



21-osios jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ teminės konferencijos
TRANSPORTO INŽINERIJA IR VADYBA,
vykusios 2018 m. gegužės 4-5 d. Vilniuje, straipsnių rinkinys

Proceedings of the 21th Conference for Junior Researchers 'Science – Future of Lithuania'
TRANSPORT ENGINEERING AND MANAGEMENT, 4-5 May 2018, Vilnius, Lithuania

Сборник статей 21-й конференции молодых ученых «Наука – будущее Литвы»
ИНЖЕНЕРИЯ ТРАНСПОРТА И ОРГАНИЗАЦИЯ ПЕРЕВОЗОК, 4-5 мая 2018 г., Вильнюс, Литва

TRANSPORTO PRIEMONĖS VALDOMOS PAKABOS KOMFORTABILUMO TYRIMAS

Tautrimas Gvozdas, Viktor Skrickij

*Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Transporto inžinerijos fakultetas,
Mobiliųjų mašinų ir geležinkelių transporto katedra
El. paštas: tautrimas.gvozdas@stud.vgtu.lt; viktor.skrickij@vgtu.lt*

Santrauka. Transporto priemonių pakaba turi užtikrinti pakankamą komfortabilumo lygį, kartu su valdomumu. Klasikinė pasyvi važiuoklė yra santykinai paprastos konstrukcijos, mažų gabaritų ir masės, yra patikima. Tokio tipo pakabos yra pritaikytos veikti esant skirtingoms eksploataavimo sąlygomis, dėl to tampa sunku suderinti komfortą ir transporto priemonės valdomumą konkrečiu metu esant skirtingoms kelio dangos sąlygoms. Norint išspęsti tokį uždavinį transporto priemonėje naudojamos aktyvios, arba pusiau aktyvios pakabos. Straipsnyje yra aprašomi skirtingi adaptyvios arba aktyvios pakabos valdymo algoritmai, pateikiami algoritmų matematiniai modeliai, sudaryti LMS AMESim programa, ir pateikiami gauti rezultatai, atsižvelgiant į konkretų pakabos valdymo algoritmą ir modeliui sudarytas sąlygas.

Reikšminiai žodžiai: valdoma pakaba, amortizatorius, matematinis modelis, valdymo algoritmai, transporto priemonės ketvirtis.

Įvadas

Automobilio pakaba – tai sistema, kuri laiko automobilio kėbulą tam tikrame aukštyje ir nustato valdymo ir komforto savybes. Ši konstrukcija reaguoja į kelio nelygumus, slopina virpesių ir smūgių perdavimą į kėbulą, bet tuo pačiu ir palaiko nuolatinį ratų kontaktą su kelio danga, kas automobilį daro stabilų manevruojant. Yra sukurta daugybė pakabų tipų, tačiau visuose yra naudojami tam tikri standūs ir lankstūs elementai. Pagrindinės pakabos sudamosios dalys yra spyruoklės, svirtys ir amortizatoriai – pastarieji turi didžiausią įtaką pakabos darbo charakteristikoms.

Griežtėjant saugumo reikalavimams ir vis didėjant konkurencijai tarp automobilių gamintojų, ieškoma naujų inžinerinių sprendimų.

Transporto priemonių kėbulo svyravimų slopinimui dažniausiai naudojamos pasyvios sistemos: pradžioje buvo naudojamos lingės, o vėliau buvo pereita prie amortizatoriaus, spyruoklės ir paslankių važiuoklės komponentų.

Pagal Phalke ir Mitra (2017) atlikta tyrimą, kuriame jie nustatė, kad keleivių komfortas priklauso nuo mechaninių, fizinių, fiziologinių ir psichologinių parametru, taip pat nuo vibracijų dažnio, krypties, vibracijų vietos, intensyvumo ir laiko, kiek tos vibracijos trunka. Ilgai besitęsiančios vibracijos gali sukelti ne tik diskomfortą, tačiau

gali turėti įtakos ir žmonių koordinacijai, dėmesingumui bei susikaupimui. Gysen ir Lomonova (2010) nustatė, kad 0,2 Hz dažnio vertikalus svyravimas jau gali sukelti jūros ligos simptomus. Kalbant apie komforto pojūtį yra žinoma (ISO 2631-1-1997), kad esant pagreičiams mažesnėms nei $0,315 \text{ m/s}^2$ – žmogus yra komforto zonoje.

