

17-osios jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ teminės konferencijos  
**TRANSPORTO INŽINERIJA IR VADYBA**,  
 vykusių 2014 m. gegužės 8 d. Vilniuje, straipsnių rinkinys

Proceedings of the 17th Conference for Junior Researchers 'Science – Future of Lithuania'  
**TRANSPORT ENGINEERING AND MANAGEMENT**, 8 May 2014, Vilnius, Lithuania

Сборник статей 17-й конференции молодых ученых «Наука – будущее Литвы»  
**ИНЖЕНЕРИЯ ТРАНСПОРТА И ОРГАНИЗАЦИЯ ПЕРЕВОЗОК**, 8 мая 2014 г., Вильнюс, Литва

## ELEKTROMOBILIO MASĖS PASISKIRSTYMO ĮTAKA STABDYMO EFEKTYVUMUI

Donatas Dirginčius

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

El. paštas: donatas.dirgincius@gmail.com

**Santrauka.** Straipsnyje pateikiamas elektromobilio stabdymo efektyvumo priklausomybės nuo svorio centro padėties tyrimas. Atlikus literatūros apžvalgą pastebėta, kad automobilio apkrovos pasiskirstymas tarp priekinės ir galinės ašių turi įtakos stabdymo efektyvumui. Bandymų rezultatai parodė, kad pridėdamas masę ties priekine elektromobilio ašimi, taip perkeliame svorio centrą arčiau priekio ir atlikus stabdymo bandymus, gaunami geresni elektromobilio stabdymo parametrai. Taigi siekiant optimizuoti elektromobilio stabdymo efektyvumą, būtina tinkamai paskirstyti elektromobilio ratams tenkančią apkrovą.

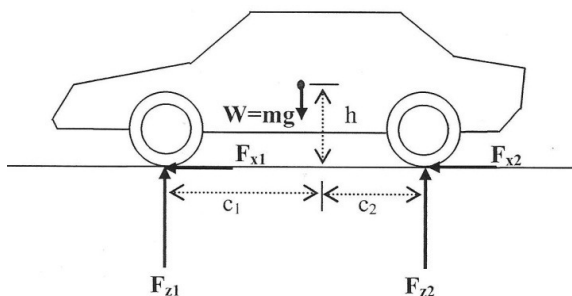
**Reikšminiai žodžiai:** Elektromobilis, stabdymo efektyvumas, svorio centras.

### Įvadas

Stabdymo efektyvumas yra viena svarbiausių savybių, kuri tiesiogiai lemia transporto priemonės saugumą. Nuolatos stengiantis sumažinti žuvusiųjų ir sužeistųjų skaičių keliuose, atkreipiamas vis didesnis dėmesys į transporto priemonių saugumą.

Transporto priemonės stabdymo efektyvumas priklauso nuo daugybės parametrų. Vienas iš jų yra svorio centro padėtis. Šiame straipsnyje detaliau panagrinėsime kaip keičiasi stabdymo efektyvumas keičiant elektromobilio svorio centro padėtį.

Panagrinėsime automobilį veikiančias jėgas kai jis važiuoja horizontalia plokštuma (1 pav.). Neįvertinsime riedėjimo varžos, aerodinaminių jėgų, inercinių jėgų pasipriešinimo (Dukkipati *et al.* 2008).



1 pav. Automobilio modelis horizontalioje plokštumoje

Pagal antrąjį Niutono dėsnį, įvertinant horizontalia ir vertikalia kryptimis veikiančias jėgas, bei jų atstumus nuo

svorio centro, galime išvesti automobilio ašių apkrovas (Dukkipati *et al.* 2008):

$$F_{z1} = M \cdot g \left( \frac{c_2}{c_1 + c_2} \right) + \frac{h}{c_1 + c_2} M \cdot a, \quad (1)$$

$$F_{z2} = M \cdot g \left( \frac{c_1}{c_1 + c_2} \right) - \frac{h}{c_1 + c_2} M \cdot a, \quad (2)$$

čia:  $F_{z1}$  – priekinės ašies apkrova;  $F_{z2}$  – galinės ašies apkrova;  $M$  – automobilio masė;  $g$  – laisvojo kritimo pagreitis;  $c_1$  – atstumas nuo automobilio svorio centro iki priekinės ašies;  $c_2$  – atstumas nuo automobilio svorio centro iki galinės ašies;  $h$  – atstumas nuo automobilio svorio centro iki kelio paviršiaus;  $a$  – automobilio lėtėjimo pagreitis.

