

## STABDOMO AUTOMOBILIO STABILUMO VEIKSNIŲ MODELIAVIMO TEORINIAI IR METODOLOGINIAI PAGRINDAI

Nerijus Kudarauskas

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

El. paštas: nerijus.kudarauskas@vgtu.lt

**Santrauka.** Šiame straipsnyje aprašomi automobilio stabilumo modeliavimo parametrai, turintys įtakos lengvojo automobilio valdomumui ir stabilumui stabdymo metu, sukurti sistemos modelio vertinimo pagrindai, įvertinantys sukibimo koeficientą. Atliekama modelio faktoriinė analizė, pateikiant integralinio rodiklio  $Q$  įvertinimo rekomendacijas. Nagrinėjami sukibimo koeficientą lemiantys veiksniai. Aptariamas ekspertinis vertinimas ir jo taikymas praktikoje. Pateikiama, kad labiausiai automobilio stabilumą lemiantis veiksnys yra padangų sukibimo su kelio paviršiumi koeficientas.

**Reikšminiai žodžiai:** automobilis, valdomumas, stabilumas, stabdymas, sukibimo koeficientas.

### Įvadas

Automobilio stabdymo dinamiškumas apibūdina automobilio galimybę greitai sumažinti važiavimo greitį ir jo paruoštumą ekstremaliai situacijai. Patikima ir efektyvi stabdžių sistema leidžia vairuotojui, važiuojančiam automobiliu dideliu greičiu, esant reikalui sustabdyti automobilį nuvažiavus mažą atstumą.

Šiuolaikiniai automobiliai turi keturias stabdžių sistemas: darbinę, atsarginę, stovėjimo ir papildomą. Dideli sunkvežimiai turi visas keturias atskiras stabdžių sistemas. Lengvuosiuose automobiliuose paprastai kaip atsarginė sistema naudojama stovėjimo stabdžių sistema, o kaip papildoma – stabdymas varikliu. Svarbiausia automobilio valdymui ir eismo saugumui užtikrinti yra darbinė stabdžių sistema. Ji naudojama normaliam (neefektyviam) ir ekstremaliai automobilio stabdymui.

Neefektyviu vadinamas stabdymas esant nedideliam lėtėjimo pagreičiui (apie 1–4 m/s<sup>2</sup>). Ekstremaliu vadinamas stabdymas esant dideliui lėtėjimo pagreičiui, paprastai maksimaliam, kuris lengviesiems automobiliams ant sausos asfalto dangos būna didesnis kaip 7 m/s<sup>2</sup>. Eismo saugumo požiūriu svarbesnis yra ekstremalus stabdymas, kadangi taip stabdoma pavojingose situacijose, kad būtų išvengta kliūtis ar susidūrimo.

Važiuojant susiduriama su didele kelio dangų įvairove, kartais gali susidaryti situacija, kai važiuojamojoje kelio dalyje yra vietų, kurių dangų sukibimo su ratais koeficientas yra skirtingas. Pavyzdžiui, važiuojamosios kelio dalies ruožas padengtas smėliu, purvu, vietomis apledėjęs ir pan. Toliau bus pateiktos lėtėjimo pagreičio reikšmės kiekvienu konkrečiu atveju.

Labai didelė dangų įvairovė būna žiemos sąlygomis. Pavyzdžiui, pasakymas, kad kelio važiuojamoji dalis padengta sniegu, pateikia mažai informacijos. Tai gali būti tik iškritęs sniegas, išvažinėtas sniegas, sniegas, padengtas ledo sluoksniu, išvažinėtas sniegas, kuris buvo pabarstytas smėliu ir pan. Atitinkamai kiekvienu atveju yra skirtingas ratų sukibimo su kelio danga koeficientas.

Kartais stabdoma transporto priemonė juda kelio ruožais, kurių sukibimo koeficientai skirtingi. Pavyzdžiui, automobilis, stabdomas ant sauso asfalto, vėliau išvažiuoja į šlapią ruožą arba į kelkraštį. Tokiu atveju, pavyzdžiui, nustatant automobilio važiavimo prieš stabdymą greitį, būtina nustatyti jo lėtėjimo pagreičius kiekviename kelio ruože (Sokolovskij 2005).

