



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
PANEVĖŽIO TECHNOLOGIJŲ IR VERSLO FAKULTETAS

Edgaras Abraškevičius

**AUTOMOBILIO DINAMIKOS TYRIMAS PO SUSIDŪRIMO SU
KITU AUTOMOBILIU**

Magistro projektas

Vadovas

Doc. dr. Dainius Vaičiulis

PANEVĖŽYS, 2017

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
PANEVĖŽIO TECHNOLOGIJŲ IR VERSLO FAKULTETAS

**AUTOMOBILIO DINAMIKOS TYRIMAS PO SUSIDŪRIMO SU
KITU AUTOMOBILIU**

Magistro projektas
Transporto priemonių inžinerija (kodas 621E20001)

Vadovas

Doc. dr. Dainius Vaičiulis

Recenzentas

Projektą atliko

Edgaras Abraškevičius

PANEVĖŽYS, 2017



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas
(Fakultetas)

Edgaras Abraškevičius
(Studento vardas, pavardė)

Transporto priemonių inžinerija, 621E20001
(Studijų programos pavadinimas, kodas)

„Automobilio dinamikos tyrimas po susidūrimo su kitu automobiliu“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 17 m. Gegužės 31 d.
Panevėžys

Patvirtinu, kad mano, **Edgaro Abraškevičiaus**, baigiamasis projektas tema „Automobilio dinamikos tyrimas po susidūrimo su kitu automobiliu“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

BAIGIAMOJO PROJEKTO UŽDUOTIS

Išduota studentui: *Edgaras Abraškevičius* Grupė: *PMT – 5*

1. Darbo tema patvirtinta 2017 m. kovo mėn. 30 d. dekanu potvarkiu Nr. V25-13-8:

Lietuvių kalba: *Automobilio dinamikos tyrimas po susidūrimo su kitu automobiliu*

Anglų kalba: *Research on Vehicle Dynamics at Collision with another Car*

2. Darbo tikslas:

Ištirti automobilio dinaminis rodiklius po smūgio su kitu automobiliu.

3. Reikalavimai ir sąlygos:

Nustatyti kokią įtaką automobilio dinaminiams rodikliams turi automobilių judėjimo greitis susidūrimo metu, automobilių masės, atsistatymo koeficientai.

4. Projekto struktūra. Turinys konkretizuojamas kartu su vadovu, atsižvelgiant į BP pobūdį.

Literatūros apžvalga, Tiriamaoji dalis, Išvados ir Literatūros sąrašas.

5. Ši užduotis yra neatskiriama magistro baigiamojo projekto dalis.

6. Projekto pateikimo gynimui kvalifikacinėje komisijoje terminas

2017-05-31

(data)

Užduotį gavau: *Edgaras Abraškevičius*

(studento vardas, pavardė, parašas)

2017-02-01

(data)

Vadovas: *doc. Dainius Vaičiulis*

(pareigos, vardas, pavardė, parašas)

2017-02-01

(data)

TURINYS

ĮVADAS.....	8
1. APŽVALGINĖ DALIS.....	9
2. DVIEJŲ AUTOMOBILIŲ SUSIDŪRIMO DINAMIKOS TYRIMO METODOLOGINĖ DALIS	15
2.1. Greičių po smūgio ir jėgos impulso skaičiavimai	15
2.2. Atsistatymo koeficiento, deformavimo energijos, deformacijų skaičiavimas bei standumo įvertinimas	17
2.3. Automobilių susidūrimo jėgos bei smūgio trukmės skaičiavimai.....	21
2.3.1. Suspaudimo trukmės skaičiavimas.....	22
2.3.2. Atsistatymo trukmės skaičiavimas	23
2.4. Automobilių susidūrimo metu atsirandančių pagreičių skaičiavimas	25
2.4.1. Automobilių pagreičiai suspaudimo metu	26
2.4.2. Automobilių pagreičiai atsistatymo metu	27
2.5. Automobilių sustojimo atstumo bei trukmės skaičiavimas.....	28
3. DVIEJŲ SUSIDURIANČIŲ AUTOMOBILIŲ DINAMIKOS TYRIMŲ REZULTATAI	31
3.1. Automobilių greičių po smūgio tyrimas	31
3.2. Automobilių susidūrimo smūgio impulsų ir energijos tyrimas.....	33
3.3. Automobilių susidūrimo deformacijų tyrimas.....	36
3.4. Automobilių susidūrimo jėgų tyrimas	38
3.5. Automobilių susidūrimo pagreičių tyrimas	41
3.6. Automobilių sustojimo atstumo po smūgio tyrimas	46
4. REZULTATŲ PALYGINIMAS.....	51
5. IŠVADOS	53
6. LITERATŪRA.....	54

Abraškevičius, Edgaras. *Automobilio Dinamikos Tyrimas po Susidūrimo su Kitu Automobiliu. Magistro* baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Dainius Vaičiulis; Kauno Technologijos Universitetas, Panevėžio Technologijų ir Verslo Fakultetas.

Mokslo kryptis ir sritis: Transporto priemonių inžinerija.

Reikšminiai žodžiai: *smūgis, dinamika, automobilių susidūrimas.*

Panevėžys, 2017. 55 p.

SANTRAUKA

Šiame darbe buvo analizuojamas dviejų automobilių, kurių ašys smūgio metu yra vienoje tiesėje, susidūrimas, kuomet vienas iš automobilių, judėdamas tam tikru greičiu, atsitrenkia į kitą automobilį, kuris iki smūgio nejudėjo. Tyrimo tikslas – panagrinti kaip keičiasi automobilių dinamika po susidūrimo, žinant tam tikrus automobilių parametrus prieš smūgį ir įvertinti kaip tiksliai galima apskaičiuoti automobilių dinaminis parametrus po smūgio naudojant matematinius skaičiavimus.

Kad tai būtų galima padaryti, įsigilinta į automobilių smūgio dinamiką bei pagrindinius jos parametrus, automobilių susidūrimo metu vykstančius energijos mainus. Atlikta panašių mokslinių straipsnių analizė, iš kurios surinkta metodinė medžiaga, kuri panaudojama skaičiavimams atlikti.

Atlikus tyrimą gauta įvairių dydžių pasiskirstymų bei priklausomybių, kaip vieni parametrai daro įtaką kitiems, atlikti kiekybiniai vertinimai bei rezultatai, gauti pagal naudotą skaičiavimo metodiką palyginami su rezultatais, gautais iš tokio paties pobūdžio realių automobilių smūgio testų.

Abraškevičius, Edgaras. *Research on Vehicle Dynamics at Collision with another Car: Master's thesis* / supervisor assoc. prof. dr. Dainius Vaičiulis. Panevėžys Faculty of Technology and Business, Kaunas University of Technology.

Research area and field: Transport engineering.

Key words: *impact, dynamics, car collision*.

Panevėžys, 2017. 55 p.

SUMMARY

In this paper, two car colinear collision, when one of the car is moving at specific speed and crashes into another car which does not move before impact, was analyzed. The aim of this research was to analyze how specific parameters of vehicles before collision influence their dynamics after collision. and to evaluate how accurate the calculations are compared to real car collisions.

In order to do this, vehicle impact dynamics, main parameters and energy exchanges taking place during the collision were examined. Similar scientific articles and surveys were analyzed from which methodical material was gathered and used for calculations.

After this survey was carried out, a lot of data was collected how specific parameters influence dynamics of colliding cars. Also quantitative evaluation was conducted, information regarding which parameters have the greatest impact on vehicle dynamics after their collision was collected and results from calculation and real car crash tests were compared.

IVADAS

Autoįvykiai yra neišvengiama ir kasdieninė šiuolaikinės susisiekimo sistemos dalis. Tam, kad būtų galima išvengti dalies šių įvykių bei sumažinti jų padarinius, būtina atlikti įvairius tyrimus, taip tobulinant transporto priemonių konstrukciją bei saugumo sistemas. Nors ir visame pasaulyje atliekama daugybė automobilių smūgio testų, tai sudaro tik labai mažą dalį realiai vykstančių ar įvyksiančių eismo įvykių variantų. Dėl šios priežasties, norint nustatyti susiduriančių automobilių elgseną po smūgio, yra sukurta nemažai kompiuterinių programų. Jose surinkta begalė informacijos iš realių automobilių smūgio testų, kuriuos atlikti yra labai brangu, reikia daug stebėjimo įrangos bei specifinių sąlygų. Dėl šių priežasčių, tokio tipo kompiuterinės programos yra ganėtinai brangios ir iliniam vartotojui sunkiai prieinamos, o siūlomos bandomosios tokių programų versijos yra labai apribotos.

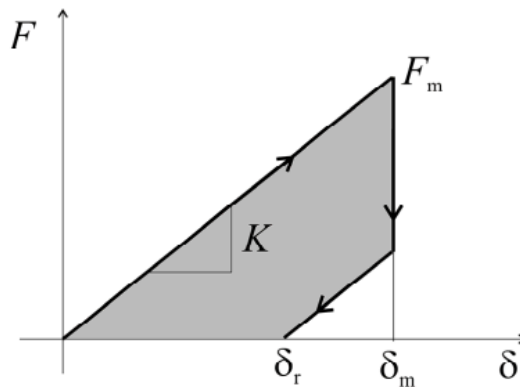
Taigi, šio darbo tikslas – patyrinti dviejų susiduriančių automobilių dinamiką bei jų elgseną po smūgio, keičiant įvairius automobilių parametrus buvusius prieš smūgį. Kaip buvo minėta, egzistuoja modernių ir informatyviu kompiuterinių programų tokio pobūdžio tyrimam atlikti, tačiau dėl jų riboti prieinamumo, darbe naudojami matematiniai skaičiavimai surinkti iš analizuotos literatūros metodinės medžiagos. Be to, apskaičiuoti rezultatai lyginami su rezultatais, gautais iš tokio pat pobūdžio realių automobilių susidūrimų testų.

To įgyvendinimui reikės atlikti išsamią panašių tyrimų analizę, įsigilinti į automobilių smūgio dinamiką, pagrindinius jos parametrus ir dydžius, surinkti metodinę medžiagą šiems dydžiams apskaičiuoti bei atlikti vertinimus, kokią įtaką šiems dydžiams turi įvairūs automobilių parametrai, kaip pavyzdžiui greičiai prieš susidūrimą ar automobilių masės.

1. APŽVALGINĖ DALIS

Smūgį galima apibrėžti kaip dviejų ar daugiau kūnų kontaktą, kai ženkliai pasikeičia jų dinaminės savybės. Dėl to vyksta energijos mainai, kurie atsižvelgiant į daugybę parametrų deformuoja kūną bei pakeičia jo judėjimo greitį ir trajektoriją [5].

Smūgis išskiriamas į du būvius – suspaudimo ir atsistatymo (iš anglų kalbos – *compression* ir *restitution*). Suspaudimo metu į kliūtį įvažiuojančio automobilio sukaupta kinetinė energija sunaudojama susiduriančių kūnų deformavimui. Suspaudimas baigiasi, kai susiduriančių kūnų greičiai susilygina ir pasiekama maksimali deformacijos vertė. Po to prasideda antrasis iš dviejų minėtų smūgio būvių – deformacijos atsistatymas. Šio būvio metu deformuotos automobilių dalys dėl įvairių fizikinių parametrų (plastiškumas, trapumas ir kt.) bando atgauti savo pirminę būklę. Dėl to dalis deformacijai sunaudotos energijos perduodama automobilių formoms atstatyti [4]. Minėtus susidūrimo būvius bei deformaciją smūgio metu iliustruoja 1 ir 2 pav.



1 pav. Jėgos bei deformacijos kitimas automobilių susidūrimo metu [4]

Iš čia matyti, kad prasidėjus smūgiui jėgos ir deformacijos vertės didėja (suspaudimas), o smūgiui besibaigiant – jėgai artėjant prie 0, deformacijos reikšmė iš maksimalios δ_m kinta iki liekamosios δ_r (atsistatymas). Plotas, kurį apibrėžia šių dydžių kitimas yra lygus susidūrusių automobilių sistemos bendram standumui.



2 pav. Automobilių susidūrimo suspaudimo ir atsistatymo būvių iliustracija realiame automobilių smūgio teste [2]

Paveikslėlyje, padarytame iš realaus automobilių smūgio testo vaizdo medžiagos (2 pav.), pavaizduotas dviejų automobilių susidūrimas. Pirmame (viršutiniame) segmente pavaizduotas automobilių judėjimas prieš smūgį greičiais v_1 ir v_2 , antrame segmente automobiliai susiduria, vyksta suspaudimas kol pasiekama maksimali deformacijų vertė bei susidūrusių automobilių greičiai susilygina (greitis u). 3-iame segmente pavaizduotas deformacijų atsistatymas. Deformacijos iš maksimalios vertės nukrenta iki liekamosios, automobiliai pasiekia maksimalius, atskirus greičius po smūgio u_1 ir u_2 .

Svarbu apibrėžti smūgio jėgos pokytį per laiko vienetą t.y. smūgio jėgos impulsą [4]:

$$P = \int_0^t F dt = P_s + P_a \quad (1)$$

čia: P_s – jėgos impulsas suspaudimo metu, N/s; P_a – jėgos impulsas atsistatymo metu, N/s; t – smūgio trukmė, s; F – smūgio jėga, N.

Bendru atveju, santykis tarp P_a - jėgos impulso atsistatymo metu ir P_s - jėgos impulso suspaudimo metu, yra vadinamas atsistatymo koeficientu [4].

$$e = \frac{P_a}{P_s}; \quad (2)$$

Šis koeficientas yra vienas iš svarbiausių dydžių tiriant dviejų kūnų susidūrimą. Atsistatymo koeficiento reikšmė kinta nuo 0 (plastinis smūgis) iki 1 (elastinis smūgis) ir priklauso nuo susiduriančių kūnų greičių prieš smūgį, medžiagų savybių [4].

Atsistatymo koeficiento reikšmę ir svarbą apibūdina tyrimas, kai įvairiose sporto šakose naudojama atributika paleidžiama laisvai kristi iš tokio paties aukščio, vienodomis sąlygomis. Straipsnyje [1] tiriamas įvairių sporto šakų atributikos atsistatymo koeficientas:

- Golfo kamuoliukas;
- Stalo teniso kamuoliukas;
- Ledo ritulio rutulys;
- Kriketo rutulys.

Tyrimui atlikti buvo sukonstruotas specialus laikiklis, užtikrinantis vienodas kūnų paleidimo iš tam tikro aukščio sąlygas, naudota moderni stebėjimo įranga, taip sumažinant galimas paklaidas. Be to, objektai buvo paleidžiami iš skirtingų aukščių ant dviejų skirtingų (medienos ir metalo) platformų. Kiekvieno bandymo kombinacijai atlikta po 3 bandymus. Koeficientas apskaičiuojamas išmatavus greičius prieš smūgį ir po jo.

Net nežinodami, kas yra atsistatymo koeficientas, dauguma žmonių pritartų, kad iš vienodomis sąlygomis laisvai kristi paleistų minėtų objektų tarp „šokliausių“ būtų stalo teniso ir golfo kamuoliukai. Atlikus tyrimą gauti duomenys:

- Golfo kamuoliuko atsistatymo koeficiento vidurkis – 0,85;
- Stalo teniso kamuoliuko atsistatymo koeficiento vidurkis – 0,76;
- Ledo ritulio atsistatymo koeficiento vidurkis – 0,52;
- Kriketo rutulio atsistatymo koeficiento vidurkis – 0,48;

Šiame tyrime atsistatymo koeficientas buvo apskaičiuojamas naudojant greičių skirtumus prieš ir po smūgio:

$$e = \frac{v_2}{v_1} = \frac{(2gh_2)^{\frac{1}{2}}}{(2gh_1)^{\frac{1}{2}}} = \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^{\frac{1}{2}}; \quad (3)$$

čia: v_2 – kamuoliuko greitis po smūgio, m/s; v_1 – kamuoliuko greitis prieš smūgį, m/s; h_2 – aukštis, kuriame atsimušęs kamuoliukas sustojo, m; h_1 – aukštis iš kurio kamuoliukas buvo paleistas prieš smūgį, m.

Sekančio straipsnio autorius savo tyrime taikė prielaidą, sudarytą iš atliktų realių smūgio testų surinktos informacijos, kad automobilių susidūrimuose daugeliu atveju, atsistatymo koeficientas patenka į intervalą $e=(0,1; 0,3)$ [3]. Autoriaus tyrimą sudarė dviejų automobilių autoįvykio rekonstrukcija. Žinant susidūrusių transporto priemonių vietą joms sustojus po smūgio bei atstumą, kurį automobiliai nuvažiavo nuo smūgio pradžios iki sustojimo, įvertinant jų mases, važiavimo

kryptis, besikeičiantį trinties koeficientą dėl stabdymo, suskaičiuojami jų greičiai prieš smūgį. Skaičiavimai pradedami sudarant eismo įvykio eskizą, sužymimi dydžiai, kuriuos galima išsimatuoti eismo įvykio vietoje, apskaičiuojami judėjimo kampai, energija, kuri sunaudojama automobilių slydimui bei svorio centro judėjimo krypties pasikeitimui. Galiausiai apskaičiuojama minėtų dydžių priklausomybė nuo transporto priemonių važiavimo greičių prieš smūgį. Gauti rezultatai buvo lyginami su žinomais šio eismo įvykio susidūrimo greičiais, paklaidos svyravo iki 10 %.