Taigi iš pateiktų formulių (1) ir (2) matome, kad stabdant, didėja priekinės ašies apkrova ir proporcingai mažėja galinės ašies apkrova.

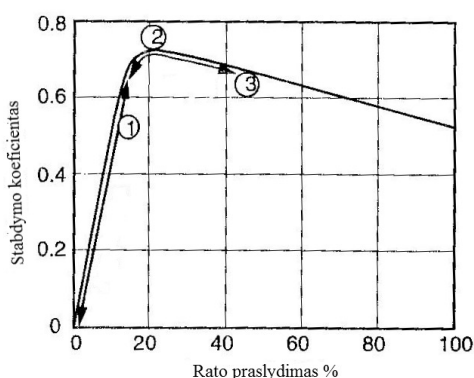
Efektyviausias stabdymas yra pasiekiamas tuomet, kai yra stabdoma pasiekiant padangos ir kelio paviršiaus sukibimo ribą. Kai ratai pradeda slysti, tuomet stabdymo efektyvumas mažėja. Taigi galime užrašyti maksimalią stabdymo jėgą (Wong 2008), kurios metu ratai dar nepradedą slysti:

$$F_{bf \max} = \mu \cdot W_f = \frac{\mu \cdot W [l_2 + h(\mu + f_r)]}{L}, \quad (3)$$

$$F_{br \max} = \mu \cdot W_r = \frac{\mu \cdot W [l_1 - h(\mu + f_r)]}{L}, \quad (4)$$

čia:  $F_{bf\max}$  – maksimali stabdymo jėga priekinei ašiai;  $F_{br\max}$  – maksimali stabdymo jėga galinei ašiai;  $\mu$  – padangos ir kelio paviršiaus sukibimo koeficientas;  $W_f$ ,  $W_r$  – automobilio svoris tenkantis atitinkamai priekinei ir galinei ašims;  $W$  – bendras automobilio svoris;  $l_1$  – atstumas nuo svorio centro iki priekinės automobilio ašies;  $l_2$  – atstumas nuo svorio centro iki galinės automobilio ašies;  $L$  – automobilio bazė;  $h$  – atstumas nuo automobilio svorio centro iki kelio paviršiaus;  $f_r$  – riedėjimo varžos koeficientas.

Kai stabdymo jėga pasiekia reikšmę nusakytą aukščiau pateiktoje formulėje, tuomet padangos yra ant slydimo ribos. Bet koks stabdymo jėgos padidėjimas, priverstų ratus užsiblokuoti. Taigi pagal šias formules matome, kad ašių apkrova ir maksimali stabdymo jėga kiekvienai ašiai priklauso nuo automobilio masės, ratų bazės ir automobilio svorio centro.



2 pav. Stabdymo koeficiento priklausomybė nuo ratų praslydimo

2 paveiksle matome kaip priklauso stabdymo koeficiento reikšmė nuo ratų praslydimo. Detaliau panagrinėjus šį paveikslėlį, galime suprasti kaip veikia stabdžių antiblokavimo sistema. Iki grafike matomo taško 1 yra didinama stabdymo jėga. Kuomet priartėjama prie taško 2, stabdžių valdymo blokas gauna signalus, kad padangos sukibimo su keliu koeficiento  $\mu$  reikšmė pradeda mažėti. Vadinasi ratas artėja pradeda slysti. Šiuo metu stabdžių antiblokavimo sistema sumažina stabdymo slėgį būtent šiam ratui. Kai ratas vėl pradeda sukintis, tuomet stabdymo jėga vėl padidinama. Kadangi padangos ir kelio paviršiaus sukibimo koeficientas yra pats didžiausias prieš