Šio straipsnio tikslas – išanalizuoti stabdomo automobilio stabilumo veiksnių modeliavimo teorinius ir metodologinius pagrindus.

### Stabdomo lengvojo automobilio stabilumą lemiantys veiksniai

Norint sumodeliuoti stabdomo lengvojo automobilio stabilumą, būtinas automobilio stabilumą ir valdomumą lemiančių veiksnių sąveikos apytikslis kompleksinis ir sisteminis tyrimas.

Vertėtų išskirti tokius nagrinėjamo uždavinio pagrindinius faktoriinės analizės etapus:

1. Užduoties sudarymas ir faktoriinės analizės tikslo nustatymas.
2. Nagrinėjamą būdingąjį rodiklį – stabdomo automobilio stabilumą – lemiančių veiksnių išrinkimas.

3. Išrinktų veiksnių klasifikavimas ir sisteminimas, siekiant kompleksiskai ir sistemingai iširti jų įtaką stabdomo automobilio stabilumui.

4. Priklausomybių tarp veiksnių ir būdingojo rodiklio nustatymas.

5. Tarpusavio ryšių tarp veiksnių ir būdingųjų rodiklių – transporto priemonės valdomumo ir kursinio stabilumo – modeliavimas.

6. Faktorinio modelio apskaičiavimas ir kiekvieno iš veiksnių įtakos būdingojo rodiklio reikšmės dydžiui įvertinimas.

Nagrinėjamo uždavinio faktorinės analizės tikslas yra apibrėžti veiksniai, turinčius įtakos stabdomo automobilio valdomumui ir kursiniam stabilumui, kad būtų galima pagerinti aktyvųjų automobilio saugumą.

Valdomumo ir kursinio stabilumo praradimo priežasčių analizė leidžia nustatyti ir išrinkti veiksniai, lemiančius stabdomo lengvojo automobilio valdomumą ir stabilumą avarinės situacijos susidarymo metu.

Būdingojo rodiklio – stabdomo automobilio stabilumo – analizei veiksniai atrenkami remiantis teorinėmis ir praktinėmis žiniomis transporto priemonės stabilumo ir judėjimo mechanikos srityse. Kuo daugiau veiksnių analizuojama, tuo adekvatesnis faktorinis modelis bus realaus eksperimento rezultatai.

Remiantis tuo, kas aprašyta, tolesnei analizei vertėtų išskirti tokias pagrindines stabdomo automobilio nestabilumo priežastis:

- nevienodos automobilio kairiųjų ir dešiniųjų ratų stabdomo jėgos dėl nevienodų sukibimo koeficientų, susidariusių dėl kelio paviršiaus būklės arba dėl padangų paviršiaus techninės būklės;

- skirtingos kairiųjų ir dešiniųjų ratų stabdomo jėgų momentų reikšmės dėl susidėvėjusių stabdžių trinkelėlių arba ant trinties paviršių patekus purvo, drėgmės, tepalų;

- nestabilumą sukeliančios išorinės jėgos (staigus šoninio vėjo gūsis arba stiprus šoninis vėjas, kelio skersinio pasvirimo staigus pasikeitimas, staigus vairo pasukimas siekiant išvengti užvažiavimo ant kliūtis), t. y. visos šoninės jėgas sukeliančios sąlygos;

- ratų blokavimo stabdant lemiamas sumažėjęs sukibimo koeficientas, to pasekmė – automobilio judėjimas čiuožiant ir jo nestabilumas.

Sprendžiant nestabilumo užduotį, stabdomo automobilio stabilumą lemiančius veiksniai galima skirti į tokias pagrindines grupes:

- veiksniai, sukeltys išorinį poveikį automobiliui (kelio paviršiaus būklė, šoninis vėjas, purvas, drėgmė ir kt.);

- vidiniai veiksniai, tiesiogiai susiję su automobiliu (padangų nusidėvėjimas, stabdžių trinkelėlių nusidėvėjimas ir kt.).

