și a testelor pe șine cu un tren. Controlul dinamic al modurilor laterale și de înclinare ale cutiei vehiculului în combinație cu controlul cvasi-static al cutiei vehiculului oferă îmbunătățiri semnificative ale confortului lateral al mersului. Prin intermediul controlului lateral cvasi-static, cutia vehiculului este centrată deasupra boghiurilor în curbe, la accelerații înalte ale planului de cale și contactul cu limitatoarele de oprire este, în general, evitat. Confortul în timpul mersului este astfel afectat pozitiv și datorită deplasărilor relative laterale relative între cutia vehiculului și boghiuri, este posibil un profil mai larg al cutiei vehiculului, deoarece jocul dintre limitatoarele de oprire poate fi redus. Cu deplasările laterale reduse, stabilitatea laterală poate fi de asemenea îmbunătățită. Un alt avantaj important care provine de la dispozitivul de centrare a cutiei vehiculului este capacitatea sa de a elimina mișcările periodice nefavorabile cu frecvență joasă în curbe cu rază mare la viteză mare (insuficiență de supraînălțare). Aceste mișcări au un efect considerabil nefavorabil asupra confortului mersului și dacă pot fi evitate, confortul în curbe este îmbunătățit semnificativ.

BIBLIOGRAFIE

- [1] **R. Persson**, „*Tilting Trains*” – *Enhanced Benefits and Strategies for Less Motion Sickness*”, Doctoral Thesis, Stockholm, Sweden, 2011.
- [2] **N. Jalili**, „*Semi-Active Suspension Systems*”, The Mechanical Systems Design Handbook – Modeling, Measurement, and Control (Chap. 12), ISBN 0-8493-8596- 2, CRC Press, 2001.
- [3] **P. Kjellqvist**, „*Modelling and Design of Electromechanical Actuators for Active Suspension in Rail Vehicles*” Doctoral Thesis, Stockholm, Sweden, 2002.
- [4] **R.M Goodall, T.X Mei**, „*Active Suspensions*”, Handbook of Railway Vehicle Dynamics (Chap. 11), ISBN 0-8493-3321-0, Taylor and Francis, 2006.
- [5] **I. Pratt**, „*Active Suspension Applied to Railway Trains*”, Doctoral Thesis, Department of Electronic and Electrical Engineering, Loughborough University, 1996.
- [6] **T. Hirata, S.Koizumi, R. Takahashi**, „*H ∞ Control of Railroad Vehicle Active Suspension*”. Automatica, Vol. 31, No. 1, pp. 13–24, 1995.
- [7] **K. Sasaki, S. Kamoshita, M. Enomoto**, “*A Design and Bench Test of Multi-Modal Active Suspension of Railway Vehicle*”, IECON’94, 20th International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation, Vol. 3, pp. 2011– 2016. 1994.
- [8] **L. Pugi, A. Rindi, F. Bartolini, J. Auciello**, „*Simulation of a Semi-Active Suspension System for a High Speed Train*”, Proceedings of the International Symposium on Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks (IAVSD’09), Stockholm, Sweden, 2009.
- [9] **E. Foo, R.M. Goodall**, “*Active Suspension Control of Flexible-Bodied Railway Vehicles Using Electro-Hydraulic and Electro-Magnetic Actuators*”, Control Engineering Practice, Vol. 8, pp. 507–518, 2000.
- [10] **Y. Sugahara, N. Watanabe, T. Takigami, R. Koganei**, „*Vertical Vibration Suppression System for Railway Vehicles based on Primary Suspension Damping Control – System Development and Vehicle Running Test Results*”, QR of RTRI, Vol. 52, No. 1, February, pp. 13–19, 2011.
- [11] **D.H. Allen**, “*Active Bumpstop Hold-Off Device*”, Proc IMechE Conference Railtech 94, Paper C478/5/013, 1994.
- [12] **A. Conde Mellado, C. Casanueva, J. Vinolas, J.G. Gimenez**, „*A Lateral Active Suspension for Conventional Railway Bogies*”, Vehicle System Dynamics, Vol. 47, No. 1, pp. 1–14. (2009).
- [13] **A.C. Zolotas, R.M. Goodall**, “*Modelling and Control of Railway Vehicle Suspensions*”, Mathematical Methods for Robust and Nonlinear Control, Springer, 2007.
- [14] **S. Alfi, S. Bruni, G. Diana, A. Facchinetti, L. Mazzola**, „*Active Control of Airspring Secondary Suspension to Improve Ride Quality and Safety against Crosswinds*”, Journal of Rail and Rapid Transit, Vol. 225, No. 1, January, pp. 84–98, 2011.
- [15] **Y. Kajitani, H. Kato, K. Asano**, „*Efforts for Greater Ride Comfort*”, JR EAST Technical Review, No. 16, pp. 69–72, 2010.
- [16] **J.T. Pearson, R.M. Goodall, I. Pratt**, „*Control System Studies of an Active Anti-Roll Bar Tilt System for Railway Vehicles*. Proc Instn Mech Engrs, Vol. 212, Part F, pp. 43–60, 1998
- [17] **A. Stribersky, H. Muller, B. Rath**, „*The Development of an Integrated Suspension Control Technology for Passenger Trains*”, Proc IMechE, Vol. 212, Part F, pp. 33–42. , 1998.
- [18] **I. Sebeşan**, „*Dinamica Vehiculelor Feroviare*”, Editura MatrixRom, Bucureşti 2011.
- [19] **D. Karnopp**, „*Active Damping in Road Vehicle Suspension Systems*”, Vehicle System Dynamics, Vol. 12, pp. 291–316, 1983.
- [20] **P.A. Roth, M. Lizell**, „*A Lateral Semi-Active Damping System for Trains*”, Vehicle System Dynamics, Vol. 25 (Suppl.), pp. 585–598. 1996.
- [21] **H. Li, R.M. Goodall**, „*Linear and Non-Linear Skyhook Damping Control Laws for Active Railway Suspensions*”, Control Engineering Practice, Vol. 7, pp. 843–850, 1999.
- [22] **N. Hohenbichler, K. Six**, „*Potentials of Active and Semiactive Skyhook Control Laws Applied to the Secondary Suspensions of Railway Vehicles*”, Automatisierungstechnik, Vol. 54, No. 3, pp. 130–138, 2006.
- [23] **M. Baier, N. Hohenbichler, K. Six, D. Abel**, „*Benefit of Preview Data for Comfort Improvement in Railway Vehicles*” ISBN 978-80-8070-679-1, EURNEX– Zel, pp. 47–54, 2007.
- [24] **T. Glad, L. Ljung**, „*Control Theory–Multivariable and Nonlinear Methods*”, Second Edition, 2003.
- [25] **J. Zeng, W.H. Zhang, H.Y. Dai, X.J. Wu, Z.Y. Shen**, „*Hunting Instability Analysis and H ∞ Controlled Stabilizer Design for High Speed Railway Passenger Car*”, Vehicle System Dynamics, Vol. 28 (Suppl.), pp. 655–668, 1998.
- [26] **A. Neacsu, D.B Stoica, N.N. Antonescu**, „*Behaviour of Sintered Carbide Pins Under Simulated Work Conditions*”, Experimental Study. In Journal of the Balkan Tribological Association Volume: 18 Issue: 4 Pages: 559-565 Published: 2012.