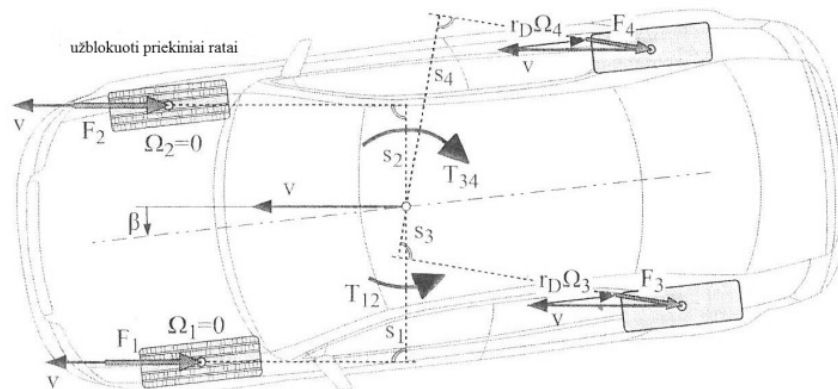
ratui užsiblokuojant, todėl stabdžių antiblokavimo sistema visada ir stengiasi išlaikyti šį koeficientą didžiausią, kad būtų pasiektas maksimalus stabdymo efektyvumas (Gillespie 2007).

Lenktyniniuose motocikluose yra įprasta naudoti tik priekinį stabdį, kai yra stabdoma ypač stipriai. Taip yra todėl, nes didelė dalis motociklo svorio pereina priekiniam ratui (Corno *et. al.* 2007). Į šią aspektą reikia atsižvelgti ir tiriant elektromobilio masės pasiskirstymo įtaką stabdymo efektyvumui. Pagal motociklo stabdymo efektyvumą galime daryti prielaidą, kad stabdant elektromobilį, didelė dalis elektromobilio svorio tenka priekiniams ratams, todėl efektyvesnis stabdymas bus tuomet, jei elektromobilio masės centras bus arčiau priekinės ašies.

Visuose šiuolaikiniuose automobiliuose stabdymo proceso metu yra stabdomi visi ratai. Idealiomis stabdymo sąlygomis, galime vadinti tokias sąlygas, kai visi automobilio ratai stabdant yra veikiami vienoda išilgine jėga (Genta 2008). Bet dėl daugybės stabdymo proceso metu veikiančių veiksnių, realiomis sąlygomis neįmanoma pasiekti idealaus stabdymo.

Problema iškyla tuomet, kai elektromobilis yra ekstremaliai stabdomas ir užblokuojami jo priekiniai ratai. Nors stabdant ir didėja priekinės ašies apkrova, ji vis tiek yra nepakankama, elektromobiliui efektyviai stabdyti. Ratų užblokuojimas gali sukelti automobilio sukimąsi apie savo ašį (Rill 2012).

Kai stabdant yra užblokuojami priekiniai ratai (3 pav.), tuomet padangų sukibimo jėgos  $F_1$  ir  $F_2$  bus nukreiptos priešinga slydimui kryptimi. Slydimo greitis  $v$  yra lygus automobilio judėjimo greičiui. Padangų sukibimo jėgos (jos yra beveik vienodos reikšmės) sukuria sukimo momentą  $T_{12}$ , veikiantį aplink automobilio svorio centrą. Kadangi jėgos  $F_1$  petys  $s_1$  yra didesnis negu petys  $s_2$  (jėga  $F_2$ ), todėl sukimo momentas  $T_{12}$  didins šoninio slydimo kampą  $\beta$  ir taip bus sukiamas automobilio nestabilumas. Galiniai ratai taip pat yra stabdomi, bet jie neslysta. Galinių ratų jėgos  $F_3$  ir  $F_4$  yra nukreiptos automobilio judėjimo kryptimi. Petys  $s_3$  yra gerokai mažesnis negu petys  $s_4$ . Sukimo momentas  $T_{34}$  yra nukreiptas priešinga kryptimi, negu automobilio apsisukimo apie savo ašį kryptis. Kai momento reikšmė  $T_{34}$  yra didesnė negu momento  $T_{12}$ , tuomet automobilis nepradės sukintis apie savo ašį (Rill. 2012).