Nemažai tyrimų atliekama ne iš duomenų, kuriuos galima gauti eismo įvykiui jau įvykus, bet siekiant sužinoti kaip įvairių parametrų prieš smūgį keitimas galimai darytų įtaką automobilių elgsenai po smūgio. Būtent tai nagrinėjama straipsnyje [4]. Straipsnio autoriai skaičiavimus taikė tam, kad būtų galima atkurti galimas eismo įvykio sąlygas prieš įvykstant susidūrimui. Straipsnyje analizuojamas jėgų ir greičių, atsirandančių automobiliui susidūrus su nejudančia kliūtimi, modelis. Modelis sudaromas įvertinant automobilio masę, standumą, greičių pokyčius. Tyrimas supaprastintas pritaikius dvi prielaidas – judantis, smūgį priimančias automobilis pakeistas į nejudančią kliūtį, o vykstant automobilio susidūrimui su šia kliūtimi, perduodama pastovi energija. Dėl to automobilio atsimušimo nuo kliūties greitis gaunamas pastovus, t. y. greitis nuo suspaudimo pabaigos iki visiško sustojimo išlieka pastovus.

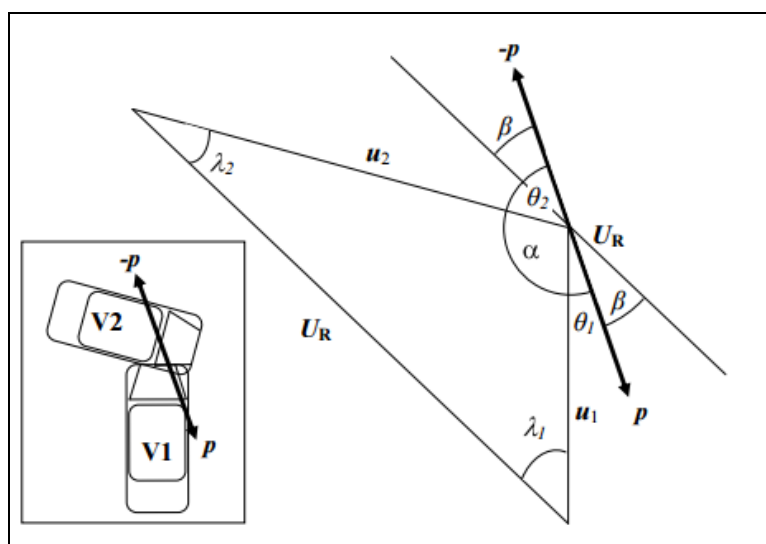
Kartais tyrimai, susiję su automobilių susidūrimais, supaprastinami vieną iš automobilių pakeičiant nejudančia kliūtimi [5]. Tais atvejais, kai tiriamas automobilio susidūrimas su nejudančia kliūtimi, šios kliūties greitis prieš smūgį ir po jo išlieka toks pat – 0. Dėl to skaičiavimuose įvedama ekvivalentinių dydžių, o naudojamą bendrą atsistatymo koeficientą sudaro tik automobilio atsistatymo koeficientas. Straipsnyje [5] bandoma apskaičiuoti bendrą dviejų susiduriančių automobilių atsistatymo koeficientą, kad būtų galima tiksliau apskaičiuoti kitus dydžius. Taigi, tirtas bendras atsistatymo koeficientas įvykus dviejų lygiagrečiai judančių automobilių, kurių ašys sutampa, susidūrimui. Skaičiavimai atliekami taikant išvestines formules – tam buvo naudojami Niutono, energijos tvermės bei jėgos impulso dėsniai. Gauti rezultatai lyginami su kitų autorių atliktais realiais tokio pobūdžio tyrimais. Bendras susidūrimo atsistatymo koeficientas skaičiuojamas dviem modeliais: vienas jų – remiantis automobilių greičiais ir masėmis, o kitas – automobilių standumais bei deformacijomis. Tyrimo autoriai padarė tokias išvadas:

- Skaičiavimai remiantis automobilių standumais ir deformacijomis yra tikslesni nei skaičiavimai remiantis automobilių masėmis bei greičiais;
- Skaičiavimais gautos reikšmės nuo realių matavimų skiriasi minimaliai, jei žinoma informacija iš realiai atliktų testų apie automobilių standumą;
- Suformuotus matematinius modelius galima panaudoti realiems automobilių eismo įvykiams atkurti.

Vykstant automobilių susidūrimui, norint gauti kuo tikslesnius duomenis, reikia įvertinti daug parametrų. Būtent tai buvo bandoma padaryti straipsnyje [6], kuriame nagrinėjamas automobilių

susidūrimas esant santykinai nedideliems greičiams (<50kmh). Tai reiškia, kad tiriamas vieno automobilio įvažiavimas priekiu į kito automobilio galą kai skirtumas tarp automobilių judėjimo greičių būtų nedidesnis nei jų pačių judėjimo greitis. Skaičiavimuose įvertinamas automobilių standumas, slopinimas, smūgio trukmė, atsistatymo koeficientas. Dalis nežinomųjų skaičiavimuose panaudota iš kitų autorių atliktų realių automobilių smūgio testų. Šio tyrimo autoriai smūgio trukmę nustatė apskaičiavę vidurkį iš daugiau nei 30 įvairių realių automobilių smūgio testų. Gauta vidutinė vertė (kuri vėliau buvo naudojama jų skaičiavimuose) $t = 1.33$ s, o šios reikšmės vidurkio nuokrypis – $s_t = 0,031$ s. Atliekama daug skaičiavimų bei pateikiama grafikų, kaip kinta smūgį atliekančio ir smūgį priimančio automobilio greičiai po kontakto, rezultatai lyginami su realiais testais. Kadangi vertinama žymiai daugiau dydžių nei iki šiol analizuotuose straipsniuose, taikoma daugiau prielaidų, kurios sumažina skaičiavimų tikslumą.

Iki šiol visų analizuotų straipsnių skaičiavimuose automobilių smūgio dinamika tiriama taikant prielaidą, kad dviejų susiduriančių automobilių ašys yra vienoje tiesėje arba statmenos. Straipsnyje [7] tiriamas automobilių susidūrimas jų judėjimo kryptims kintant įvairiais kampais. Dėl to skaičiavimuose įvedama daug automobilių judėjimo kryptį apibrėžiančių dydžių (3 pav.)



3 pav. Papildomi dydžiai naudojami automobilių susidūrimo skaičiavimuose kai automobiliai juda nelygiagrečiai [7]

Šiame straipsnyje priimamos trys prielaidos, kurios supaprastina skaičiavimus:

- Padangų ir kitos išorinės jėgos smūgio metu nevertinamos;
- Automobilių masės ir inercijos momentai smūgio metu nesikeičia t.y. smūgio sukeltos deformacijos nepakeičia automobilių inercijos momentų, o masė nekinta nuo galimai smūgio metu atsiskyrusių automobilio komponentų;
- Nuo smūgio trukmės priklausantis jėgos impulsas vertinamas kaip vienintelė apkrova veikianti šiame modelyje.

Šiame tyrime pateikiama labai svarbios informacijos skaičiuojant automobilių dinamiką jiems judant įvairiomis kryptimis, tačiau nemažai nežinomųjų apskaičiuojama ne iš formulių. Tyrimo autoriai naudojo įvairių kompiuterinių programų šablonus, į kuriuos įvedus žinomus dydžius, programa apskaičiuoja reikiamus dydžius.

Nagrinėtas straipsnis [8] išsiskiria savo išsamumu. Tyrimas atliktas dviem būdais – atliekant realų automobilio smūgio testą su nejudama kliūtimi bei analogiškam scenarijui taikant matematinius skaičiavimus. Realaus testo metu surinkta kaip įmanoma daugiau informacijos apie automobilį prieš smūgį, jo judėjimą, klūtį bei išvardintus objektus ir dydžius po smūgio. Tyrimo tikslas yra atlikus realų smūgio testą skaičiavimus “priversti” prie gautų rezultatų, kadangi realūs smūgio testai yra brangūs, juos atlikti užtrunka daug laiko, reikia daug vietos bei įrangos. Atlikus tyrimą, pagrindinė autorius išvada buvo ta, kad skaičiavimų netikslumams didžiausią įtaką darė užsiduotas automobilio standumas. Skaičiavimuose naudojamas bendras automobilio standumas, o realiu atveju visi automobilio komponentai turi savo atskirą standumą ir priklausomai nuo deformavimo lygio gali daryti arba nedaryti įtakos bendram automobilio standumui.

Kaip buvo minėta įvade, kompiuterinės programos, skirtos automobilių susidūrimams analizuoti dėl savo kainos eiliniam vartotojui yra sunkiai prieinamos. Straipsnyje [9] tirtas automobilių susidūrimas naudojant kompiuterinę programą “PC-Crash”. Visų pirmą autorius pateikė visus su šia programa galimus tyrimų būdus bei skaičiavimams įtaką darančius veiksnius – atsistatymo koeficientas, susidūrimo plokštuma, susidūrimo taškas, trintis. Be to, išanalizavo 2 pagrindinius skaičiavimo su šia programa modelius – modelis pagrįstas automobilių inercija ir modelis pagrįstas automobilių standumu. Išbandęs abu modelius, straipsnio autorius pateikia išvadas ir rekomendacijas potencialiems šios programos naudotojams.

Atlikus panašių mokslinių straipsnių analizę surinkta nemažai metodinės medžiagos norimiems skaičiavimams atlikti. Visi analizuoti straipsniai, kuriuose atliekami skaičiavimai nenaudojant kompiuterinių programų atlikti priimant sąlygą, kad du susiduriančios automobiliai juda tiesiai bendra ašimi. Realybėje toks susidūrimas gana retas, tačiau tyrimuose, kuriuose nagrinėjamas kitoks susiduriančių automobilių judėjimas, neapsieinama be papildomų kompiuterinių programų.

2. DVIEJŲ AUTOMOBILIŲ SUSIDŪRIMO DINAMIKOS TYRIMO METODOLOGINĖ DALIS

2.1. Greičių po smūgio ir jėgos impulso skaičiavimai

Šiame skyriuje formulės išreiškiamos taip, kad jas būtų galima apskaičiuoti iš pradinių užsaiduotų dydžių – greičių prieš smūgį, masių bei bendrų standumų. Sakykime, kad prieš smūgį, du automobiliai atitinkamai juda greičiais v_1 ir v_2 . Suspaudimo pabaigoje prieš prasidedant atsistatymui, automobilių greičiai susilygina – u , o greičiai po smūgio atitinkamai yra u_1 bei u_2 (4 pav.). Susidūrimo metu automobilių judėjimo lygtys išvedamos iš 2-ojo bei 3-iojo Niutono dėsnų (5 pav.). Taikant šiuos dėsnius, išvedamos automobilių judesio lygtys [5]:

$$m_1 \frac{dv_1}{dt} = -F \quad \text{ir} \quad m_2 \frac{dv_2}{dt} = F ; \quad (1)$$

čia: m_1 ir m_2 – automobilių masės, kg; F – kontakto jėga, N.

Suspaudimas baigiasi, kai abiejų automobilių greičiai susilygina [5]:

$$m_1(u - v_1) = -P_s \quad \text{ir} \quad m_2(u - v_2) = P_s ; \quad (2)$$

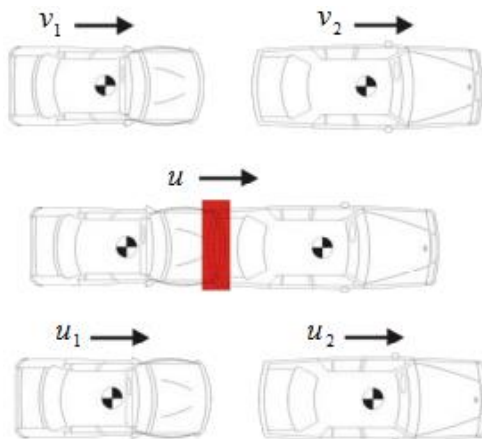
čia: $P_s = \int_0^{t_s} F dt$ – suspaudimo jėgos impulsas, N/s; t_s – suspaudimo trukmė, s.

Iš formulių (2) gauname:

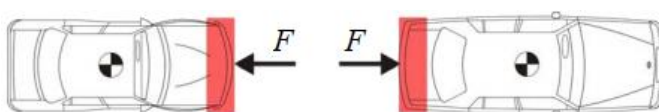
$$u = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2} . \quad (3)$$

Suspaudimo jėgos impulsas:

$$P_s = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} (v_1 - v_2) . \quad (4)$$



4 pav. Automobilių judėjimas prieš ir po smūgio [5]



5 pav. 3-iojo Niutono dėsnio pritaikymas automobilių susidūrimė, kai automobiliai juda ta pačia kryptimi ir jų ašys yra vienoje tiesėje [5]

Nagrinėjant automobilio susidūrimą su nejudama kliūtimi – v_1 arba v_2 turi būti lygus 0.

Atsistatymo metu tamprioji vidinės energijos dalis yra išlaisvinama. Judesio lygtys atsistatymo metu [5]:

$$m_1(u_1 - u) = -P_a \quad \text{ir} \quad m_2(u_2 - u) = P_a; \quad (5)$$

čia: $P_a = \int_0^{t_a} F dt$ – atsistatymo jėgos impulsas, N/s; t_a – atsistatymo trukmė, s.

Norint apskaičiuoti u_1 ir u_2 reikalinga papildoma lygtis. Pagal Puasono hipotezę suspaudimo jėgos impulsas yra proporcingas atsistatymo jėgos impulsui [4]:

$$P_a = e P_s; \quad (6)$$

čia e – atstatymo koeficientas.

Iš lygties (6) seka, kad $e \geq 0$. Be to, atsistatymo koeficientui apskaičiuoti galime taip pat naudoti Niutono kinematinį apibūdinimą [4]:

$$e = \frac{u_2 - u_1}{v_1 - v_2}. \quad (7)$$

Bendras jėgos impulsas $P = P_a + P_s$. Taikant (4) ir (6) formules gauname:

$$P = (1 + e) \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \Delta v; \quad (8)$$

čia: $\Delta v = v_1 - v_2$.

Į (5) formulę įstatę P_a ir P_s išraiškas (atitinkamai (6) ir (4) formulės) galime apskaičiuoti automobilių greičius po smūgio:

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= u - e \frac{m_2}{m_1 + m_2} \Delta v = v_1 - \frac{(1+e)m_2}{m_1 + m_2} \Delta v; \\ u_2 &= u + e \frac{m_1}{m_1 + m_2} \Delta v = v_2 + \frac{(1+e)m_1}{m_1 + m_2} \Delta v. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Naudojant (8) galime apskaičiuoti bendrą smūgio jėgos impulsą, o naudojant (9) galime apskaičiuoti automobilių greičius po smūgio. Tam atlikti, reikia žinoti automobilių masės, automobilių greičius prieš smūgį ir atsistatymo koeficientą.

2.2. Atsistatymo koeficiento, deformavimo energijos, deformacijų skaičiavimas bei standumo įvertinimas

Viename iš analizuotų straipsnių skaičiavimuose buvo taikoma prielaida, kad atsistatymo koeficiento reikšmė automobilių susidūrimo dauguma atvejų patenka į intervalą nuo 0,1 iki 0,3 [3]. Šis reikšmių intervalas nustatytas eksperimentiškai remiantis kitų autorių atliktais realiais automobilių susidūrimo tyrimais. Skaičiavimus galime patikslinti apskaičiuavę individualius automobilių atsistatymo koeficientus bei bendrą atsistatymo koeficientą, papildomai įvertinant automobilių standumus bei smūgio metu atsirandančias deformacijas [4].

Smūgio metu kinetinė energija yra išskaidoma. Pritaikius energijos tvermės dėsnį, pasibaigus automobilių deformacijai dėl smūgio gauname [4]:

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} = \frac{(m_1 + m_2) u^2}{2} + \Delta E_m; \quad (10)$$

čia: ΔE_m - automobilių deformacijai sunaudota energija, J. Į lygtį (10) įstačius (3) gauname:

$$\Delta E_m = \frac{1}{2} \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \Delta v^2; \quad (11)$$

Pritaikę šį metodą visam susidūrimo procesui gauname:

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} = \frac{m_1 u_1^2}{2} + \frac{m_2 u_2^2}{2} + \Delta E; \quad (12)$$

Iš [4] žinome, kad visa prarasta kinetinė energija:

$$\Delta E = \frac{1}{2} (1 - e^2) \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \Delta v^2 \quad (13)$$

Iš termodinamikos žinoma, kad energijos pokytis negali būti neigiamas – $\Delta E \geq 0$ ir kaip buvo minėta anksčiau, atsistatymo koeficientas kinta intervale $0 \leq e \leq 1$. Iš (10) ir (13) matoma, kad $\Delta E = (1 - e^2)\Delta E_m$, taigi bendras susiduriančių automobilių atsistatymo koeficientas:

$$e = \sqrt{1 - \frac{\Delta E}{\Delta E_m}} = \sqrt{\frac{\Delta E_0}{\Delta E_m}}; \quad (14)$$

čia: $\Delta E_0 = \Delta E_m - \Delta E$ - atsistatymui sunaudota energija, J.

Individualūs automobilių atsistatymo koeficientai e_1 ir e_2 reikalingi tam, kad būtų galima tiksliau apskaičiuoti bendrą atsistatymo koeficientą. Jiems apskaičiuoti į skaičiavimus reikia įvesti papildomus dydžius – ekvivalentinius automobilių greičius v_{T1} ir v_{T2} [5]. Šie greičiai yra lygūs atitinkamai pirmojo ir antrojo automobilių greičiams prieš smūgį su nejudama kliūtimi ir yra ekvivalentiški tų pačių automobilių greičiams prieš smūgį susiduriant vienas su kitu.