### **Stabdomo lengvojo automobilio stabilumo faktorinė analizė**

Faktorinės analizės užduotis yra nustatyti būdingojo rodiklio – stabdomo automobilio stabilumo – priklausomybę nuo minėtų stabilumą lemiančių veiksnių. Skiriamos šios faktorinės priklausomybės formos:

- determinuota arba stochastinė;

- tiesioginė arba atgalinė;

- vieno laipsnio arba daugialaipsnė;

- statinė arba dinaminė;

- retrospektyvi arba perspektyvi (progozinė).

Determinuota priklausomybė sudaro veiksnių įtakos būdingajam rodikliui – stabdomo automobilio stabilumui – tyrimo procedūras.

Šiuo atveju faktoriniu modeliu nagrinėjamas būdingasis rodiklis gali būti paprasta funkcinė priklausomybė nuo nagrinėjamų veiksnių (tiriamų veiksnių sandauga, dalyba arba algebrinė suma).

Automobilio judėjimas čiuožiant ir nestabilumas, kaip būdingasis rodiklis, yra determinuota priklausomybė nuo padangų sukibimo su kelio paviršiumi koeficiento, kuris savo ruožtu priklauso nuo kelio paviršiaus ir automobilio stabdomo režimo.

Jeigu veiksnių ryšys su nagrinėjamu būdinguoju rodikliu yra koreliacinis ir tikimybinis, tokiu atveju turime stochastinę priklausomybę.

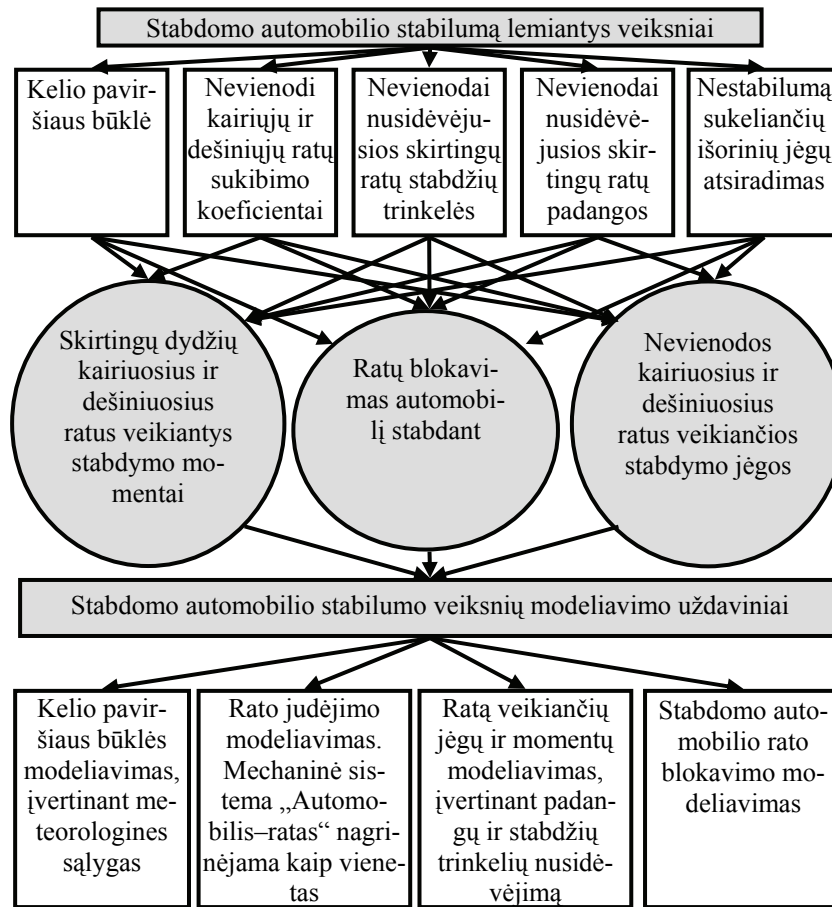
Pažymėtina, kad stochastinis modeliavimas papildo determinuotos faktorinės analizės procedūras ir naudojamas esant būtinybei išnagrinėti poveikį veiksnių, kuriais remiantis ypač sudėtinga sudaryti griežtai determinuotą faktorinį modelį.