3 pav. Stabdymo metu veikiančios jėgos, kai užblokuojami priekiniai ratai

Atliekant tyrimą yra nagrinėjamas stabdymo efektyvumo pokytis, kai keičiamas elektromobilio svorio centras. Tyrimui pasirinkta naudoti Vilniaus Gedimino Technikos Universitetui priklausantį elektromobilį. Stabdant šį elektromobilį, jo priekiniai ratai gan greit užsiblokuoja ir todėl lėtėjimo pagreitis nėra optimalus. Ši problema išky-la todėl, kad elektromobilio baterijos yra sumontuotos gale. Jos sudaro gan didelę dalį elektromobilio masės, todėl dėl jų montavimo gale svorio centras yra žymiai arčiau galinės ašies negu priekinės. Taigi tyrimo metu elektromobilio svorio centras yra perkeliamas arčiau priekinės ašies ir tuomet tiriamas stabdymo efektyvumas.

Darbo tikslas – ištirti kaip kinta ekstremaliai stabdomo elektromobilio lėtėjimo pagreičio, stabdymo kelio ir stabdymo laiko reikšmės keičiant jo svorio centrą.

### 1. Eksperimentinių tyrimų metodika ir naudojama įranga

Tyrimams naudojamas VGTU dėstytojų bei studentų pagamintas elektromobilis. Elektromobilio rėmas, pakaba ir kėbulo elementai pagaminti pagal automobilio „Lotus Super 7“ prototipą. Stabdžių, transmisijos ir vairavimo elementai pritaikyti nuo automobilio „Ford Sierra“. Elektromobilis varomas vien elektros energija gaunama iš akumuliatorių. Akumuliatoriai įkraunami naudojant 230 V įtampos elektros lizdą.

Lėtėjimo pagreičiui, stabdymo keliui, stabdymo laikui, stabdžių pedalo nuspaudimo jėgai, automobilio greičiui prieš pat stabdymą nustatyti naudojamas pagreičio matavimo prietaisas „MAHA VZM 100“. Tai universalus pagreičio matavimo prietaisas, kuriame įdiegta programa leidžia įvertinti automobilio greitėjimo arba stabdymo charakteristikas. Prietaisas jungiamas su kompiuteriu naudojant RS-232 arba USB jungtį. „MAHA VZM 100“ turi skystųjų kristalų raidinį skaitmeninį ekraną, jam energiją teikia 4 vnt. AA tipo baterijų, todėl matavimo metu, nereikia jo jungti prie papildomų energijos šaltinių.

Prietaisas „DiniArgeo 3590E-AF08“ yra aukštos kokybės skaitmeninės svarstyklės. Naudojant šias svarstyklės galima pasverti kiekvieną ratą atskirai. Jos turi programuojamus įvesties ir išvesties duomenis, 3 serijines jungtis, duomenims skirtus perdavimo protokolus, konfigūruojamas spausdinimo funkcijas, integruotą atmintį, ekraną.

Eksperimentiniai bandymai atlikti Vilniaus Gedimino technikos universiteto, Transporto inžinerijos fakulteto, Automobilių transporto katedros, esančios adresu J. Basanavičiaus g. 28, vidiniame kieme.

Pirmiausia prie elektromobilio centrinės konsolės pritvirtinamas pagreičio matavimo prietaisas „MAHA VZM 100“. Prie stabdžių pedalo pritvirtiname pedalo nuspaudimo jėgos jutiklį. Prie svarstyklių „DiniArgeo 3590E-AF08“ prijungiamos 4 svėrimo plokštės. Svarstyklės sukonfigūruojamos ir paruošiamos naudoti.