Šie greičiai užrašomi taip, kad tenkintų automobilių deformacijai sunaudotos energijos lygybę [5]:

$$\Delta E_m = \frac{m_1 v_{T1}^2}{2} + \frac{m_2 v_{T2}^2}{2}; \quad (15)$$

Lygybė atsistatymo energijai [5]:

$$\Delta E_0 = \frac{m_1 e_1^2 v_{T1}^2}{2} + \frac{m_2 e_2^2 v_{T2}^2}{2}; \quad (16)$$

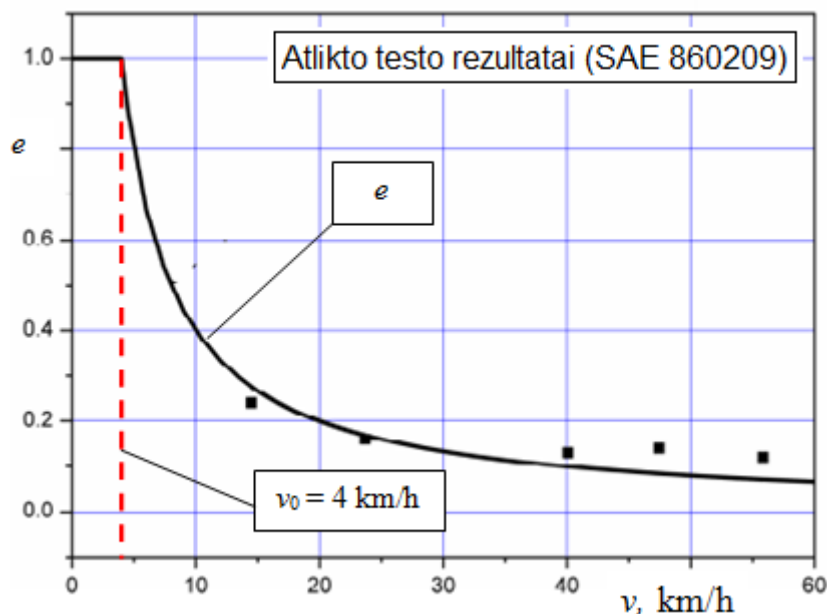
Į lygtį (14) įstatę (15) bei (16) gauname bendrą atsistatymo koeficientą:

$$e = \sqrt{\frac{m_1 e_1^2 v_{T1}^2 + m_2 e_2^2 v_{T2}^2}{m_1 v_{T1}^2 + m_2 v_{T2}^2}}; \quad (17)$$

Atskiri pirmojo ir antrojo automobilių atsistatymo koeficientai atitinkamai apskaičiuojami sekančiai [5]:

$$e_1 = \min\left(1; \frac{v_{01}}{v_{T1}}\right) \quad \text{ir} \quad e_2 = \min\left(1; \frac{v_{02}}{v_{T2}}\right) \quad (18)$$

čia: v_{01} ir v_{02} - ribinis susidūrimo greitis, kuomet deformacija yra visiškai atstatoma (liekamųjų deformacijų nėra), km/h. Eksperimentiškai nustatyta, kad ribinis susidūrimo greitis yra lygus 4 km/h [4]. Šis dydis grafiškai pavaizduotas 3-iajame paveikslėlyje.



6 pav. Atsistatymo koeficiento priklausomybė nuo greičio prieš smūgį [4]

Iš grafiko (6 pav.) matome, kad esant nedideliam greičiui prieš smūgį (iki 4 km/h) atsistatymo koeficientas lygus 1. Ši prielaida taikyta ir kituose nagrinėtuose straipsniuose [4, 5, 7]. Jai paaiškinti pateikiamas realaus susidūrimo pavyzdys kai esant nedideliam greičiui (iki minėtų 4 km/h) automobiliui atsitrenkus į kliūtį, deformuojamas tik jo buferis, o smūgiui pasibaigus deformacija visiškai atsistato.

Sekantis žingsnis – nustatyti ekvivalentinius automobilių greičius v_{T1} ir v_{T2} greičius, kad būtų tenkinama (15) lygtis.

Kaip buvo minėta, v_{T1} yra pirmojo automobilio ekvivalentinis greitis, v_{T2} - analogiškai antrojo automobilio ekvivalentinis greitis prieš smūgį. Šie greičiai tam pačiam smūgiui turi tenkinti sekančias lygybes [5]:

$$\frac{m_1 v_{T1}^2}{2} = \frac{k_1 \delta_{m1}^2}{2} \quad \text{ir} \quad \frac{m_2 v_{T2}^2}{2} = \frac{k_2 \delta_{m2}^2}{2}; \quad (19)$$

čia: k_1 ir k_2 atitinkamai pirmojo ir antrojo automobilių standumai, kN/m; δ_{m1} ir δ_{m2} - maksimalios susidūrimo metu atsiradusios pirmojo ir antrojo automobilių deformacijos, mm.

Iš (19) lygties:

$$v_{T1} = \sqrt{\frac{k_1}{m_1}} \delta_{m1} \quad \text{ir} \quad v_{T2} = \sqrt{\frac{k_2}{m_2}} \delta_{m2}. \quad (20)$$

Iš (15) ir (19) gauname:

$$\Delta E_m = \frac{1}{2} \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \Delta v^2 = \frac{k_1 \delta_{m1}^2}{2} + \frac{k_2 \delta_{m2}^2}{2}. \quad (21)$$

Bendra automobilių maksimali deformacija $\delta_m = \delta_{m1} + \delta_{m2}$, įvertinant trečiąjį Niutono dėsnį – $k_1\delta_{m1} = k_2\delta_{m2}$, gauname [5]:

$$\delta_{m1} = \frac{k_2}{k_1 + k_2} \delta_m \quad \text{ir} \quad \delta_{m2} = \frac{k_1}{k_1 + k_2} \delta_m. \quad (22)$$

Į (22) įstatę (21) gauname:

$$\Delta E_m = \frac{m\Delta v^2}{2} = \frac{k\delta_m^2}{2}; \quad (23)$$

čia: m – dviejų susiduriančių automobilių sistemos masė, kg; k – sistemos standumas, kN/m.

Šie dydžiai apskaičiuojami [4]:

$$m = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}, \quad k = \frac{k_1 k_2}{k_1 + k_2}. \quad (24)$$

Iš (23) turime $\delta_m = \sqrt{\frac{m}{k}} |\Delta v|$. Įstate tai į (20) gauname reikiamus ekvivalentinius automobilių greičius prieš smūgį:

$$v_{T1} = \sqrt{\frac{k}{k_1} \frac{m}{m_1}} |\Delta v|, \quad v_{T2} = \sqrt{\frac{k}{k_2} \frac{m}{m_2}} |\Delta v|. \quad (25)$$

Lygtis (25) ir (15) įstatę į (17) galime apskaičiuoti bendrą susiduriančių automobilių atsistatymo koeficientą:

$$e = \sqrt{\frac{k_2 e_1^2 + k_1 e_2^2}{k_1 + k_2}}; \quad (26)$$

Ši formulė (26) laikoma pagrindine, susiejant bendrą atsistatymo koeficientą su individualiais automobilių atsistatymo koeficientais gaunamais iš smūgio su nejudama kliūtimi skaičiavimų [5].

Žinant automobilių standumus ir mases (3.1 lentelė) bei skirtumą tarp automobilių greičių prieš smūgį Δv , galime apskaičiuoti ekvivalentinius pirmojo ir antrojo automobilių susidūrimo su nejudama kliūtimi greičius v_{T1} ir v_{T2} (25), automobilių atskirus atsistatymo koeficientus e_1 ir e_2 (18), bendrą susidūrimo atsistatymo koeficientą e (26), bendrą automobilių greitį jiems susidūrus u bei jų greičius po susidūrimo u_1 ir u_2 (9).

Skaičiavimams naudojami įvairių automobilių masės bei standumai [6]

Markė	Modelis	Pagaminimo metai	Masė, kg	Bendras standumas, kN/m
Audi	A4	1996	1763	2319.8
Audi	A4	2002	1820	2640.1
BMW	325i	2002	1731	1496.8
BMW	X5	2003	2400	1716.3
BMW	Z4	2003	1630	1233
Toyota	Corolla	2003	1350	1595.7
VW	Beetle	1999	1573	1447.2

2.3. Automobilių susidūrimo jėgos bei smūgio trukmės skaičiavimai

Norint apskaičiuoti automobilių susidūrimo metu vykstančio smūgio trukmę, reikia prisiminti 2.1. poskyryje pateiktas smūgio impulso išraiškas:

$$P_s = \int_0^{t_s} F dt, \quad (27)$$

$$P_s = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} (v_1 - v_2), \quad (28)$$

$$P_a = \int_0^{t_a} F dt, \quad (29)$$

$$P_a = e P_s, \quad (30)$$

$$P = P_a + P_s, \quad (31)$$

$$P = (1 + e) \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \Delta v. \quad (32)$$

Čia pateikta bendra suspaudimo (27), atsistatymo (29), suminė (31) jėgos impulso formulės bei atitinkamai išvestinės jų reikšmės (28), (30), (32). Naudojant išvestines formules, iš 3.1. ir 3.2. poskyriuose pateiktos metodikos, galime apskaičiuoti reikiamus smūgio jėgos impulsus, o apskaičiavę jėgą, kuri atsiranda susidūrus automobiliams, galime apskaičiuoti smūgio trukmę.

Susidūrimo jėga apskaičiuojama per kinetinės energijos ir dėl smūgio įvykusios deformacijos sąryšį. Pagal šią metodiką, bendru atveju, judantis automobilis į kliūtį atsitrenkia jėga, kuri yra lygi to automobilio kinetinės energijos bei atstumo, per kurį atsitrenkęs automobilis sustoja arba pasiekia tam tikrą greitį, santykiui [11]:

$$F = \frac{E_k}{\delta} \quad (33)$$

čia: F – susidūrimo jėga, N; E_k – kinetinė energija, J; δ – atstumas, per kurį atsitrenkęs automobilis sustoja arba pasiekia tam tikrą greitį, m.

2.3.1. Suspaudimo trukmės skaičiavimas

Lygtį (33) galime pritaikyti tiriamam automobilių susidūrimui naudojant jau išsireikštus dydžius. Šiuo atveju kinetinė energija yra lygi automobilius deformuoti sunaudotai energijai (11), o bendra susidūrusių automobilių deformacija gaunama iš lygties (23).

$$\delta_m = \sqrt{\frac{m}{k}} |\Delta v| \quad (34)$$

čia: m – sistemos masė, kg; k – sistemos standumas, kN/m.

Šie dydžiai žinomi iš formules (24), o $\Delta v = v_1 - v_2$ – greičių tarp pirmojo ir antrojo automobilių skirtumas, km/h.

Įstatę (11) ir (34) į (33) gauname lygtį jėgai, kuria automobilis atsitrenkia į kitą automobilį, apskaičiuoti (35). Formulės išskaidomos taip, kad jose galėtume įstatyti pirminius užsiduodamus dydžius (automobilių mases m_1 m_2 , standumus k_1 k_2 bei greičius prieš smūgį v_1 v_2):

$$F_m = \frac{E_k}{\delta} = \frac{\Delta E_m}{\delta_m} = \frac{\frac{1}{2} \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \Delta v^2}{\sqrt{\frac{m}{k}} |\Delta v|} = \frac{m_1 m_2 \cdot \Delta v^2}{\left(\sqrt{\frac{\frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}}{k_1 k_2}} |\Delta v| \right) \cdot (2m_1 + m_2)} \quad (35)$$

čia: m_1/m_2 – automobilių masės, kg; v_1/v_2 – automobilių greičiai prieš smūgį, km/h, k_1/k_2 – automobilių standumai, kN/m; m – sistemos masė, k – sistemos standumas.

Iš (28) apskaičiavę suspaudimo jėgos impulsą, o iš (35) – susidūrimo suspaudimo metu atsirandančią jėgą, iš (27) galime apskaičiuoti suspaudimo metu vykstančią automobilių deformacijos trukmę:

$$\begin{aligned}
t_s &= \frac{P_s}{F_m} = \frac{\frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} (v_1 - v_2)}{m_1 m_2 \cdot \Delta v^2} = \\
&= \frac{\left(\sqrt{\frac{\frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}}{\frac{k_1 k_2}{k_1 + k_2}}} |\Delta v| \right) \cdot (2m_1 + m_2)}{\left(\sqrt{\frac{\frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}}{\frac{k_1 k_2}{k_1 + k_2}}} |\Delta v| \right) \cdot (2m_1 + m_2) (m_1 m_2) (v_1 - v_2)} \\
&= \frac{(m_1 m_2 \cdot \Delta v^2) \cdot (m_1 + m_2)}{(m_1 m_2 \cdot \Delta v^2) \cdot (m_1 + m_2)} .
\end{aligned} \tag{36}$$

2.3.2. Atsistatymo trukmės skaičiavimas

Tokiu pat principu galime apskaičiuoti ir automobilių susidūrimo metu vykstančio atsistatymo trukmę. Visų pirma, reikia prisiminti atsistatymui sunaudojamos energijos formulę. Iš (10) ir (13) gauname suminės susidūrimui sunaudotos energijos formulę:

$$\Delta E = (1 - e^2) \Delta E_m . \tag{37}$$

Iš (14) išsireiškę atsistatymui sunaudotą energija gauname:

$$\Delta E_0 = \Delta E_m - \Delta E . \tag{38}$$

I (38) įstatę (37) turime atsistatymui sunaudotos energijos formulę:

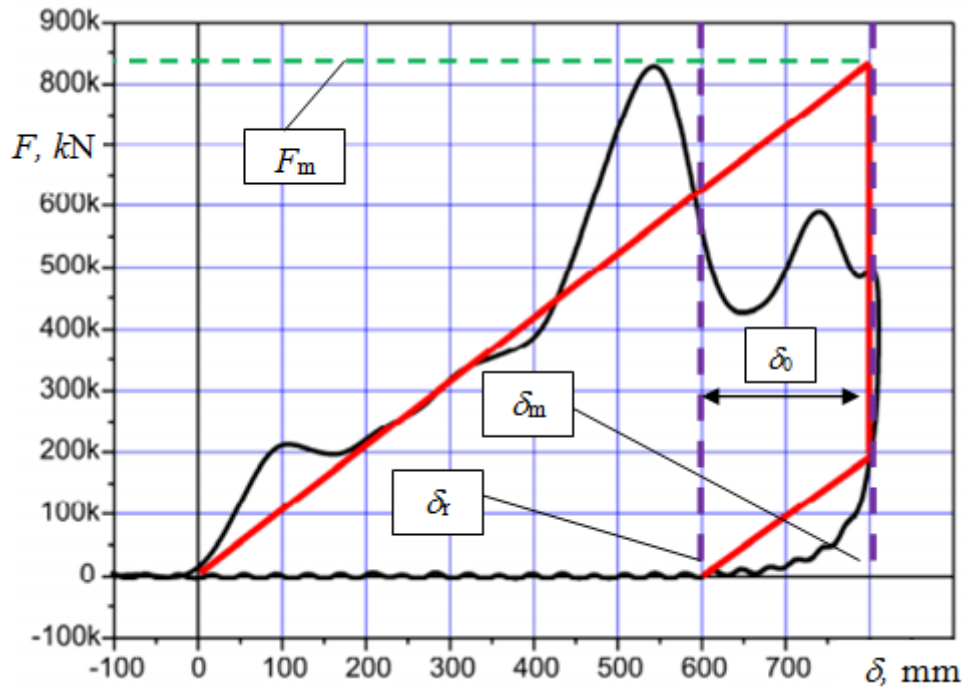
$$\Delta E_0 = \Delta E_m - (1 - e^2) \Delta E_m . \tag{38}$$

čia: ΔE_m - automobilių deformacijai sunaudota energija, J.

Dabar reikia apskaičiuoti automobilių deformaciją atsistatymo metu. Iš [4] žinome, kad liekamoji automobilio deformacija apskaičiuojama:

$$\delta_r = \delta_m - \delta_0 ; \tag{39}$$

čia: δ_r - liekamoji deformacija, m; δ_m - maksimali susidūrimo deformacija, m; δ_0 - astatomoji deformacija, m. Šios deformacijos iliustruotos 7-ame paveikslėlyje.



7 pav. Deformacijų priklausomybė nuo smūgio metu veikiančios jėgos [4]

Atstatomoji deformacija apskaičiuojama pagal formulę [4]:

$$\delta_0 = v_0 \sqrt{\frac{m}{k}}; \quad (40)$$

čia: v_0 - ribinis susidūrimo greitis, kuomet deformacija yra visiškai atstatoma (liekamųjų deformacijų nėra), km/h.

Taigi gauname, kad atstatomoji deformacija dviejų automobilių susidūrime:

$$\delta_0 = \delta_{01} + \delta_{02} = v_0 \left(\sqrt{\frac{m_1}{k_1}} + \sqrt{\frac{m_2}{k_2}} \right). \quad (41)$$

Į lygtį (33) įstatę (38), (15) ir (42) gauname jėgą, kuri veikia automobilius vykstant jų deformacijų atsistatymui:

$$F_a = \frac{E_k}{\delta} = \frac{\Delta E_0}{\delta_0} = \frac{\Delta E_m - (1 - e^2) \Delta E_m}{v_0 \left(\sqrt{\frac{m_1}{k_1}} + \sqrt{\frac{m_2}{k_2}} \right)} = \frac{\left(\frac{1}{2} \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \Delta v^2 \right) - (1 - e^2) \left(\frac{1}{2} \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \Delta v^2 \right)}{v_0 \left(\sqrt{\frac{m_1}{k_1}} + \sqrt{\frac{m_2}{k_2}} \right)}. \quad (42)$$

Iš lygties (29) išsireiškus atsistatymo trukmę bei įstatę (30) ir (42) formules gauname deformacijų atsistatymo trukmę:

$$\begin{aligned}
 t_a &= \frac{P_a}{F_a} = \frac{e P_s}{\left(\frac{1}{2} \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \Delta v^2 \right) - \left(1 - e^2 \right) \left(\frac{1}{2} \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \Delta v^2 \right)}{v_0 \left(\sqrt{\frac{m_1}{k_1}} + \sqrt{\frac{m_2}{k_2}} \right)} = \\
 &= \frac{e \left(\frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} (v_1 - v_2) \right)}{\left(\frac{1}{2} \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \Delta v^2 \right) - \left(1 - e^2 \right) \left(\frac{1}{2} \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \Delta v^2 \right)}{v_0 \left(\sqrt{\frac{m_1}{k_1}} + \sqrt{\frac{m_2}{k_2}} \right)} = \\
 &= \frac{\left(e \left(\frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} (v_1 - v_2) \right) \right) \cdot \left(v_0 \left(\sqrt{\frac{m_1}{k_1}} + \sqrt{\frac{m_2}{k_2}} \right) \right)}{\left(\frac{1}{2} \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \Delta v^2 \right) - \left(1 - e^2 \right) \left(\frac{1}{2} \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \Delta v^2 \right)} \quad (43)
 \end{aligned}$$

Suminė dviejų susiduriančių automobilių smūgio trukmė:

$$t = t_a + t_s \quad (44)$$

2.4. Automobilių susidūrimo metu atsirandančių pagreičių skaičiavimas

Apskaičiuavę kiek laiko trunka smūgis bei du jo būviai (suspaudimas ir atsistatymas), galime apskaičiuoti su koku pagreičiu auomobiliai greitėja ar lėtėja jiems susiduriant. Formulė pagreičiui apskaičiuoti, žinant pradinį ir galutinį greitį žinoma iš kinematikos pagrindų [13]:

$$v = v_0 + at \quad ; \quad (45)$$

$$a = \frac{v - v_0}{t} \quad ; \quad (46)$$

čia: v_0 – pradinis greitis, km/h, v – galutinis greitis, km/h, t – laiko tarpas, per kurį greičio reikšmė pakinta nuo v_0 iki v , s.