Nagrinėjamo uždavinio atveju tai veiksniai, lemiantys išorinių jėgų susidarymą:

- kelio paviršiaus būklės pasikeitimas dėl meteorologinių sąlygų;

- oro masių veikimas (stiprus šoninio vėjo gūsis, stiprus vėjas).

1 pav. parodyti stabdomo automobilio valdomumą ir stabilumą lemiantys veiksniai, jų priklausomybės ir iš veiksnių analizės išplaukiantys atitinkami modeliavimo uždaviniai.



1 pav. Stabdomo automobilio stabilumo veiksnių priklausomybė ir modeliavimas

Fig. 1. The dependencies of vehicle stability factors in braking and their simulation

Pažymėtina, kad šiuo atveju turime skirtingų laipsnių veiksnių priklausomybes.

Kiekvieną 1 pav. pavaizduotą stabdomo automobilio stabilumą lemiančių veiksnių modeliavimo uždavinį galima išreikšti keliomis paprastesnėmis užduotimis – modeliais. Viena iš tokių pagrindinių užduočių yra sumodeliuoti padangų sukibimo su kelio paviršiumi koeficientą – labiausiai automobilio stabilumą lemiantį veiksnį.

Automobilio ratų padangų sukibimo su kelio paviršiumi koeficiento modeliavimo užduotis atsiranda dėl automobilio stabilumo jį stabdant modeliavimo.

Svarbu, kad sukibimo koeficiento matematinis modelis kiek įmanoma įvertintų visus veiksnius, lemiančius automobilio padangų sukibimą su kelio paviršiumi.

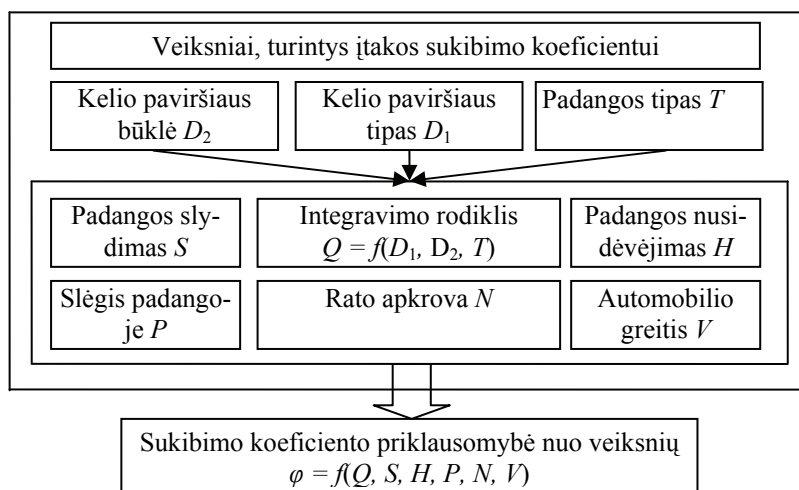
Sukibimo koeficiento vertinimo modelį tikslinga sudaryti dviem etapais. Pirmame etape būtina nustatyti sukibimo koeficiento priklausomybę nuo lemiamųjų

veiksnių, esant būtinybei pasinaudojus eksperimentiniais duomenimis. Antrame etape vertėtų patikslinti veiksnių įtaką, užtikrinant matematinio modeliavimo reikšmių minimalų nesutapimą su eksperimento duomenimis.

2 pav. pateikta struktūrinė modelio schema, parodanti sukibimo koeficientą lemiančių veiksnių priklausomybės tvarką. Tokio modelio išskirtinumas yra tas, kad šiuo atveju turime skirtingų laipsnių veiksnių priklausomybes.