Amortizatorių standumas turi didelę įtaką skirtingiems automobilio dinaminėms charakteristikoms (Phalke, Mitra 2017). Kieti amortizatoriai pagerina automobilio valdomumą ir sumažina kėbulo svyravimus posūkiuose, tačiau dėl kietumo sumažėja komfortas – automobilio kėbului tenka daugiau vibracijų dėl kelio dangos nelygumų, kurių pakaba tiesiog nesugeba sušvelninti (Phalke, Mitra 2017). Užtikrinti geresnėms komforto savybėms yra naudojama minkštesnė pakaba, tačiau dėl jos padidėja kėbulo svyravimai akceleracijos, stabdymo ir važiavimo posūkyje metu.

Norint užtikrinti automobilio komfortą ir manevringumą yra privaloma turėti galimybę valdyti pakabos komponentus esant skirtingiems vibracijų dažniams ir esant plačiam jų spektrui. Tai įgyvendinti yra neįmanoma naudojant pasyvią pakabos sistemą su nekintamomis charakteristikomis. Per pastaruosius keliasdešimt metų transporto priemonių gamintojai vis daugiau dėmesio skyrė inovacijoms, kurios leidžia kontroliuoti automobilio pakabą pagal vairuotojo norus arba pagal kelio profilio nelygumus. Pasyvi pakaba veikia racionaliai tik esant tam tik-

roms sąlygoms, kurioms ji buvo suprojektuota, norint padidinti sistemos efektyvumą buvo sukurti du pakabų tipai: pusiau aktyvios ir aktyvios pakabos.

Adaptyvi arba pusiau aktyvi pakaba yra tokia, kuri reaguoja į kelio ir automobilio būseną – nenaudoja jokios papildomos jėgos, keičiančios kelio ir automobilio sąveikos sąlygas. Pvz.: Norint keisti amortizatorių slopinimo charakteristiką, keičiamos amortizatorių vožtuvų charakteristikos įjungiant ir išjungiant aukštos įtampos šaltinį (Kamelreiter, Kemmetmuller 2012). Tokias sistemas dažniausiai sudaro keturi hidrauliniai vožtuvai, po vieną kiekvienam amortizatoriui. Jie kontroliuoja slopinimą. Sistema veikia valdiklio pagalba, kuris pagal jutiklių duomenis kontroliuoja visus keturis amortizatorius individualiai. Dažniausiai naudojami: ratų pagreičio, greičio, kėbulo svyravimo, pasukimo kampo jutikliai. Slopinimo parametrai yra keičiami kas 10 milisekundžių. Vairuotojas taip pat turi galimybę pasirinkti tarp vairavimo komforto padėčių – komfortabilus, arba sportinis (dinaminis). Lozoya ir Sename (2010) atlikto tyrimą ir nustatė, kad gerus rezultatus pusiau aktyvių pakabų srityje demonstruoja magneto-reologiniai amortizatoriai. Tai tokie amortizatoriai, kurie yra užpildyti alyva, reaguojančia į magnetinius laukus – juos reguliuojant yra keičiamos slopinimo charakteristikos.

Aktyvi pakaba turi akuatorių ir papildomą energijos šaltinį. Visa sistema yra reguliuojama valdiklio algoritmu priklausomai nuo tam tikrų jutiklių teikiamos informacijos. Tokia pakabos sistema gali naudoti papildomą jėgą, kad ratą įstumtų į duobę arba atkartotų kelyje esančią kliūtį.

Tokios pakabos dažniausiai sudaromos iš aktyvaus amortizatoriaus ir pasyvios spyruoklės. Amortizatoriai taip pat gali turėti daug skirtingų veikimo principų. Pvz.: Hidrauliniai amortizatoriai, pneumatiniai amortizatoriai, ar elektromechaniniai amortizatoriai. Kiekviena sistema, inžineriniu požiūriu, turi savų privalumų ir trūkumų. Kiekvienas gamintojas, projektuodamas pakabą atsižvelgia kuri sistema atitiks keliamus reikalavimus. Plačiąja prasme, visų sistemų tikslas yra vienas – užtikrinti kuo geresnę transporto priemonės valdomumą ir automobilyje esančių keleivių komfortą ir saugumą. Didžiausia problema kuriant elektromechanines sistemas – akuatorių dydis, svoris ir energijos kiekis, reikalingas pasiekti optimalius rezultatus (Jonasson, Roos 2007), taigi šiame tyrime į fizinius komponentų parametrus yra neatsižvelgiama – nagrinėjamas tik teorinį modelį.