2.4.1. Automobilių pagreičiai suspaudimo metu

2-ame paveikslėlyje pavaizduota dviejų susiduriančių automobilių greičių pokyčiai. Pirmiausia tiriama susidūrusių automobilių pagreitis, atsiradęs nuo pradinio automobilių greičio (greičiai prieš smūgį – v_1, v_2) iki momento kai automobiliai yra maksimaliai deformuoti ir jų greičiai susilygina (bendras greitis u) (8 pav.). Į formulę (46) įstatę dydžius pagal 8-ąjį paveikslėlį gauname atitinkamai pirmojo ir antrojo automobilių pagreičius, atsirandančius nuo smūgio pradžios iki maksimalios deformacijos pasiekimo:

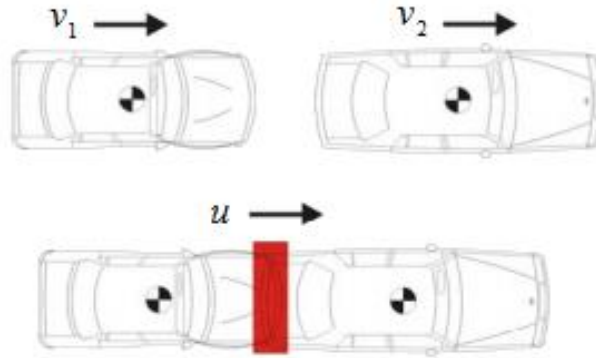
$$a_{s1} = \frac{u - v_1}{t_s}; \quad (47)$$

$$a_{s2} = \frac{u - v_2}{t_s}. \quad (48)$$

Į (47) ir (48) įstatę suspaudimo būvio trukmę (36), gauname galutines išraiškas automobilių pagreičiams apskaičiuoti:

$$a_{s1} = \frac{u - v_1}{\left(\sqrt{\frac{\frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}}{k_1 k_2}} |\Delta v| \right) \cdot (2m_1 + m_2)(m_1 - m_2)(v_1 - v_2)} = \frac{(u - v_1)(m_1 m_2 \cdot \Delta v^2) \cdot (m_1 + m_2)}{\left(\sqrt{\frac{\frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}}{k_1 k_2}} |\Delta v| \right) \cdot (2m_1 + m_2)(m_1 - m_2)(v_1 - v_2)}; \quad (49)$$

$$\begin{aligned}
 a_{s2} &= \frac{u - v_2}{\left(\sqrt{\frac{m_1 m_2}{k_1 k_2}} \frac{m_1 + m_2}{k_1 + k_2} |\Delta v| \cdot (2m_1 + m_2)(m_1 m_2)(v_1 - v_2) \right)} = \\
 &= \frac{(u - v_2)(m_1 m_2 \cdot \Delta v^2) \cdot (m_1 + m_2)}{\left(\sqrt{\frac{m_1 m_2}{k_1 k_2}} \frac{m_1 + m_2}{k_1 + k_2} |\Delta v| \cdot (2m_1 + m_2)(m_1 m_2)(v_1 - v_2) \right)}. \quad (50)
 \end{aligned}$$



8 pav. Automobilių greičių iliustracija suspaudimo metu [4]

2.4.2. Automobilių pagreičiai atsistatymo metu

Sekantis žingsnis – pagreičio tyrimas smūgio atsistatymo metu (9 pav.). Šiuo atveju pradinis automobilių greitis yra jų bendras greitis u , atsirandantis maksimalios deformacijos metu, o galutinis greitis – jų maksimalus greitis įvykus atsistatymui – u_1 ir u_2 . Šiuos greičius įstatę į (46) gauname:

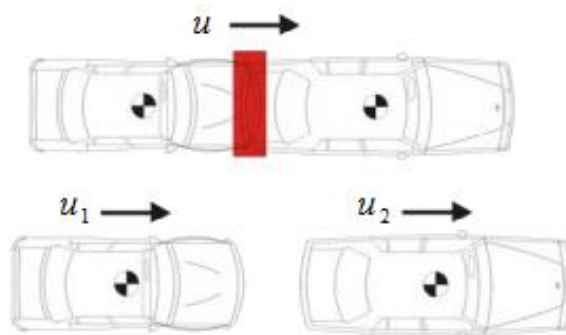
$$a_{a1} = \frac{u_1 - u}{t_a}; \quad (51)$$

$$a_{a2} = \frac{u_2 - u}{t_a}. \quad (52)$$

Į (51) ir (52) įstatę atsistatymo būvio trukmę (43) gauname galutines išraiškas automobilių pagreičiams atsistatymo metu apskaičiuoti:

$$\begin{aligned}
a_{a1} &= \frac{u_1 - u}{\left(e \left(\frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} (v_1 - v_2) \right) \right) \cdot \left(v_0 \left(\sqrt{\frac{m_1}{k_1}} + \sqrt{\frac{m_2}{k_2}} \right) \right)} = \\
&= \frac{(u_1 - u) \left(\left(\frac{1}{2} \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \Delta v^2 \right) - (1 - e^2) \left(\frac{1}{2} \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \Delta v^2 \right) \right)}{\left(e \left(\frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} (v_1 - v_2) \right) \right) \cdot \left(v_0 \left(\sqrt{\frac{m_1}{k_1}} + \sqrt{\frac{m_2}{k_2}} \right) \right)} ; \quad (53)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
a_{a2} &= \frac{u_2 - u}{\left(e \left(\frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} (v_1 - v_2) \right) \right) \cdot \left(v_0 \left(\sqrt{\frac{m_1}{k_1}} + \sqrt{\frac{m_2}{k_2}} \right) \right)} = \\
&= \frac{(u_2 - u) \left(\left(\frac{1}{2} \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \Delta v^2 \right) - (1 - e^2) \left(\frac{1}{2} \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \Delta v^2 \right) \right)}{\left(e \left(\frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} (v_1 - v_2) \right) \right) \cdot \left(v_0 \left(\sqrt{\frac{m_1}{k_1}} + \sqrt{\frac{m_2}{k_2}} \right) \right)} . \quad (54)
\end{aligned}$$



9 pav. Automobilių greičių iliustracija smūgio atsistatymo metu [4]

2.5. Automobilių sustojimo atstumo bei trukmės skaičiavimas

Automobiliams susidūrus, deformacijų atsistatymo būvio pabaigoje, automobiliai juda greičiais u_1 ir u_2 (9 pav.). Šie dydžiai yra maksimalūs automobilių greičiai po smūgio – po to jų

greitis artėja link 0 km/h. Atstumą, kurį automobiliai nuvažiuoja nuo greičių u_1 ir u_2 iki sustojimo galime apskaičiuoti taikydami specialią metodiką [11]. Pagal ją, sustojimo atstumas nepriklauso nuo transporto priemonių masės ir yra tiesiogiai proporcingas pradiniam greičio kvadratui bei atvirkščiai proporcingas trinties jėgai:

$$d = \frac{v_0^2}{2\mu g}; \quad (55)$$

čia: d – nuvažiuotas atstumas nuo pradinio greičio iki sustojimo, m; v_0^2 – pradinis greitis, m/s; μ – trinties koeficientas; g – laisvojo kritimo pagreitis (9,81 m/s²) [13].

Formulę (55) pritaikę savo atvejui, gauname formules automobilių sustojimo atstumams apskaičiuoti:

$$d_1 = \frac{u_1^2}{2\mu g}; \quad (56)$$

$$d_2 = \frac{u_2^2}{2\mu g}. \quad (57)$$

Iš kinematikos pagrindų žinoma, kad nueitą kelią, žinant pradinį ir galinį greičius bei laiko tarpą tarp šių greičių, galima apskaičiuoti pagal formulę [13]:

$$d = \frac{v + v_0}{2} t. \quad (58)$$

Iš (58) formulės išsireiškę laiką t gauname:

$$t = \frac{2d}{v + v_0}. \quad (59)$$

I (59) formulę įstatę (57), galime apskaičiuoti atskirų automobilių sustojimo po smūgio trukmę:

$$t_1 = \frac{2 \cdot \frac{u_1^2}{2\mu g}}{u_1} = \frac{2 \cdot u_1^2}{u_1 \cdot 2\mu g} = \frac{u_1}{\mu g}; \quad (60)$$

$$t_2 = \frac{2 \cdot \frac{u_2^2}{2\mu g}}{u_2} = \frac{2 \cdot u_2^2}{u_2 \cdot 2\mu g} = \frac{u_2}{\mu g}. \quad (61)$$

Apskaičiavus atstumą, kurio prireikė automobiliui sustoti bei sustojimo trukmę, naudodami (51) ir (52) formules, galime apskaičiuoti su koku pagreičiu automobiliai sustoja:

$$a_1 = \frac{u_1}{t_1}; \quad (62)$$

$$a_2 = \frac{u_2}{t_2}. \quad (63)$$

3. DVIEJŲ SUSIDURIANČIŲ AUTOMOBILIŲ DINAMIKOS TYRIMŲ REZULTATAI

Norint apskaičiuoti skaičiavimo metodikoje pateiktus dydžius, reikia žinoti dviejų susiduriančių automobilių mases ir standumus. Šie dydžiai parenkami iš 2.1. lentelės.

Priimama sąlyga, kad susiduria 2 vienodi automobiliai, o tam, kad būtų galima matyti kaip kinta įvairūs parametrai priklausomai nuo automobilių masės ir standumo, šie dydžiais bus keičiami.

3.1. Automobilių greičių po smūgio tyrimas

Nagrinėjamas atvejis kai susiduria 2 automobiliai, kurių masė ir standumas pateikti 3.1. lentelėje.

3.1. lentelė

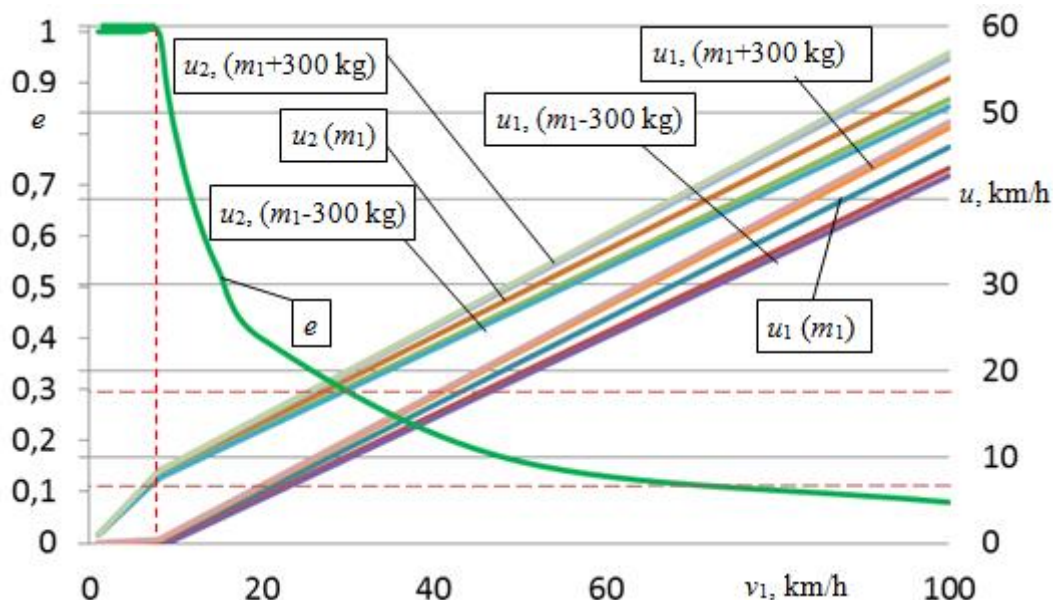
Tyrimui pasirinkto automobilio parametrai (2.1. lentelė)

Markė	Modelis	Pagaminimo metai	Masė, kg	Bendras standumas, kN/m
BMW	325i	2002	1731	1496.8

Automobilių ašys smūgio metu yra vienoje tiesėje, antrasis automobilis iki susidūrimo nejudą $v_2 = 0$ km/h, o pirmojo automobilio greitis v_1 kinta nuo 1 km/h iki 100 km/h (kinta nuo 1 km/h todėl, kad jei pirminis greitis būtų 0, susidūrimas neįmanomas). Abiejų automobilių masė ir standumas yra vienodi – m_1 ; $m_2 = 1731$ kg, k_1 ; $k_2 = 1497$ kN/m. Kad matytume kokią įtaką greičiams po smūgio daro automobilių masė, priimama prielaida, kad pirmojo automobilio masė įgauna 4 papildomas vertes:

- $m_1 - 150$ kg (1581 kg);
- $m_1 - 300$ kg (1431 kg);
- $m_1 + 150$ kg (1881 kg);
- $m_1 + 300$ kg (2031 kg).

Bendras atsistatymo koeficientas apskaičiuojamas pagal formulę (17), o greičiai po smūgio – pagal (9).

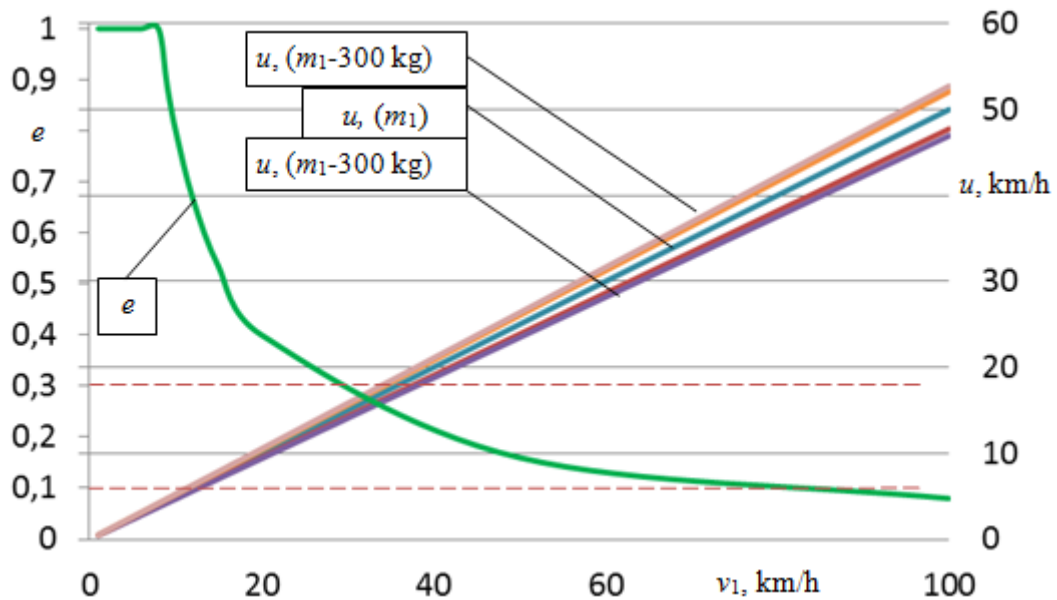


10 pav. Automobilių bendro atsistatymo koeficiento e , greičių po smūgio u_1 (judėjusio prieš smūgį) ir u_2 (stovėjusio prieš smūgį) priklausomybė nuo judėjusio automobilio greičio prieš smūgį v_1 , keičiant pirmojo automobilio masę m_1

Gavus grafiką (10 pav.), galime pamatyti, kodėl viename iš analizuotų straipsnių [3] buvo taikoma prielaida, kad daugeliu atveju autoįvykiuose atsistatymo koeficiento reikšmė patenka į intervalą nuo 0,1 iki 0,3. Iš pateikto grafiko (10 pav.) matome, kad atsistatymo koeficiento pasiskirstymas atitinka minimą prielaidą. Be to, grafike (10 pav.) matome, kad kol bendras atsistatymo koeficientas $e = 1$, į stovintį automobilį įvažiuojančio automobilio greitis po smūgio lygus 0, o stovėjusio automobilio greitis kinta sparčiau nei tuomet kai atsistatymo koeficiento vertė pradeda mažėti.

Pirmojo automobilio masę m_1 padidinus 300 kg, jo greitis po smūgio u_1 maksimaliai padidėja 1,2 karto, o antrojo automobilio greitis po smūgio u_2 – maksimaliai padidėja 1,08 karto. Pirmojo automobilio masę m_1 sumažinus 300 kg, jo greitis po smūgio u_1 maksimaliai sumažėja 1,13 karto, o antrojo automobilio greitis po smūgio u_2 – maksimaliai sumažėja 1,1 karto.

Sekančio atveju tiriama kaip kinta bendras susidūrusių automobilių greitis u esant maksimaliai deformacijai. Susidūrimo sąlygos išlieka tokios pat.