Integralinį veiksnį  $Q$ , priklausantį nuo kelio paviršiaus būklės  $D_1$ , kelio paviršiaus tipo  $D_2$  ir padangų tipo  $T$ , tikslinga vertinti pagal 1 lentelėje pateiktą plačiai taikomą metodiką.

Visi 1 ir 2 pav. pateikti padangos sukibimo su kelio paviršiumi koeficientą lemiantys veiksniai laikomi priimtais ir gali būti vertinami netiksliais apibrėžtimis.



2 pav. Sukibimo koeficiento priklausomybės nuo jį lemiančių veiksnių struktūra

Fig. 2. The structure of dependence of the road-holding capacity of a tyre upon its determining factors

1 lentelė. Integralinio rodiklio  $Q$  įvertinimo rekomendacijos

Table 1. Recommendations for evaluating the integral indicator  $Q$

Kelio paviršiaus		Veiksny $Q$ padangų tipui $T$		
tipas $D_1$	būklė $D_2$	didelis slėgis	mažas slėgis	didesnio pravažumo
asfaltbetonio, cementbetonio	sausas	5,63–7,88	7,88–9,00	7,88–9,00
	sudrėkintas lietaus	3,10–4,33	4,33–4,95	4,33–4,95
	šlapias	3,94–5,06	5,06–6,19	5,63–6,75
	padengtas purvu	2,81–5,06	2,81–4,50	2,81–5,06
	šlapias sniegas ( $t > 0\text{ }^\circ\text{C}$ )	2,10–3,40	2,10–4,20	2,10–4,20
	plikledis ( $t < 0\text{ }^\circ\text{C}$ )	0,90–1,69	1,13–2,25	0,56–1,13
akmenuotas	sausas	4,50–5,63	5,63–6,19	6,75–7,88
	šlapias	2,70–3,75	3,75–4,43	4,50–6,19
skaldinis	sausas	5,63–6,75	6,75–7,88	6,75–7,88
	šlapias	3,38–4,50	4,50–5,63	4,50–6,19
gruntinis	sausas	4,50–5,63	5,63–6,75	5,63–6,75
	sudrėkintas lietaus	2,25–4,50	3,38–5,06	3,94–5,63
	polaidžio metu	1,68–2,81	1,68–2,81	2,25–3,38
priemolio	sausas	4,50–5,63	5,06–6,19	4,50–5,63
	sudrėkintas iki plastinės masės	2,25–4,50	2,81–4,50	3,38–5,06
	sudrėkintas iki tekėjimo	1,69–2,25	1,69–2,81	1,69–2,81

Būtina pažymėti, kad dėl sukibimo koeficiento nedeterminuotos priklausomybės nuo daugelio jį lemiančių veiksnių ir dėl to, kad matematiniu požiūriu neįmanoma

2 lentelė. Sukibimo koeficientą lemiantys veiksniai

Table 2. Factors, determining the road-holding capacity of a tyre

Sukibimo koeficientą lemiantis veiksnys	Vertinimo aibė	Vertinimo apibrėžtys
Integralinis rodiklis $Q$	1–10, balais	mažas $Q_1$ , vidutinis $Q_2$ , didelis $Q_3$
Padangos slidimas $S$	1–100, %	riedėjimas iš dalies slystant $S_1$ , judėjimas čiuožiant $S_2$
Padangos nusidėvėjimas $H$	1–100, %	nauja $H_1$ , leidžiamas nusidėvėjimas $H_2$ , nudėvėta $H_3$
Slėgis padangoje $P$	0,1–0,325, MPa	žemas $P_1$ , normalus $P_2$ , per aukštas $P_3$
Rato apkrova $N$	1–100, %	be apkrovos $N_1$ , vidutinė apkrova $N_2$ , maksimali apkrova $N_3$
Automobilio greitis $V$	0–200, km/h	mažas $V_1$ , mažesnis už vidutinį $V_2$ , vidutinis $V_3$ , didesnis už vidutinį $V_4$ , didelis $V_5$

korektiškai nustatyti priklausomybių (dėl neapibrėžtumo ir sudėtingų procedūrų), sukibimo koeficientą derėtų vertinti naudojantis ekspertiniais metodais.