Valdymo algoritmai

Valdyti tokio tipo sistemoms į pagalbą galima pasitelkti keletą skirtingų valdiklių: „PID“ valdikliai – jie naudojami iš anksto numatytame dažnių spektre arba sistemoje, kurios darbas kuo geriau atitinka iš anksto valdiklyje suprojektuotą modelį. „Patikimo“ tipo valdikliai yra tokie valdikliai, kurie gali veikti esant nežinomoms sąlygoms, tačiau norint gerų rezultatų, jiems vis vien privaloma apibrėžti nežinomybės ribas. Nors „PID“ arba „patikimo“ tipo valdikliai savo funkciją atliktų, tačiau prasidėjus nežinomoms sąlygoms važiuoklės sistema, valdoma tokio tipo valdiklių, gali tapti nestabili. Adaptyvioms pakaboms valdyti reikalingas algoritmas, kuris patikimai veiktų esant nežinomoms kelio profilio sąlygoms, o ne tik linijiniu

principu esant iš anksto numatytiems kelio parametrams (Guglielmino, Sireteanu 2008). Aktyviai ir adaptyviai pakabai valdyti dažniausiai yra naudojami „skyhook“ arba „groundhook“ valdymo principai. Kiekvienas jų yra pasiūlytas norint pasiekti skirtingus rezultatus. „Skyhook“ valdymo algoritmas yra naudojamas pasiekti kuo geresnę keleivių komfortą, o „groundhook“ yra orientuotas į automobilio valdomumo gerinimą. Taip pat galima pasitelkti ir hibridinį valdymo modelį – tai yra „skyhook“ ir „groundhook“ valdymo algoritmų hibridas, kuris priklausomai nuo situacijos naudoja labiausiai tinkamą valdymo algoritmą. Kaip teigė Sankaranarayananir, Oncu (2008) ir Savaresi, Vassal (2011), „groundhook“ ir „skyhook“ algoritmų naudoti vienu metu neįmanoma, nes jie yra orientuoti į skirtingus rezultatus, taigi vienintelė išeitis būtų juos naudoti pakaitomis. Šią teoriją patvirtinantys rezultatai yra pateikti ir Phalke, Mitra (2017) atlikto tyrimo metu, kur buvo nustatyta, kad gerėjant transporto priemonės valdomumui – transporto priemonėje esančių keleivių komfortas blogėjo. Tai reiškia, kad naudojant „groundhook“ valdymo algoritmą, dėmesys buvo skiriamas rato sukibimui su keliu, o amortizuojamos masės svyravimų mažinimas nebuvo prioritetingas algoritmo tikslas. Tie patys rezultatai buvo gauti ir atsižvelgiant į važiavimo greitį.

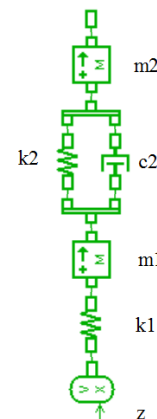
Modeliavimui buvo naudojamas transporto priemonės ketvirtis.

Pasyvi pakaba gali būti apibrėžta šiomis formulėmis:

$$m_1 \ddot{q}_1 = c_2(\dot{q}_2 - \dot{q}_1) + k_2(q_2 - q_1) - k_1(q_1 - z), \quad (1)$$

$$m_2 \ddot{q}_2 = -c_2(\dot{q}_2 - \dot{q}_1) - k_2(q_2 - q_1), \quad (2)$$

čia: m_1 – neamortizuojama masė, kg; m_2 – amortizuojama masė, kg; c_2 – amortizatoriaus minimalus slopinimas, Ns/m; k_1 – padangos standumas, N/m; k_2 – spyruoklės standumas, N/m; z – kelio nelygumai, m; q_i – poslinkis, m, $i=1,2$; \dot{q}_1 – greitis, m/s; \ddot{q}_2 – pagreitis, m/s².



1 pav. Automobilio ketvirčio su pasyvia pakaba dinaminis modelis

Valdoma pakaba gali būti apibrėžta šiomis formulėmis:

$$m_1 \ddot{q}_1 = c_2(\dot{q}_2 - \dot{q}_1) + k_2(q_2 - q_1) - k_1(q_1 - z) - F_a, \quad (3)$$

$$m_2 \ddot{q}_2 = -c_2(\dot{q}_2 - \dot{q}_1) - k_2(q_2 - q_1) + F_a, \quad (4)$$

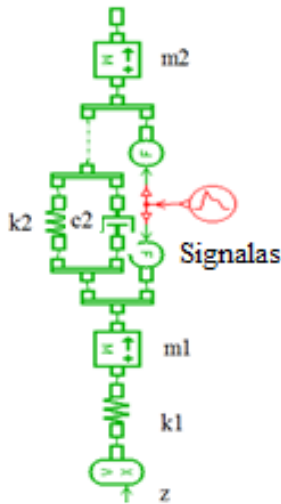
čia: F_a – pusiau aktyvios sistemos generuojama jėga, N.