11 pav. Automobilių bendro atsistatymo koeficiento bei bendro greičio maksimalios deformacijos metu u priklausomybė nuo judėjusio automobilio greičio prieš smūgį v_1 , keičiant pirmojo automobilio masę m_1

Atsistatymo koeficientas išlieka toks pat. Iš grafiko (11 pav.) matome, kad bendras greitis u esant maksimalioms automobilių deformacijoms kai automobilių masė ir standumai vienodi yra 2 kartus mažesnis už pirmojo automobilio greitį v_1 .

Pirmojo automobilio masę m_1 padidinus 300 kg, bendras greitis po smūgio u maksimaliai padidėja 1,08 karto. Pirmojo automobilio masę m_1 sumažinus 300 kg, automobilių bendras greitis po smūgio u maksimaliai sumažėja 1,1 karto.

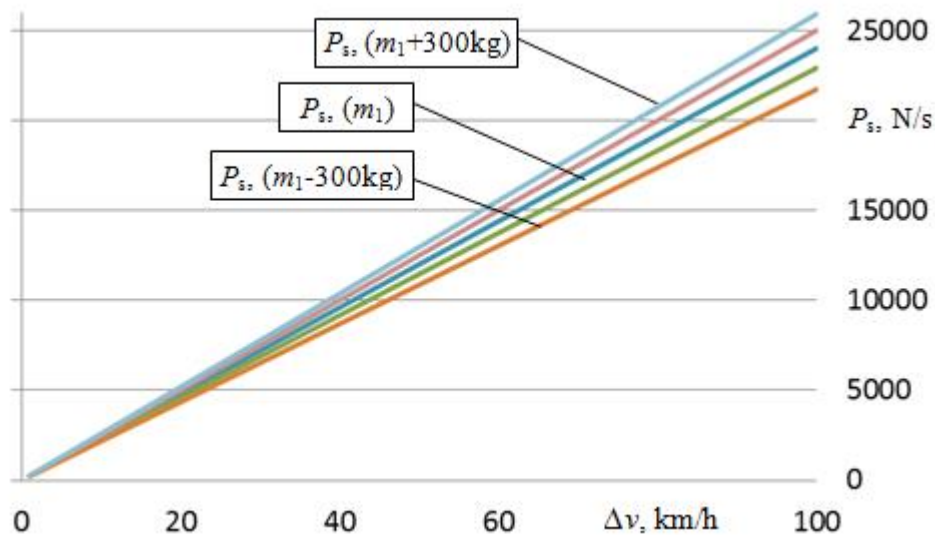
Bendras automobilių greitis esant maksimaliai deformacijai apskaičiuojamas pagal (3) formulę.

3.2. Automobilių susidūrimo smūgio impulsų ir energijos tyrimas

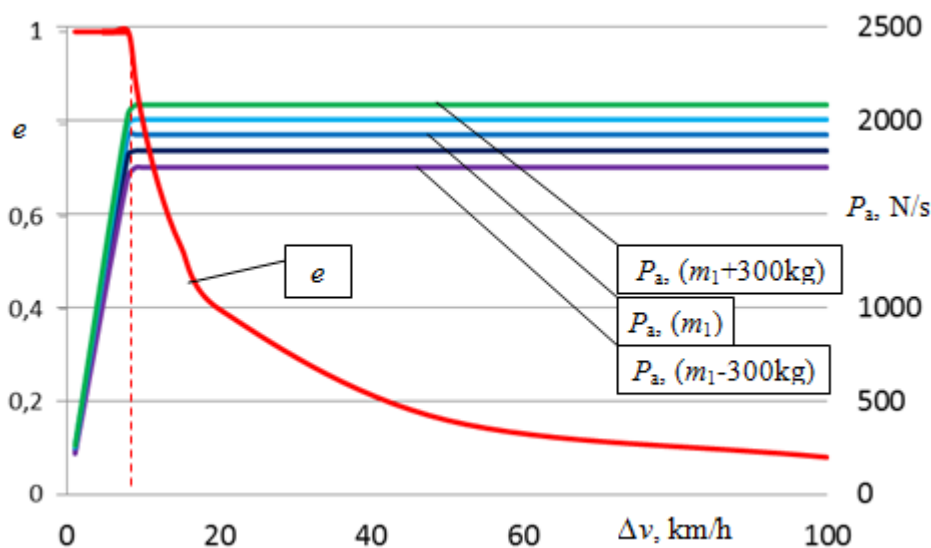
Nagrinėjamas atvejis kaip automobilių susidūrimo metu kinta suspaudimo ir atsistatymo smūgio jėgos impulsai (jėgos kiekis per laiko vienetą). Grafike (12 pav.) pateikiama šių dydžių priklausomybė nuo greičio prieš smūgį.

Antrasis automobilis iki susidūrimo nejuda $v_2 = 0$ km/h, o pirmojo automobilio greitis v_1 kinta nuo 1 km/h iki 100 km/h. Abiejų automobilių pradinė masė yra vienoda – $m_1 = m_2 = 1731$ kg, o kad matytume kokią įtaką ji turi susidūrimo smūgio jėgos impulsams, priimama prielaida, kad pirmojo automobilio masė įgauna 4 papildomas vertes kaip ir 3.1. poskyryje.

Suspaudimo jėgos impulsas apskaičiuojamas pagal (28), o atsistatymo – pagal (30) formules.



12 pav. Automobilių smūgio jėgos impulso suspaudimo metu P_s priklausomybė nuo susiduriančių automobilių greičių skirtumo Δv , keičiant pirmojo automobilio masę m_1



13 pav. Automobilių smūgio jėgos impulso atsistatymo metu P_a bei bendro atsistatymo koeficiento priklausomybė nuo susiduriančių automobilių greičių skirtumo Δv , keičiant pirmojo automobilio masę m_1

Grafike (12 pav.) matome, kad suspaudimo jėgos impulsas P_s priklausomai nuo greičių prieš smūgi skirtumo, kinta tiesine priklausomybe – greičių skirtumui padidėjus arba sumažėjus 2 kartus, suspaudimo jėgos impulsas atitinkamai taip pat padidėja/sumažėja 2 kartus.

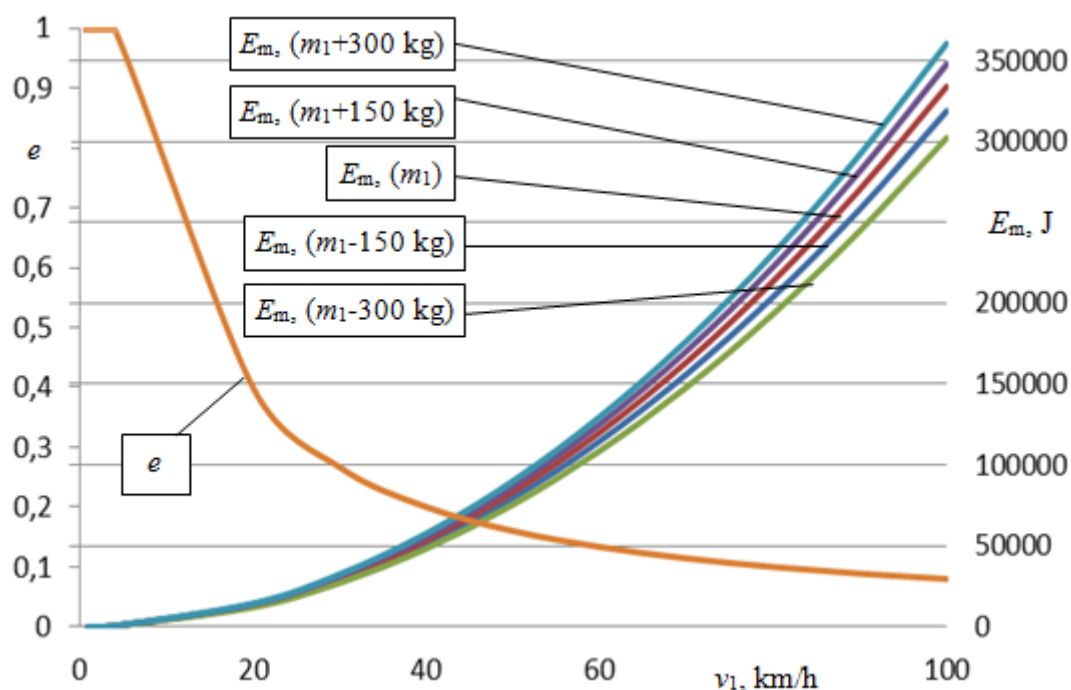
Pirmojo automobilio masei m_1 padidėjus 300 kg, smūgio jėgos impulsas padidėja 1,08 karto. Masei sumažėjus 150 kg, P_s sumažėja 1,04 karto.

Grafike (13 pav.) pateikta atsistatymo jėgos impulso priklausomybė P_a . Šis dydis tiesiogiai priklauso nuo bendro atsistatymo koeficiento e , kuris papildomai pavaizduotas grafike. Čia galime zoną (raudona punktyrinė linija), kurioje atsistatymo smūgio jėgos impulsas ženkliau keičia savo vertes t.y. zona, kurioje bendras atsistatymo koeficientas e lygus 1. Esant greičiams, prie kurių

bendras atsistatymo koeficientas e lygus 1, suspaudimo ir atsistatymo jėgos impulsai yra lygus. Atsistatymo koeficientui pradėjus mažėti, atsistatymo jėgos impulso reikšmė pasiekia pastovią vertę. Atsistatymo jėgos impulso dydis kiekybiniu vertinimu, priklausomai nuo pirmojo automobilio masės, pasikeičia tiek pat kaip ir suspaudimo jėgos impulsas.

Toliau tiriama kaip analogišku susidūrimo atveju kinta automobilio deformacijai sunaudojamos energijos E_m kiekis priklausomai nuo automobilio greičio prieš susidūrimą, keičiant pirmojo automobilio masę (14 pav.).

Deformacijai sunaudojamos energijos kiekis apskaičiuojamas pagal formulę (15).



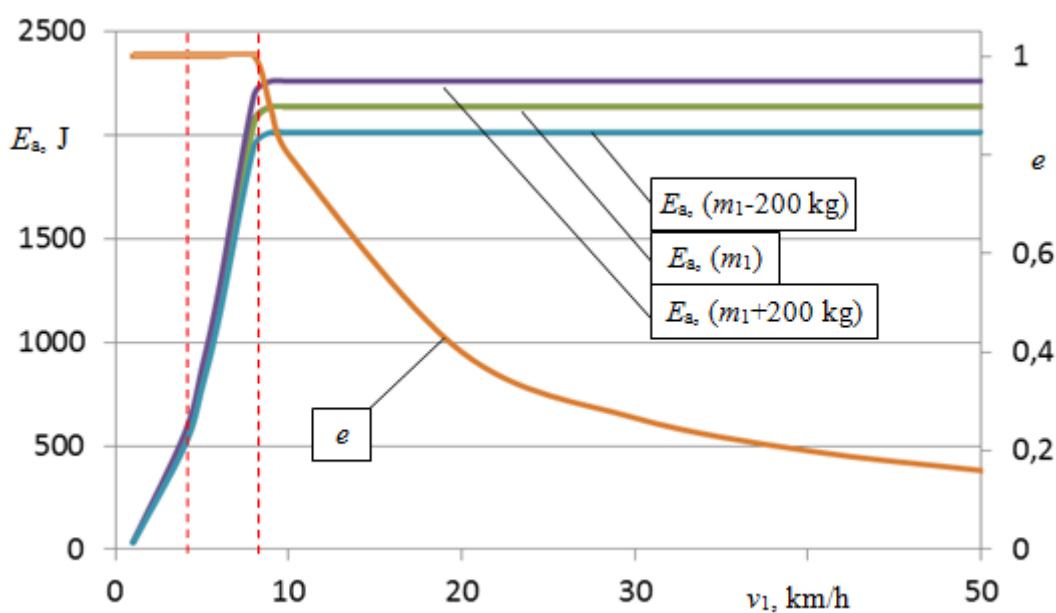
14 pav. Automobilių deformavimo energijos E_m priklausomybė nuo judėjusio automobilio greičio prieš smūgį v_1 , keičiant pirmojo automobilio masę m_1

Matome, kad deformacijai sunaudojamos energijos kiekis kinta paraboline priklausomybe – greičiui prieš smūgį v_1 padidėjus 2 kartus, energijos kiekis išauga 4 kartus. Pirmojo automobilio masę m_1 padidinus 300 kg, deformacijai sunaudojama energija padidėja 1,08 karto. Masei sumažėjus 150 kg, E_m sumažėja 1,04 karto. Gauname, kad masės pokytį padidinus arba sumažinus 2 kartus, deformavimo energija atitinkamai padidėja arba sumažėja 1,02 karto.

Grafike (15 pav.) pateiktas deformacijų atsistatymui sunaudojamos energijos E_a kiekio priklausomybė nuo greičio prieš smūgį. Kadangi ši energija nuo tam tikro dydžio pasiekia pastovią vertę, šiek tiek pakoreguojamas susidūrimo scenarijus - pirmojo automobilio greitis kinta ne nuo 0 km/h iki 100 km/h, bet iki 50 km/h, o pirmojo automobilio masė keičiama į vieną didesnę bei tokio pat dydžio mažesnę vertę (+/- 200 kg). Toks pakeitimas leis aiškiau matyti grafiko pasiskirstymą. Taigi matome, kad šios energijos vertės kitimą galima suskaidyti į 3 zonas:

- 1-oji zona - atsistatymo energijos vertė didėja sparčiausiai greičiui prieš smūgį kintant nuo pradinio iki 4 km/h;
- 2-oji zona - atsistatymo energija didėja sparčiau nei 1-oje zonoje;
- 3-ioji zona - atsistatymo energija pasiekia pastovią vertę ir nebekinta nuo tada kai dėl greičio prieš smūgį, atsistatymo koeficiento vertė pradeda mažėti nuo maksimalios ($e_{\max}=1$).

Pirmojo automobilio masę padidinus 200 kg, energijos kiekis sunaudojamas deformacijų atstatymui 1-oje zonoje padidėja 1,07 karto, 2-oje zonoje 1,09 karto, o 3-ioje zonoje 1,06 karto. Pirmojo automobilio masę sumažinus 200 kg, visos reikšmės tiek pat kartų sumažėja.

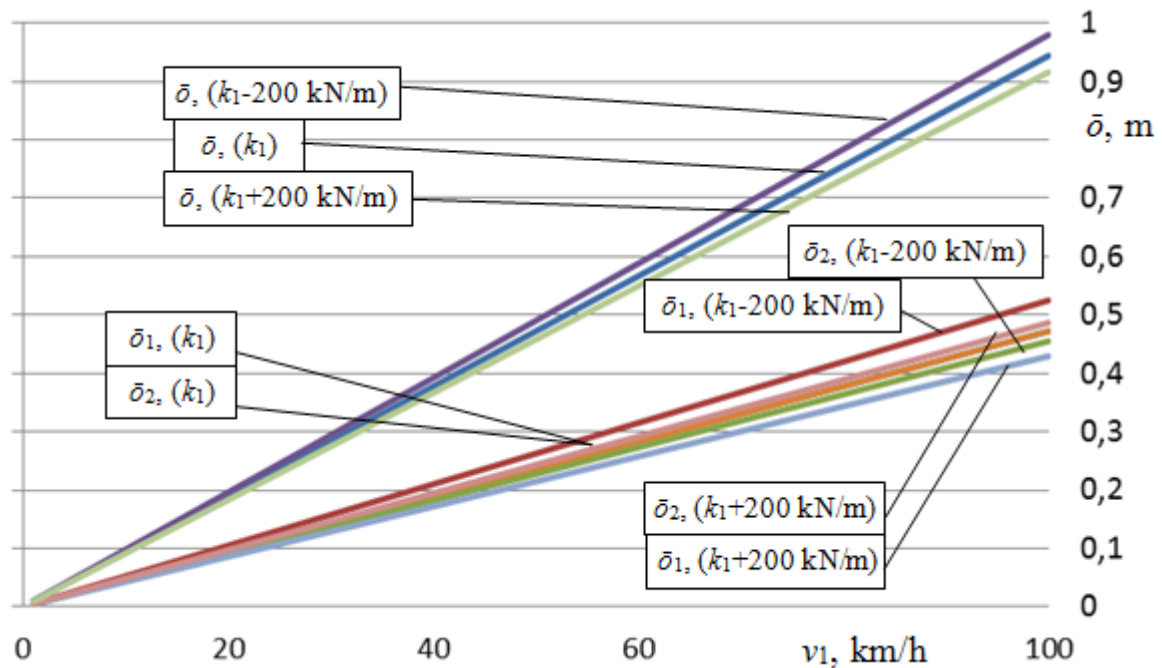


15 pav. Automobilių atsistatymo energijos E_a priklausomybė nuo judėjusio automobilio greičio prieš smūgį v_1 , keičiant pirmojo automobilio masę m_1

3.3. Automobilių susidūrimo deformacijų tyrimas

Nagrinėjamas atvejis kaip automobilių susidūrimo metu kinta susidarančios deformacijos.