Ekspertinis vertinimas leidžia pakankamai tiksliai nustatyti sukibimo koeficientą, kad būtų galima taikyti jį praktikoje. Tačiau, siekiant tiksliau įvertinti, esant galimybei, jį būtina papildyti matematiškai aprašytais sukibimo koeficiento reikšmę lemiančių veiksnių modeliais.

Sukibimo koeficiento ekspertinio vertinimo pavyzdys pateiktas 2 lentelėje.

Tokiu atveju, nustatant sukibimo koeficiento priklausomybę nuo jį lemiančių veiksnių, derėtų pasinaudoti žinoma ekspertinių vertinimų metodika ir vėliau patiks-

linti gautąją priklausomybę matematiniu modeliu, kuris turi aprašyti kiek įmanoma visus veiksnius, lemiančius automobilio padangų su kelio paviršiumi sukibimo koeficientą.

### Išvados

1. Norint sumodeliuoti stabdomo lengvojo automobilio stabilumą, būtinas automobilio stabilumą ir valdomumą lemiančių veiksnių sąveikos apytikslis kompleksinis ir sisteminis tyrimas. Stabdomo lengvojo automobilio valdomumą ir stabilumą avarinės situacijos susidarymo metu lemiančius veiksnius nustatyti ir išrinkti leidžia valdomumo ir kursinio stabilumo praradimo priežasčių analizė. Kadangi veiksnių yra daug ir jų tarpusavio ryšiai ne visada tiksliai apibrėžiami, procesui nagrinėti pasitelkiama faktorinė analizė.

2. Labiausiai automobilio stabilumą lemiantis veiksnys yra padangų sukibimo su kelio paviršiumi koeficientas. Jo modeliavimas yra stabdomo automobilio stabilumą lemiančių veiksnių modeliavimo uždavinio dalis. Kad būtų galima taikyti sukibimo koeficientą praktikoje, pastarąjį pakankamai tiksliai nustatyti leidžia ekspertinis vertinimas.

3. Siekiant kuo tiksliau įvertinti automobilio stabilumą, nustatant sukibimo koeficiento priklausomybę nuo jį lemiančių veiksnių, derėtų pasinaudoti žinoma ekspertinių vertinimų metodika. Tačiau, norint įvertinti tiksliau, vėliau, esant galimybei, gautąją priklausomybę būtina papildyti matematiškai aprašytais sukibimo koeficiento reikšmę lemiančių veiksnių modeliais.

### Literatūra

- Sokolovskij, E. 2005. Automobilių stabdymo proceso eksperimentiniai tyrimai, *Transport* 20(3): 91–95.
- Ротштейн, А. П.; Кательников, Д. И. 1998. Идентификация нелинейных объектов нечёткими базами знаний, *Кибернетика и системный анализ* [Kibernetika ir sisteminė analizė] 5: 53–61.
- Штейнберг, Ш. Е. 1987. *Идентификация в системах управления* [Identifikavimas valdymo sistemose]. Москва: Энергоатомиздат. 81 с.
- Эйкхофф, П. 1975. *Основы идентификации систем управления* [Valdymo sistemų identifikavimo pagrindai]. Москва: Мир. 321 с.

## THEORETICAL AND METHODOLOGICAL PRINCIPLES OF SIMULATING VEHICLE STABILITY FACTORS IN BRAKING

N. Kudarauskas

Abstract

The paper presents the simulation factors, influencing vehicle controllability and stability in braking, and the main principles developed for evaluating the system model used for simulation, taking into account the road-holding capacity of a tyre.

The factorial analysis of the considered model is performed and the recommendations for evaluating the integral indicator  $Q$  are given.

The factors determining the grip coefficient are also analysed and expert evaluation and its practical application are discussed.

It is emphasized that the main factor determining vehicle stability is road-holding capacity of a tyre.

**Keywords:** vehicle, controllability, stability, braking, road-holding capacity of a tyre.