Valdymui dažniausiai naudojami du algoritmai: „Skyhook“ ir „Groundhook“. „Skyhook“ algoritmo tikslas yra eliminuoti kėbulo vertikalų svyravimą. Jis veikia tarsi įstatant virtualų amortizatorių tarp kėbulo ir dangaus – aišku, tai yra praktiškai neįmanoma, taigi algoritmas tas jėgas turi simuliuoti (Sankaranarayanan, Oncu 2008). „Skyhook“ valdymo algoritmas:

$$\begin{cases} \dot{q}_2(\dot{q}_2 - \dot{q}_1) > 0 & F_a = c_{sky}\dot{q}_2, \\ \dot{q}_2(\dot{q}_2 - \dot{q}_1) \leq 0 & F_a = 0 \end{cases}, \quad (5)$$

„Groundhook“ algoritmo tikslas yra sumažinti rato prispaudimo jėgos svyravimus, taip pagerinant transporto priemonės valdomumą ir optimizuoti krūvius, tenkančius tiek kelio dangai, tiek važiuoklei. Tai yra atliekama tarp kelio paviršiaus ir rato simuliuojant virtualų amortizatorių, kuris suteikia reikiamą jėgą slopinimui (Gonclaves, Ahmadian 2001). „Groundhook“ valdymo algoritmas:

$$\begin{cases} -\dot{q}_2(\dot{q}_2 - \dot{q}_1) > 0 & F_a = c_{gr}\dot{q}_1, \\ -\dot{q}_2(\dot{q}_2 - \dot{q}_1) \leq 0 & F_a = 0 \end{cases}, \quad (6)$$



2 pav. Automobilio ketvirčio su pusiau aktyvia pakaba dinaminis modelis

Šiame darbe, taip pat kaip Savaresi ir Silani (2004) atliktame tyrime, yra tiriama ir pasyvos pakabos sistema. Jos rezultatai yra naudojami kaip atskaitos taškas, siekiant suvokti pakabos darbo pasikeitimus, kurie bus gauti naudojant „Groundhook“ ir „Skyhook“ valdymo algoritmus.

Matematinio modeliavimo rezultatai

Skaičiavimai buvo atlikti naudojant *LMS AMESim* programą. Šiuose modeliuose, kaip ir Majdoub ir Giri (2013) tyrime, daugiausiai dėmesio buvo skiriama vertikalų svyravimų tyrimui įvairiomis sąlygomis, taigi atsižvelgiant į automobilio simetrijos faktorių, tyrime buvo naudojamas automobilio ketvirčio matematinis modelis su reikšmėmis, naudotomis Alvarez-Sanchez (2013) atliktame tyrime (reikšmės pateiktos 1 lentelėje). Šiuose modeliuose yra pridėti komponentai, simuliuojantys pusiau aktyvios pakabos komponentų sukeltą jėgą. Padanga yra modeliuojama kaip paprasta spyruoklė. Tiriant valdymo algoritmus buvo simuliuojama sinusoidės tipo kelio

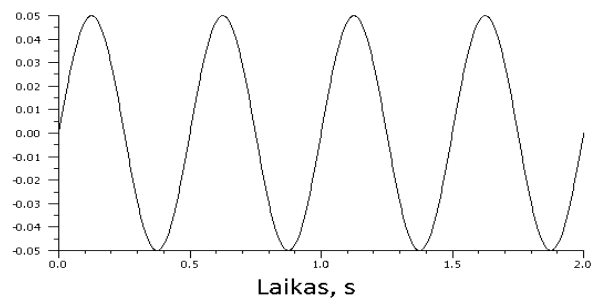
danga (3 pav.). Skirtumas tarp aukščiausio ir žemiausio sinusoidės taškų yra 10 centimetrų. Tyrime neapsiribojama bandymais vieno dažnio sąlygomis – simuliacija buvo atliekama nuo 1 iki 8 Hz ribose ir rezultatai apibendrinti lentelėje. Esant tokiam žadinimui maksimalus pakabos linijinis greitis yra apie 2 m/s ir atitinka didžiausią greitį, kuris gali būti išvystytas realiomis važiavimo sąlygomis.