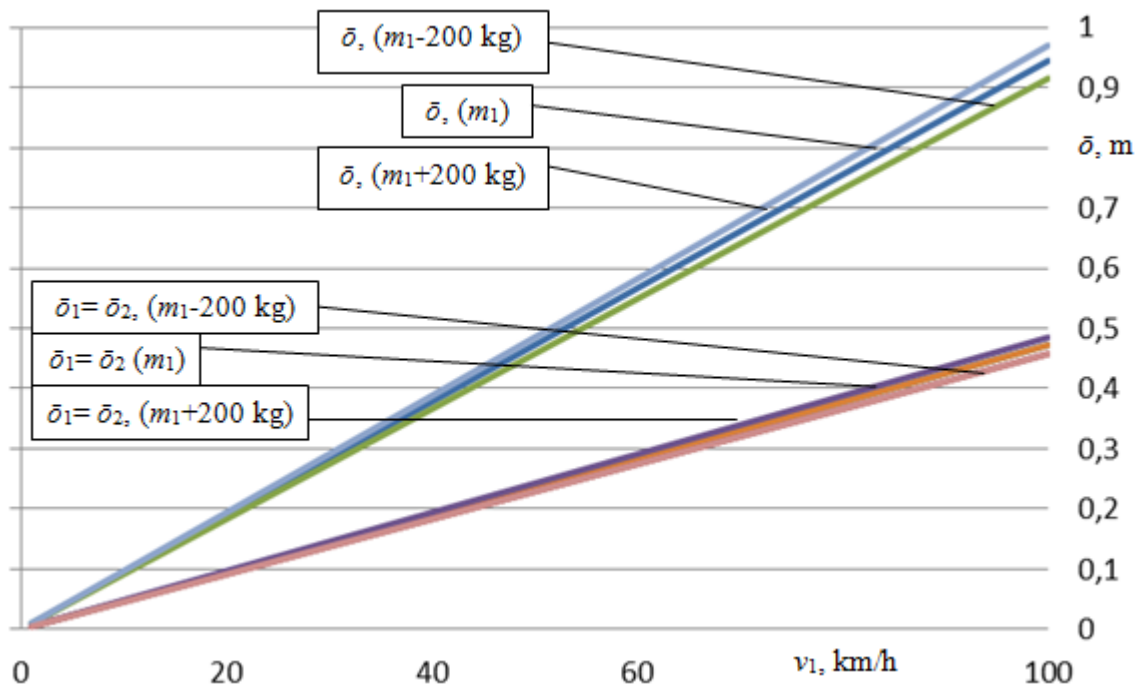
Pirmojo automobilio greitis v_1 kinta nuo 1 km/h iki 100 km/h, antrasis automobilis iki susidūrimo nejuda $v_2 = 0$ km/h. Abiejų automobilių pradinė masė yra vienoda – $m_1 = m_2 = 1731$ kg, o bendri standumai $k_1 = k_2 = 1497$ kN/m. Kad būtų matoma kokią įtaką šie užsiduoti pradiniai dydžiai daro automobilių deformacijoms, grafikuose pateikiamos reikšmės esant padidintam (k_1+200 kN/m) bei sumažintam (k_1-200 kN/m) pirmojo automobilio standumui (12 pav.) ir taip pat padidintai (m_1+200 kg) bei sumažintai (m_1-200 kg) pirmojo automobilio masei (13 pav.)



16 pav. Automobilių individualių deformacijų $\bar{\delta}_1$, $\bar{\delta}_2$ bei bendros deformacijos $\bar{\delta}$ priklausomybė nuo judėjusio automobilio greičio prieš smūgį v_1 , keičiant pirmojo automobilio standumą k_1

Kadangi pradinio atveju abiejų automobilių standumas ir masė yra vienodi, smūgio metu atsiradusi atskira bei bendra automobilių deformacijos $\bar{\delta}$, $\bar{\delta}_1$, $\bar{\delta}_2$ yra taip pat vienodos (16 ir 17 pav.). Deformacijos apskaičiuojamos pagal (22) (23) formules. Atlikę skaičiavimus gauname, kad pirmojo automobilio greičiui prieš smūgį v_1 padidėjus du kartus, deformacijos taip pat padidėja dvigubai. Padidinę pirmojo automobilio standumą 200 kN/m gauname, jog pirmojo automobilio deformacijos sumažėja 1,1 karto, tuo metu antrojo – padidėja 1,03 karto, bendra deformacija sumažėja 1,03 karto (16 pav.)

Padidinę pirmojo automobilio masę 200 kg gauname, jog abiejų automobilių deformacijos padidėja 1,026 karto, tuo metu bendra deformacija padidėja 1,028 karto (17 pav.). Atskiros automobilių deformacijos pasikeičia tiek pat kartų, nes jos priklauso nuo bendros deformacijos bei automobilių standumo.

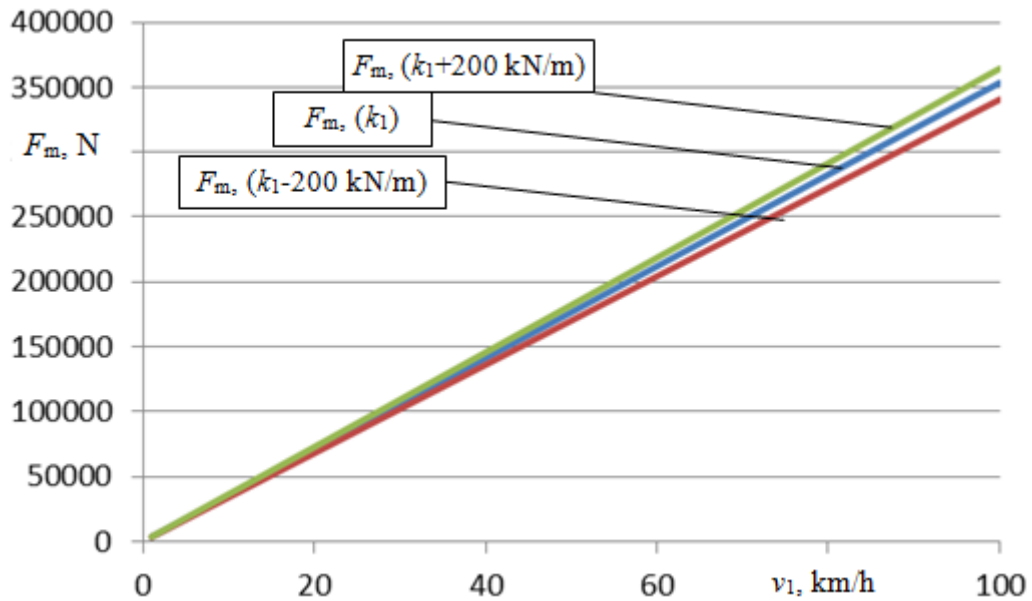


17 pav. Automobilių individualių deformacijų δ_1 , δ_2 bei bendros deformacijos δ priklausomybė nuo judėjusio automobilio greičio prieš smūgį v_1 , keičiant pirmojo automobilio masę m_1

3.4. Automobilių susidūrimo jėgų tyrimas

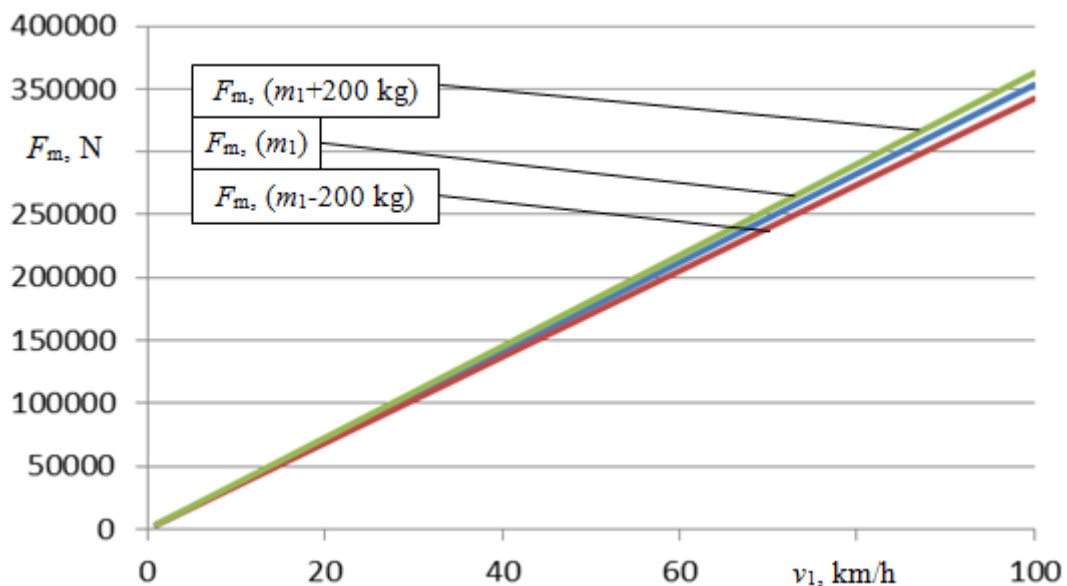
Nagrinėjamas atvejis kaip automobilių susidūrimo metu kinta smūgio metu atsirandančios jėgos. Kaip buvo minėta skaičiavimo metodikoje, susidūrimo metu kyla dviejų tipų smūgio jėgos – suspaudimo ir atsistatymo. Jų priklausomybė nuo greičio prieš smūgį, masės bei standumo pateikiama grafikuose (18, 19, 20, 21 pav.) bei yra apskaičiuojamos pagal (35) (42) formules. Automobilių susidūrimo atvejis – identiškas 3.3. poskyryje atliktam deformacijos tyrimui.

Pirmu atveju pateiktas grafikas, kuriame pavaizduota kaip kinta suspaudimo metu kylanti jėga F_m nuo pirmojo automobilio greičio v_1 , esant padidintam ($k_1 + 200$ kN/m) bei sumažintam ($k_1 - 200$ kN/m) pirmojo automobilio standumui (18 pav.)



18 pav. Automobilių deformacijai sunaudojamos jėgos F_m priklausomybė nuo judėjusio automobilio greičio prieš smūgį v_1 , keičiant pirmojo automobilio standumą k_1

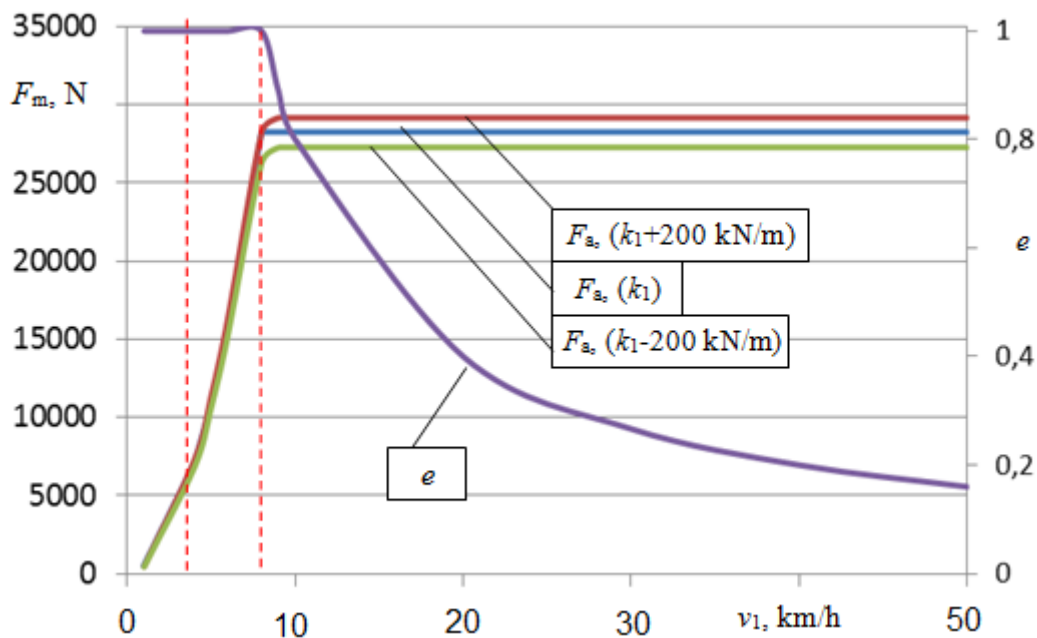
Atlikę skaičiavimus gauname, kad pirmojo automobilio greičiui prieš smūgį v_1 padidėjus du kartus, automobilių deformacijai sunaudojama jėga F_m padidėja dvigubai. Padidinę pirmojo automobilio standumą 200 kN/m gauname, kad deformacijai sunaudojama jėga padidėja 1,03 karto (18 pav.).



19 pav. Automobilių deformacijai sunaudojamos jėgos F_m priklausomybė nuo judėjusio automobilio greičio prieš smūgį v_1 , keičiant pirmojo automobilio masę m_1

Tam pačiam atvejui padidinę pirmojo automobilio masę 200 kg gauname, kad deformacijai sunaudojama jėga padidėja 1,026 karto. (19 pav.)

Toliau tiriama jėga, atsirandanti deformacijų atsistatymo metu F_a . Iš skaičiavimo metodikoje pateiktos informacijos žinoma, kad nuo tam tikro greičio prieš smūgį, jėga F_a pasiekia pastovią savo reikšmę. Dėl šios priežasties pirmojo automobilio greičio prieš smūgį v_1 kitimas pakeičiamas į intervalą nuo 1 km/h iki 50 km/h. Tai atlikus gauname aiškesnį grafiką (20 pav.).

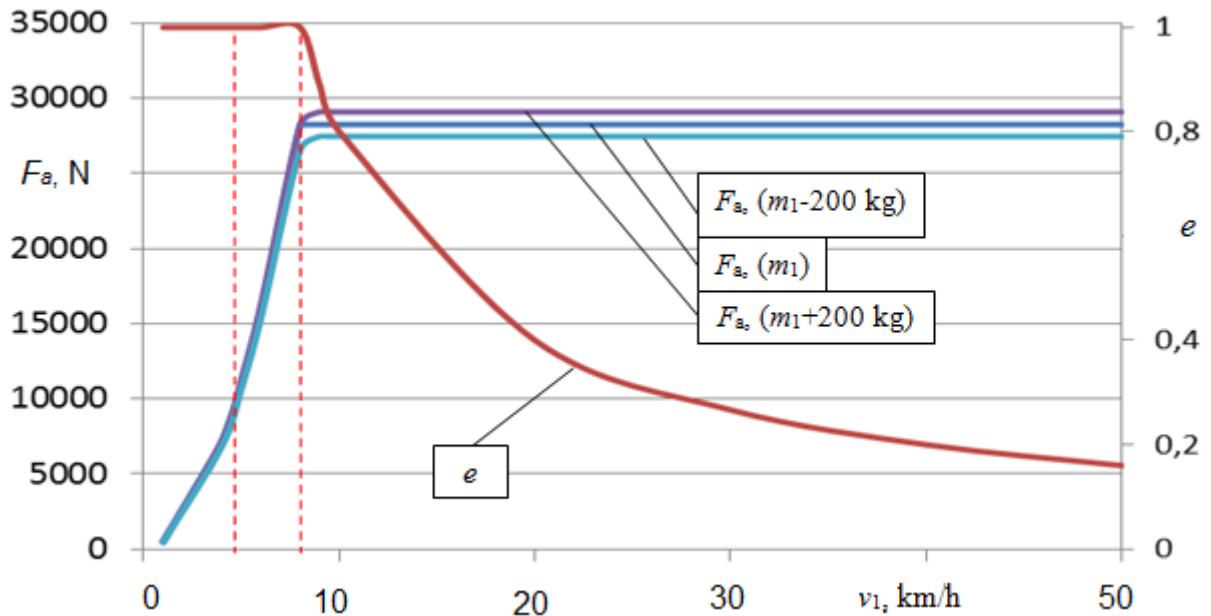


20 pav. Automobilių atsistatymui sunaudojamos jėgos F_a priklausomybė nuo judėjusio automobilio greičio prieš smūgį v_1 , keičiant pirmojo automobilio standumą k_1

Iš grafiko (20 pav.) matome, kad didžiausią įtaką atsistatymo jėgai F_a netiesiogiai daro atsistatymo koeficientas e . Esant nedideliam susidūrimo greičiui (iki ~ 10 km/h), atsistatymo koeficiento reikšmė lygi 1. Susidūrimo greičiui didėjant, atsistatymo koeficiento vertė pradeda kristi, o tuo metu atsistatymui sunaudojama jėga pasiekia nebekintančią vertę. Kaip su atsistatymo energijos tirtu atveju, šį grafiką galime padalinti į 3 zonas. Vienoje iš jų atsistatymo jėga didėja (zona kai greitis prieš smūgį patenka į intervalą $0 < v_1 < 4$ km/h), didėja sparčiau (iki kol atsistatymo koeficiento e vertė išlieka lygi 1) ir pasiekia pastovią reikšmę (kai atsistatymo koeficientas $e < 1$).

Pirmojo automobilio greitį prieš smūgį v_1 padidinus 2 kartus atskirose zonose gauname, kad pirmoje zonoje atsistatymo jėga padidėja 4 kartus, antroje zonoje 5,16 karto, o trečiojoje zonoje išlieka pastovi (20 ir 21 pav.).

Padidinę pirmojo automobilio standumą 200 kN/m gauname, kad deformacijų atsistatymui sunaudojama jėga padidėja 1,032 karto. (20 pav.)



21 pav. Automobilių atsistatymui sunaudojamos jėgos F_a priklausomybė nuo judėjusio automobilio greičio prieš smūgį v_1 , keičiant pirmojo automobilio masę m_1

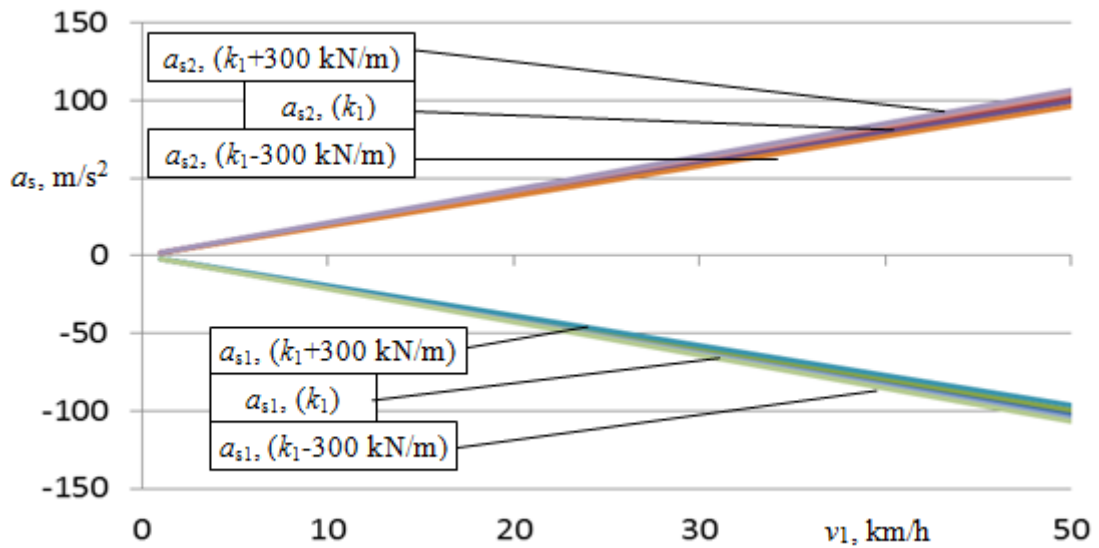
Padidinę pirmojo automobilio masę 200 kg gauname, kad deformacijų atsistatymui sunaudojama jėga padidėja 1,028 karto (21 pav.).