1. Elektromobilis bandytas pasiekus apie 40 km/h pradinį greitį. Tuomet imituojamas ekstremalus stabdymas: nuspaudžiamas stabdžio pedalas, automobilio priekiniai ratai užsiblokuoja, stabdžio pedalas laikomas nuspaustas tol kol elektromobilis visiškai sustoja.

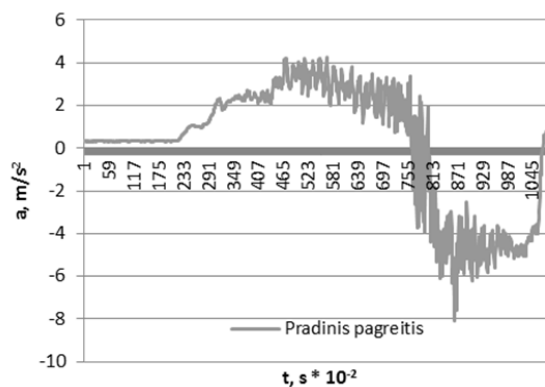
2. Bandymų metu buvo keičiama elektromobilio apkrova. Ties priekine elektromobilio ašimi buvo tvirtinama papildoma masė, kuri kiekvieno bandymo metu padidinama po 20 kg. Papildoma masė pritvirtinama tarp elektromobilio rėmo, panaudojant vamzdžių laikiklius, srieginį strypą ir tvirtinimo diržą. Maksimalus priekinės ašies apkrovimas buvo 80 kg.

3. Prieš kiekvieną stabdymo bandymą elektromobilis pasveriamas ir nustatomas jo masės pasiskirstymas tarp ašių.

4. Eksperimentai atliekami lėtėjimo pagreičio matavimo prietaisu „MAHA VZM 100“. Bandymų metu, asfaltas šlapias, tačiau gan stambios struktūros (parenkamas sukibimo koeficientas  $\phi = 0,7$ ). Po kiekvieno bandymo užrašomos pedalo nuspaudimo jėgos, pasiekto greičio, stabdymo laiko, stabdymo kelio, maksimalaus lėtėjimo pagreičio reikšmės. Prietaisas atspausdina ir atmintyje įrašo lėtėjimo pagreičio kreivę.

### 2. Tyrimų rezultatai

Pirmiausia pasveriamas elektromobilis kartu su jame įmontuota įranga ir vairuotoju. Gaunama kiekvienam ratui tenkanti masės dalis: priekinis kairės pusės ratas 128,6 kg, priekinis dešinės pusės ratas 114,2 kg, galinis kairės pusės ratas 224,2 kg, galinis dešinės pusės ratas 198,4 kg. Bendra elektromobilio masė yra 665,4 kg. Pagal masių pasiskirstymą matome, kad automobilio galinė ašis yra apkrauta beveik 200 kg daugiau negu priekinė. Tai rodo, kad elektromobilio svorio centras yra arti galinės ašies.

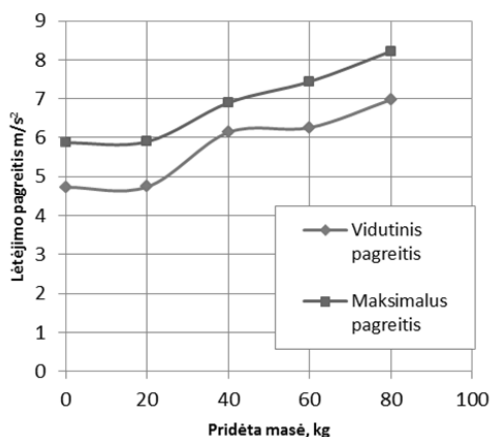


4 pav. Pradinis elektromobilio lėtėjimo pagreitis

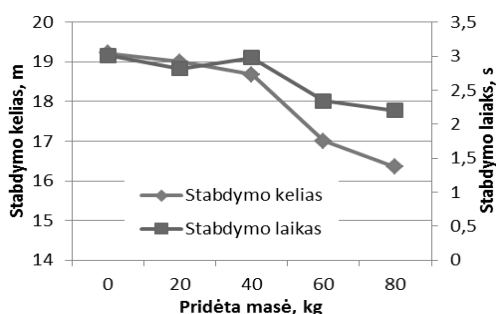
4 paveiksle pateiktas pradinio bandymo išilginio pagreičio grafikas. Matome kaip elektromobilis įsibėgėja ir pradeda stabdyti. Vidutinė lėtėjimo pagreičio reikšmė yra  $4,73 \text{ m/s}^2$ . Kadangi priekiniai ratai labai greitai pradeda slysti, todėl ir lėtėjimo pagreičio reikšmė nėra didelė.