1 lentelė. Matematinuose modeliuose naudotos parametų skaitinės reikšmės:

Parametras	Skaitinė reikšmė
Amortizuojama masė (m_2)	208 kg
Neamortizuojama masė (m_1)	28 kg
Spyruoklės standumas (k_2)	18 709 N/m
Slopinimo konstanta (c_2)	1 300 Ns/m
Padangos standumas (k_1)	127 200 N/m
Slopinimo konstanta „Skyhook“ ir „Groundhook“ valdyme c_{sky} , c_{gr}	2 000 Ns/m
Minimali slopinimo konstanta valdomoje pakaboje c_{sky} , c_{gr}	600 Ns/m

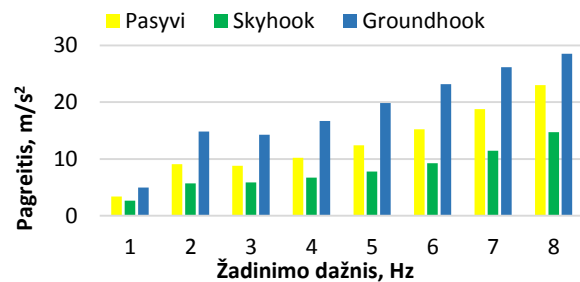
Simuliacijos buvo atliktos naudojant trijų pakabų tipų ketvirčių matematinis modelius. Buvo tirti ketvirčiai su pasyvia pakaba, „Skyhook“ ir „Groundhook“ algoritmais kontroliuojama pakaba.

Amplitudė, m

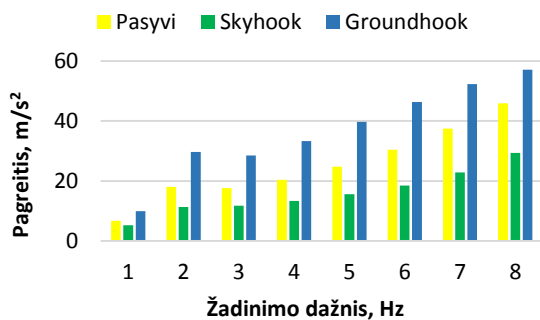


3 pav. 2 Hz 5cm aukščio sinusoidės tipo kelio profilis, naudotas simuliacijose (kiti naudoti profiliai buvo analogiškos amplitudės, tačiau skirtingų dažnių)

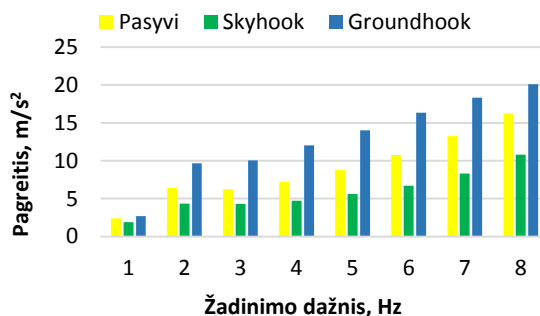
Pasyvios pakabos matematinio modeliavimo rezultatai buvo naudojami kaip atskaitos taškas siekiant suprasti, kaip kiekvienas algoritmas įtakoja modeliuojamo transporto priemonės ketvirčio darbą esant skirtingam žadinimui. Atliekant simuliacijas, dėmesys buvo skiriamas transporto priemonės komfortabilumą įtakojantiems parametrams, taigi buvo atsižvelgiama į amortizuojamos masės poreikius. Modeliuojamo proceso trukmė visais atvejais buvo 10 sekundžių. Visi gauti rezultatai apskaičiuoti procesui nusistovėjus, apibendrinti grafikai pateikti žemiau (4, 5, 6 paveikslai).



4 pav. Peak reikšmės



5 pav. Peak to Peak reikšmės



6 pav. RMS reikšmės

Apdorojus gautus rezultatus duomenų pateikimui pasirinkti 3 parametrai: maksimali reikšmė $Peak = \max|x_i|$; mojus $Peak\ to\ Peak = \max(x_i) - \min(x_i)$;

vidutinė kvadratinė nuokrypa $RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n}}$.

Iš pav. 4-6 pateiktų rezultatų galima matyti, kad geriausi rezultatai gaunami su valdoma pakaba naudojant „Skyhook“ algoritmą. Naudojant tokio tipo valdymą bus užtikrintas maksimalus komfortabilumo lygis.