3.5. Automobilių susidūrimo pagreičių tyrimas

Nagrinėjama kaip keičiasi automobilių pagrečiai susidūrimo metu. Kaip minėta skaičiavimo metodikoje, susidūrimo metu yra kyla dviejų rūšių pagrečiai – pagreitis suspaudimo metu (nuo kontakto pradžios iki maksimalios deformacijos) ir pagreitis atsistatymo metu (nuo maksimalios deformacijos iki maksimalaus greičio po smūgio).

Susiduriančių automobilių masės ir standumai lieka tokie pat kaip ankščiau atliktuose tyrimuose. Pirmojo automobilio greitis v_1 kinta nuo 1 km/h iki 50 km/h, antrasis automobilis iki susidūrimo nejuda $v_2 = 0$ km/h. Pagreičių tyrimo grafikuose (22, 23, 24, 25 pav.) pateikiamos reikšmės esant padidintam (k_1+300 kN/m; k_1+150 kN/m) bei sumažintam (k_1-300 kN/m; k_1-150 kN/m) pirmojo automobilio standumui (22, 23 pav.) ir taip pat padidintai (m_1+300 kg; m_1+150 kg) bei sumažintai (m_1-150 kg; m_1-300 kg) pirmojo automobilio masei (24, 25 pav.).

Grafikuose (22 ir 23 pav.) pateikta pirmojo ir antrojo automobilių pagreičių suspaudimo metu a_{s1} ir a_{s2} priklausomybė nuo pirmojo automobilio greičio prieš smūgį v_1 , keičiant pirmojo automobilio standumą k_1 (22 pav.) bei masę m_1 (23 pav.). Abiem atvejais gaunama, kad greičiui prieš smūgį padidėjus 2 kartus (pavyzdžiui nuo 20 km/h iki 40 km/h), suspaudimo metu atsirandantys pagrečiai taip pat padidėja 2 kartus.

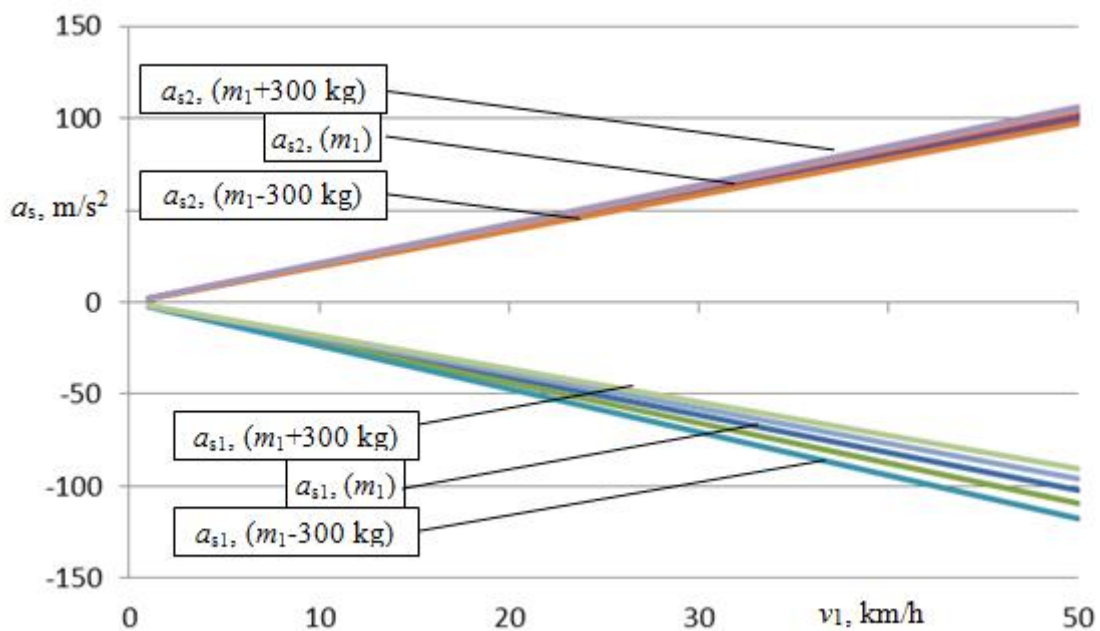


22 pav. Automobilių pagreičių suspaudimo metu a_s priklausomybė nuo judėjusio automobilio greičio prieš smūgį v_1 , keičiant pirmojo automobilio standumą k_1

Pradiniu atveju, automobilių standumams esant vienodoms, abiejų automobilių pagreičiai suspaudimo metu yra vienodo dydžio, bet skirtingų kryptių. Pirmojo automobilio standumą k_1 padidinus 150 kN/m, pagreičiai a_{s1} ir a_{s2} padidėja 1,024 karto. Standumą k_1 padidinus 300 kN/m, pagreičiai a_{s1} ir a_{s2} padidėja 1,045 karto.

Pirmojo automobilio standumą k_1 sumažinus 150 kN/m, pagreičiai a_{s1} ir a_{s2} sumažėja 1,027 karto. Standumą k_1 sumažinus 300 kN/m, pagreičiai a_{s1} ir a_{s2} sumažėja 1,06 karto.

Iš šių palyginimų matome, jog vieno iš automobilių standumo pakeitimas daro vienodą įtaką abiejų automobilių pagreičiams suspaudimo metu.



23 pav. Automobilių pagreičių suspaudimo metu a_s priklausomybė nuo judėjusio automobilio greičio prieš smūgį v_1 , keičiant pirmojo automobilio masę m_1

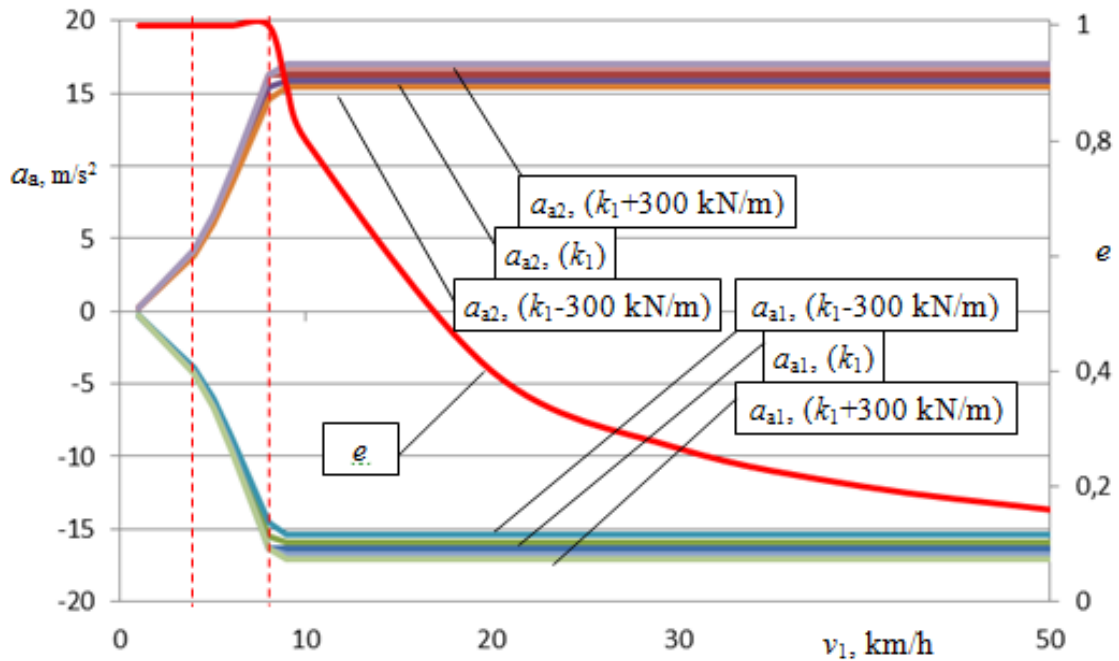
Pradiniu atveju, automobilių masėms esant vienodomis, abiejų automobilių pagreičiai suspaudimo metu yra vienodo dydžio, bet skirtingų krypčių. Pirmojo automobilio masę m_1 padidinus 150 kg, jo pagreitis a_{s1} sumažėjo 1,064 karto, o a_{s2} padidėja 1,02 karto. Masę m_1 padidinus 300 kg, pagreitis a_{s1} sumažėjo 1,13 karto, o a_{s2} padidėja 1,039 karto.

Pirmojo automobilio masę m_1 sumažinus 150 kg, jo pagreitis a_{s1} padidėjo 1,07 karto, o a_{s2} padidėja 1,023 karto. Masę m_1 sumažinus 300 kg, pagreitis a_{s1} padidėjo 1,15 karto, o a_{s2} sumažėja 1,051 karto.

Iš šio grafiko galima padaryti išvadą, kad būtent to automobilio, kurio masė keičiama, pagreitis suspaudimo metu kinta ženkliau nei automobilio, kurio masė išliko pastovi.

Toliau analizuojami deformacijų atsistatymo metu kylantys automobilių pagreičiai a_a , jo priklausomybę nuo pirmojo automobilio greičio prieš smūgį v_1 keičiant automobilio masę m_1 (24 pav.) bei standumą k_1 (25 pav.). Kadangi atsistatymo pagreičiai tiesiogiai priklauso nuo bendro automobilių atsistatymo koeficiento e , šis dydis taip pat pateikiamas grafikuose. Kaip ir su jau analizuotais kitais dydžiais, priklausomais nuo atsistatymo koeficiento, matome, kad abu grafikus galime padalinti į 3 zonas – pirmojoje iš jų, atsistatymo pagreitis didėja sparčiausiai (zona kai greitis prieš smūgį patenka į intervalą $0 < v_1 < 4$ km/h), antrojoje – didėja lėčiau (iki kol atsistatymo koeficiento e vertė išlieka lygi 1) ir trečiojoje, kur pasiekia pastovią reikšmę (kai atsistatymo koeficientas $e < 1$).

Visų pirma, tiriama kokią įtaką atsistatymo pagreičiams visose zonose daro automobilio greitis prieš smūgį v_1 . Gauta, kad pirmojoje zonoje, kur atsistatymo pagreitis kinta sparčiausiai, greičiui prieš smūgį padidėjus 2 kartus, atsistatymo pagreičiai padidėja 4 kartus. Antrojoje zonoje greičiui prieš smūgį padidėjus 2 kartus, atsistatymo pagreičiai padidėja 3,16 karto, o trečiojoje zonoje išlieka pastovūs. Šios atsistatymo pagreičių a_{a1} ir a_{a2} priklausomybės nuo pirmojo automobilio greičio prieš smūgį v_1 galioja abiemis grafikams (24 ir 25 pav.)

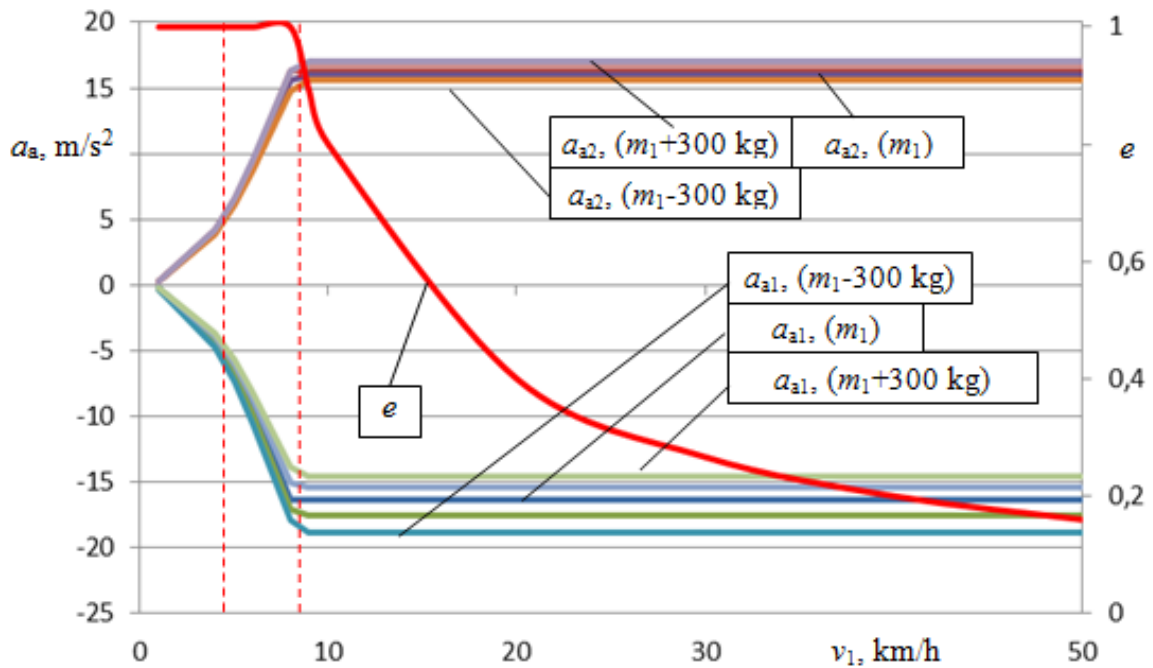


24 pav. Automobilių pagreičių atsistatymo metu a_a priklausomybė nuo judėjusio automobilio greičio prieš smūgį v_1 , keičiant pirmojo automobilio standumą k_1

Grafike (20 pav.) pavaizduota kaip kinta abiejų automobilių atsistatymo pagreitis nuo pirmojo automobilio greičio prieš smūgį, keičiant jo standumą. Taigi pirmojo automobilio standumą k_1 sumažinus 150 kN/m, abiejų automobilių atsistatymo pagreičiai a_{a1} ir a_{a2} sumažėja 1,027 karto, o standumą sumažinus 300 kN/m, pagreičiai a_{a1} ir a_{a2} sumažėja 1,06 karto.

Pirmojo automobilio standumą k_1 padidinus 150 kN/m, abiejų automobilių atsistatymo pagreičiai a_{a1} ir a_{a2} padidėja 1,023 karto, o standumą padidinus 300 kN/m, pagreičiai a_{a1} ir a_{a2} padidėja 1,046 karto.

Taigi matome, jog vieno iš automobilių standumo pakeitimas, tiek pirmojo, tiek antrojo automobilių pagreičius atsistatymo metu pakeičia vienodai.



25 pav. Automobilių pagreičių atsistatymo metu a_a priklausomybė nuo judėjusio automobilio greičio prieš smūgį v_1 , keičiant pirmojo automobilio masę m_1

Grafike (25 pav.) pavaizduota kaip kinta abiejų automobilių atsistatymo pagreitis nuo pirmojo automobilio greičio prieš smūgį, keičiant jo masę. Taigi pirmojo automobilio masę m_1 sumažinus 150 kg, pirmojo automobilio atsistatymo pagreitis a_{a1} padidėja 1,07 karto, tuo metu antrojo – sumažėja 1,02 karto. Pirmojo automobilio masę m_1 sumažinus 300 kg, pirmojo automobilio atsistatymo pagreitis a_{a1} padidėja 1,16 karto, tuo metu antrojo – sumažėja 1,045 karto.

Pirmojo automobilio masę m_1 padidinus 150 kg, pirmojo automobilio atsistatymo pagreitis a_{a1} sumažėja 1,06 karto, tuo metu antrojo – padidėja 1,02 karto. Pirmojo automobilio masę m_1 sumažinus 300 kg, pirmojo automobilio atsistatymo pagreitis a_{a1} sumažėja 1,12 karto, tuo metu antrojo – padidėja 1,04 karto.

Galima teigti, jog vieno iš automobilių masės pakeitimas, didesnę įtaką daro to automobilio atsistatymo pagreičiui, kurio masė yra keičiama.

Svarbu paminėti, kodėl atsistatymo pagreitis nuo tam tikros greičio prieš smūgį ribos išlaiko pastovią vertę. Taip yra todėl, kad pagal naudojamą skaičiavimo metodiką, priimama sąlyga, jog visos deformacijos esant susidūrimams iki 4 km/h yra visiškai atstatomos ir liekamųjų deformacijų nėra [4]. Taikant šią prielaidą iš tolimesnių skaičiavimų gaunama, kad smūgio metu maksimaliai galima atsistatyti tik tam tikrą kiekį deformacijų ir nuo tam tikros ribos šis maksimalus atstatomųjų deformacijų dydis nebekinta priklausomai nuo susidūrimo greičio.

3.6. Automobilių sustojimo atstumo po smūgio tyrimas

Panagrinėsime kaip kinta automobilių sustojimo atstumas po smūgio priklausomai nuo greičio iki susidūrimo bei trinties koeficiento. Priimama, kad automobiliai po smūgio sustoja 3-mis skirtingais atvejais esant atitinkamai 3-joms skirtingom trinties koeficiento vertėms:

- Stabdymas po smūgio ant sauso asfalto neblokuojant ratų;
- Stabdymas po smūgio ant drėgno asfalto neblokuojant ratų;
- Stabdymas po smūgio ant sniegu padengto kelio neblokuojant ratų.