Atlikus bandymus pridodant po 20 kg masę ant priekinės elektromobilio ašies ir nuskaičius gautus rezultatus, galime matyti lėtėjimo pagreičio pokytį (4 pav.).

Iš 5 paveikslu matyti, kad pridodant masę ant priekinės elektromobilio ašies, lėtėjimo pagreičio reikšmė nuosekliai didėja. Galime atkreipti dėmesį į tai, kad elektromobilio masė kiekvieno bandymo metu didėja, o tai turi neigiamos įtakos stabdymo efektyvumui, tačiau vis tiek lėtėjimo pagreitis didėja.



5 pav. Vidutinio ir maksimalaus lėtėjimo pagreičio reikšmės priklausomybė nuo pridėtos masės



6 pav. Elektromobilio stabdymo kelio ir stabdymo laiko priklausomybė nuo pridėtos masės

Kaip matyti iš stabdymo laiko ir stabdymo kelio grafiko (6 pav.), pridėjus masę taip pat sumažėjo elektromobilio stabdymo laikas bei stabdymo kelias. Vadinasi bendrai galime įvertinti apie pagerėjusias elektromobilio stabdymo savybes.

## Išvados

Atlikus eksperimentinius elektromobilio stabdymo tyrimus, kai yra pridėjama papildoma masė ties priekine elektromobilio ašimi, nustatyta, kad:

1. Padidinus priekinės ašies apkrovą 80 kg, elektromobilio lėtėjimo pagreitis padidėjo nuo pradinių  $4,73 \text{ m/s}^2$  iki  $6,98 \text{ m/s}^2$ , o tai yra net 32,2 %.

2. Taip pat sumažėjo ir elektromobilio stabdymo kelias bei stabdymo laikas. Stabdymo kelias sutrumpėjo 15 %, nuo 19,22 metrų iki 16,35 metrų. Stabdymo laikas sumažėjo 27 %, nuo pradinių 3,01 sekundžių iki 2,2 sekundžių.

3. Svorio centro padėties perkėlimas arčiau priekinės ašies padidino stabdymo efektyvumą. Nors ir bendras elektromobilio svoris padidėjo 80 kg, tačiau lėtėjimo pagreitis ir stabdymo laikas sumažėjo trečdaliu. Norint dar labiau pagerinti elektromobilio stabdymo parametrus, reikia esamus elektromobilio komponentus paskirstyti taip, kad svorio centras būtų arčiau priekinės ašies. Tuomet bus pakeista svorio centro padėtis nepadidinant bendros elektromobilio masės.

## Literatūra

- Corno, M.; Savaresi, S. M.; Tanelli, M.; Fabbri, L. 2007. *On optimal motorcycle braking*. Elsevier Ltd. 13 p.
- Dukkipati, R. V.; Pang, J.; Qatu, M. S.; Sheng, G.; Shuguang, Z. 2008. *Road Vehicle Dynamics*. SAE International. 852 p.
- Genta, G. 2008. *Motor vehicle dynamics: modeling and simulation*. Singapore, World Scientific. 524 p.
- Gillespie, T. D. 2007. *Fundamentals of vehicle dynamics*. Warrendale (Pa.): Society of Automotive Engineers. 495 p.
- Rill, G. 2012. *Road vehicle dynamics: fundamentals and modeling*. BocaRaton (Fla.): CRC Press. 331 p.
- Wong, J. Y. 2008. *Theory of ground vehicles*. Hoboken (N. J.): Wiley. 560 p.