Literatūra

- Alvarez-Sanchez E. 2013. A quarter-car suspension system: car body mass estimator and sliding mode control. *Procedia Technology Volume 7*: 208-214.
- El Majdoub K., Giri F., Chaoui F.Z. 2013. Backstepping adaptive control of quarter-vehicle semi-active suspension with Dahl MR damper model. *11th IFAC International Workshop on Adaptation and Learning in Control and Signal Processing July 3-5. Caen, France 558-563*.
- Gysen B.L.J., Paulides J., Lomonova E.A.. 2010. Active Electromagnetic Suspension System for Improved Vehicle Dynamics. *IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY 59(3)*: 1156-1163.
- Gonclaves F., Ahmadian M. 2001. Dynamic Analysis of Semi-active Control Techniques for Vehicle Applications. *Virginia Polytechnic Institute and State University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science p. 180*.
- Guglielmino E., Sireteanu T., Stammers C., Ghita G., Giuclea M. 2008. *Semi-active suspension control. London, England. Springer p. 270*.
- Jonasson M., Roos F. 2008. Design and evaluation of an active electromechanical wheel suspension system. *Mechatronics 18(4)*: 218-230.
- Kamelreiter M., Kemmetmuller W., Kugi A. 2012. Digitally controlled electrorheological valves and their application in vehicle dampers. *Mechatronics 22*: 629-638.
- Lozoya-Santos J., Sename O., Dugard L., Morales-Menendez R., Ramirez-Mendoza R. 2010. A Semi-active Control-oriented Damper Model for an Automotive Suspension. *Proceedings of the 6th IFAC Symposium Advances in Automotive Control*.
- Phalke T., Mitra A. 2017. Analysis of Ride comfort and Road holding of Quarter car model by Simulink. *Materialstoday: proceedings 4(2)*: 2425-2430.
- Sankaranarayanan V., Oncu S., Ozcan D., Guvenc L. 2008. Vehicle Chassis Control Using Adaptive Semi-active Suspension. *IFAC Proceedings Volumes 41(2)*: 4677-4682.
- Savarese S., Silani E., Bittanti S. 2004. Semi-active Suspensions: An optimal control strategy for a quarter-car model. *IFAC Proceedings Volumes 37(22)*: 553-558.
- Savarese S., Vassal C., Spelta C., Sename O., Dugard L. 2011. *Semi-Active Suspension Control Design for Vehicles p. 180*.

Atlikus tyrimą, buvo nustatyta, kad esant harmoniniam žadinimui *Peak*, *Peak to Peak* ir *RMS* reikšmių pokyčiai absoliučiais dydžiais išlieka panašūs ir pakanka naudoti tik vieną iš jų.

Su „Skyhook“ algoritmu, vertinant visus 3 pasirinktus parametrus, mažiausiais pakabos efektyvumas užfiksuotas esant 1 Hz žadinimui ir sudaro apie 22 %, esant kitiems dažniams efektyvumas viršija 30 %, didžiausias viršija 39 % prie 6 Hz.

„Groundhook“, atvirkščiai, visais atvejais sumažina pakabos slopinimo efektyvumą, komfortabilumas pablogėja. Mažiausias skirtumas tarp pasyvios pakabos ir valdomos su „Groundhook“ algoritmu sudaro 24% esant 8 Hz, prasčiausi rezultatai gauti esant žadinimui nuo 2 iki 5 Hz, rodiklių reikšmės daugiau kaip 60% viršija pasyvios pakabos analogiškus rodiklius.

Išvados

Atlikus simuliacijas ir apibendrinus rezultatus galime teigti, kad „Skyhook“ valdymo algoritmas, kaip ir buvo tikėtasi, demonstruoja geriausias savybes transporto priemonės komfortabilumui. Lyginant pasyvios ir pusiau aktyvios („Skyhook“) pakabos darbus gaunami 22-39 % geresni rezultatai.

„Groundhook“ valdymo algoritmą naudojanči pakaba būtų mažiau komfortiška tiek pasyvios pakabos, tiek „Skyhook“ valdymo algoritmu valdomos pakabos atžvilgiais. Lyginant pasyvios ir pusiau aktyvios („Groundhook“) pakabos darbus gaunami 24-64% prasnesni rezultatai.

Tolimesnius tyrimus verta atlikinėti su „Skyhook“ valdymo algoritmu, keičiant maksimalų slopinimą galima tikėtis dar padidinti sistemos efektyvumą.