Automobiliai susiduria taip pat kaip iki šiol nagrinėtuose poskyriuose - pirmojo automobilio greitis v_1 kinta nuo 1 km/h iki 100 km/h, o antrasis automobilis iki susidūrimo nejuda $v_2 = 0$ km/h. Automobilių masės ir bendri standumai vienodi. Kad būtų galima matyti kokią įtaką sustojimo atstumui daro automobilio masė, grafikuose pateiktos reikšmės su padidinta (m_1+200 kg) bei sumažinta (m_1-200 kg) pirmojo automobilio mase. Kadangi pagal naudojamą metodiką automobilių standumas sustojimo atstumui įtakos nedaro, jo vertės nėra keičiamos.

Stabdymo atstumas po susidūrimo apskaičiuojamas pagal (56) (57) formules. Trinties koeficiento reikšmės imamos iš 3.2. lentelės.

3.2. lentelė

Trinties koeficiento reikšmės stabdant tarp padangos ir įvairių kelio dangų [12]

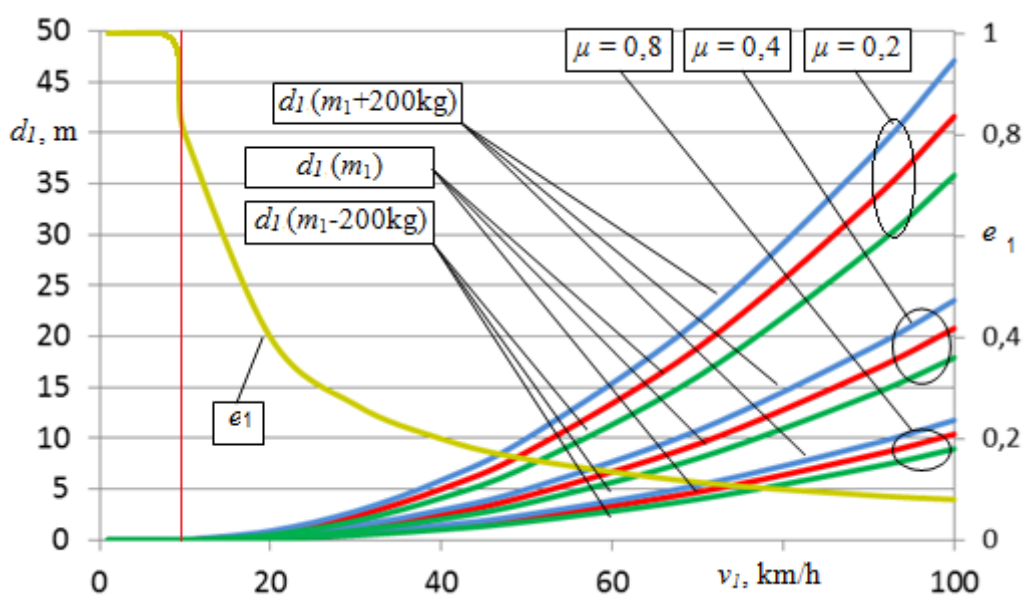
Kelio dangos paviršius	Trinties koeficientas μ
Asfaltas	0.80
Drėgnas asfaltas	0.40
Sniegas	0.20

Grafikuose, kuriuose pateiktas pirmojo ir antrojo automobilių sustojimo po smūgio atstumai d_1 ir d_2 (26 ir 27 pav.), iš formulių (56) ir (57) matome, kad šie atstumai turi kvadratinę priklausomybę nuo greičių po smūgio u_1 u_2 . Taigi greičiui po smūgio u_1 u_2 padidėjus 2 kartus, sustojimo atstumai d_1 d_2 padidės 4 kartus.

Minėtuose grafikuose taip pat pateikta individualios automobilių atsistaymo koeficientų e_1 ir e_2 priklausomybės bei automobilių sustojimo po smūgio atstumo d priklausomybė nuo pirmojo automobilio greičio prieš smūgį v_1 . Greičio po smūgio priklausomybė u_1 ir u_2 nuo greičio prieš smūgį v_1 jau buvo tirta 4.1. poskyryje. Dėl to gaunama, kad automobilių sustojimo atstumų reikšmės, nuo pirmojo automobilio greičio prieš smūgį, nėra tolygiai pasiskirstę, ir kiekybiškai vertinant skiriasi esant mažesniems ir didesniems greičiams prieš smūgį (v_1 pakitus nuo 10 km/h iki 20 km/h arba nuo

20 km/h iki 40 km/h, abiem atvejais greitis padidėja dvigubai, tačiau sustojimo atstumai pasikeičia skirtingai – greičiams didėjant sustojimo atstumo pokytis taip pat didėja).

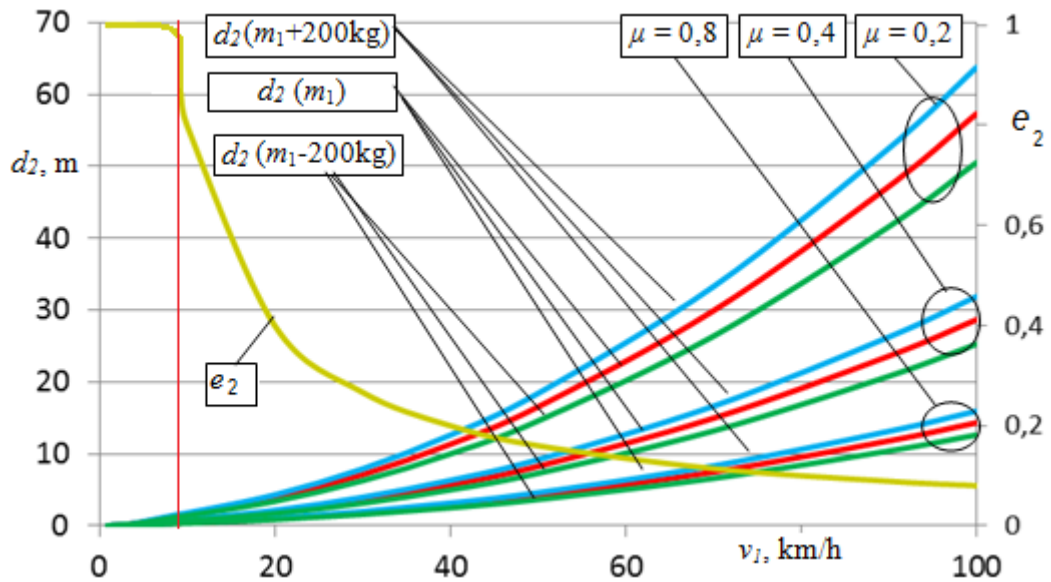
Be to, abiejuose grafikuose pavaizduota kaip skiriasi sustojimo atstumai priklausomai nuo kelio dangos. Lyginant sausą asfaltą (trinties koeficientas $\mu = 0,8$) su drėgnu asfaltu (trinties koeficientas $\mu = 0,4$), sustojimo atstumai pasikeičia 2 kartus, o lyginant sausą asfaltą su snieguota kelio danga (trinties koeficientas $\mu = 0,2$), sustojimo atstumai pasikeičia 4 kartus. Iš čia matoma, kad sustojimo atstumai tiesiogiai priklauso nuo trinties koeficiento – kiek kartų padidėja trinties koeficientas, tiek pat kartų sutrumpėja sustojimo atstumas. Tas pats galioja ir grafikams, kuriuose pavaizduota sustojimo trukmės priklausomybė nuo automobilio greičio prieš smūgį (28 ir 29 pav.).



26 pav. Pirmojo automobilio sustojimo atstumo d_1 priklausomybė nuo jo paties greičio prieš smūgį v_1 , keičiant jo masę m_1

Kaip matome iš (56) (57) formulių, sustojimo atstumas nuo masės tiesiogiai nepriklauso, tačiau keičiant automobilio masę keičiasi automobilio greitis po smūgio ir būtent šis dydis daro įtaką sustojimo atstumui. Kaip buvo minėta, greičių po smūgio priklausomybė tirta ankstesniame poskyryje. Gaunama, kad didinant pirmojo automobilio masę m_1 sustojimo atstumai d_1 ir d_2 didėja netolygiai – prie didesnių greičio prieš smūgį verčių, jam padidėjus 2 kartus, sustojimo atstumas pasikeičia mažiau nei prie mažesnių greičio prieš smūgį verčių.

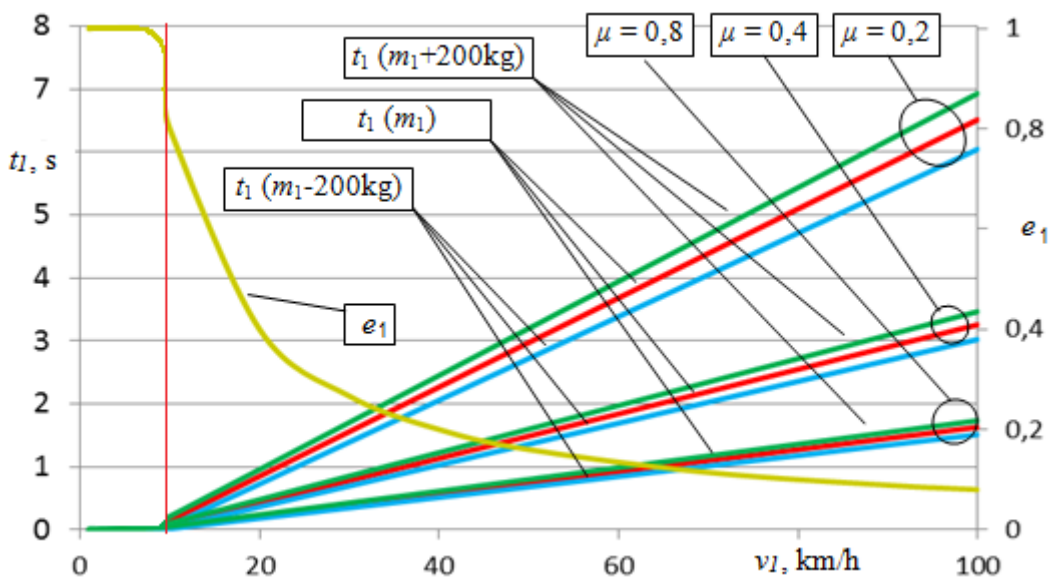
Grafike (26 pav.) yra atidėta raudona linija – riba, nuo kurios atsistatymo koeficiento vertė pradeda kristi nuo buvusios maksimalios vertės. Kol atsistatymo koeficientas lygus 1, pirmasis automobilis atsitrenkęs į kliūtį, po smūgio toliau nejuda, todėl, kaip ir galime matyti grafike (26 pav.), pirmojo automobilio sustojimo atstumas šioje zonoje lygus 0.



27 pav. Antrojo automobilio sustojimo atstumo d_2 priklausomybė nuo pirmojo automobilio greičio prieš smūgį v_1 , keičiant jo masę m_1

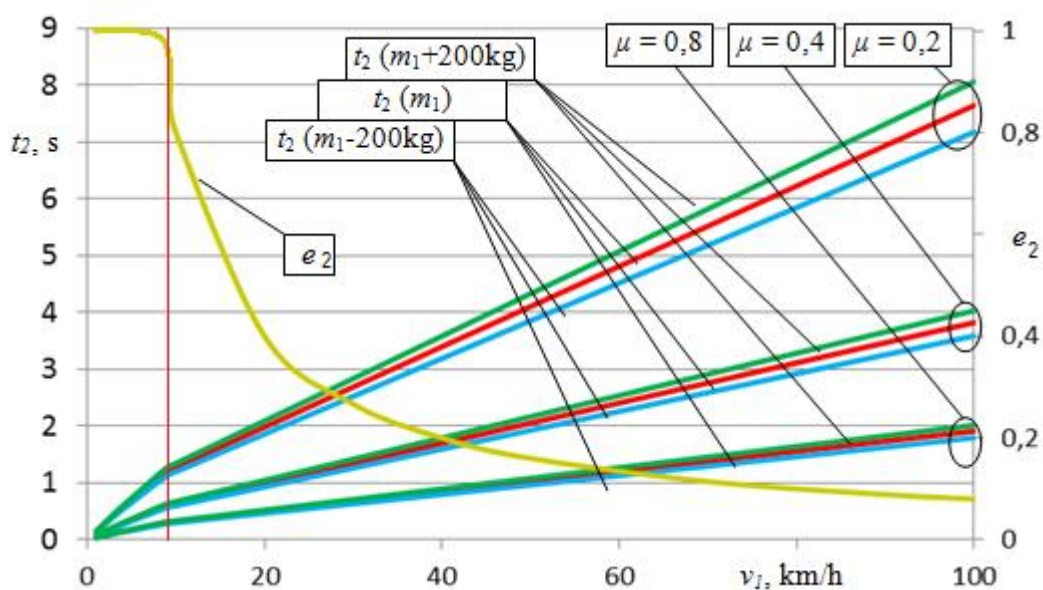
Grafike (27 pav.) taip pat atidedama raudona linija – riba, nuo kurios atsistatymo koeficiento vertė pradeda kristi nuo buvusios maksimalios vertės. Kol atsistatymo koeficientas lygus 1 – tai yra kai susidūrimo greitis nedidelis, kaip buvo minėta, atsitrnkęs automobilis po smūgio nejuda, o smūgį gavęs automobilis juda, todėl grafike galime matyti, kad tuo pačiu atsiranda ir sustojimo atstumas d_2 .

Sekantys grafikai (28 ir 29 pav.) išvedami iš katik nagrinėtų grafikų. Juose pavaizduota kiek laiko kiekvienas automobilis užtrunka, kol stabdydami nuvažiuoja atstumą d_1 d_2 .



28 pav. Pirmojo automobilio sustojimo trukmės t_1 priklausomybė nuo jo paties greičio prieš smūgį v_1 , keičiant jo masę m_1

Grafike, kuriame pateikta pirmojo automobilio sustojimo po smūgio d_1 priklausomybė (26 pav.), šis atstumas yra lygus 0 kol atsistatymo koeficientas lygus 1. Atitinkamai gauname, kad pirmojo automobilio sustojimo po smūgio trukmė t_1 šioje zonoje taip pat lygi 0 (28 pav.)

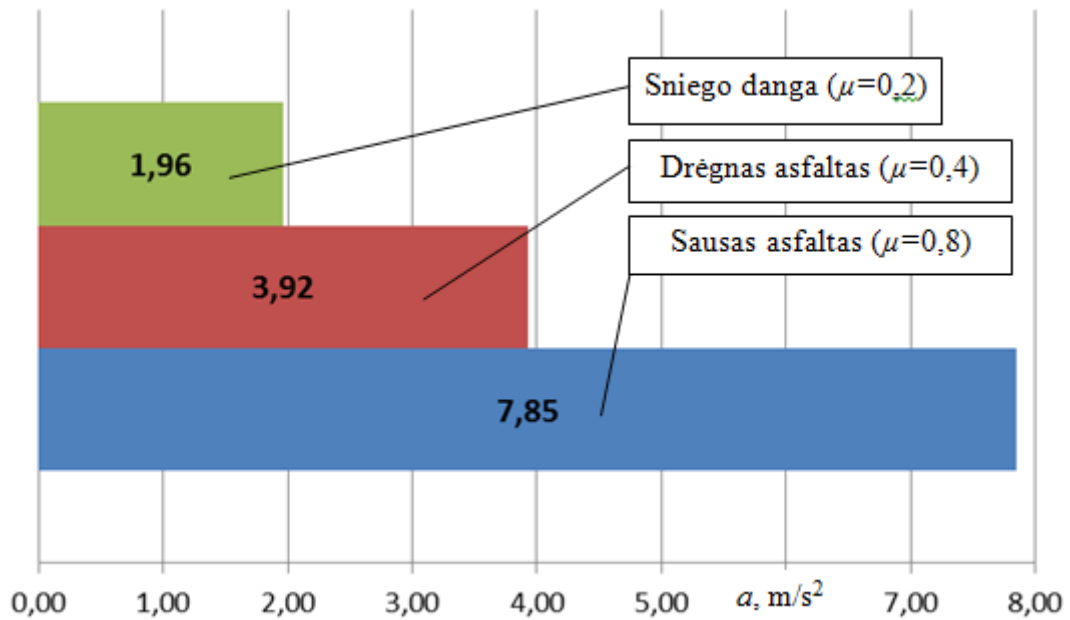


29 pav. Antrojo automobilio sustojimo trukmės t_2 priklausomybė nuo jo paties greičio prieš smūgį v_1 , keičiant jo masę m_1

Atitinkamai grafike, kuriame pavaizduota antrojo automobilio sustojimo po smūgio trukmės priklausomybė (29 pav.), zonoje, kur atsistatymo koeficientas lygus 1, šis laiko tarpas įgauna atitinkamas vertes.

Sustojimo trukmių t_1 ir t_2 priklausomybės nuo trinties koeficiento μ , pirmojo automobilio masės m_1 bei greičio v_1 , yra tokia pati kaip sustojimo atstumo tirtuose grafikuose (26 ir 27 pav.)

Galiausiai, taikant formules (62) (63), apskaičiuojama su koku pagreičiu, pasibaigus smūgiui, automobiliai lėtėjo. Rezultatai pateikiami 30-ame paveikslėlyje.



30 pav. Automobilių sustojimo pagreičių a priklausomybė nuo trinties koficiento tarp ratų ir kelio dangos

Automobilių greičiai po smūgio bei sustojimo trukmės yra skirtingos, tačiau sumoje gauname, kad abu automobiliai po smūgio lėtėja su tokiu pačiu pagreičiu esant tokiam pat trinties koficientui tarp ratų ir kelio dangos. Kuo didesnis trinties koeficientas, tuo greičiau sustojama, o trinties koeficientui padidėjus 2 kartus, sustojimo pagreitis taip pat padidėja 2 kartus.

4. REZULTATŲ PALYGINIMAS

Atlikti skaičiavimai pritaikomi rezultatų palyginimui su tikrų automobilių smūgio testais. Toliau pateikta informacija, iš tikrų automobilių smūgio testų, kurių susidūrimo eiga atitinka skaičiavimus (automobilis įvažiuoja į kitą, iki smūgio nejudėjusį automobilį, o automobilių ašys smūgio metu sutampa):

- Pirmasis automobilis ($m_1 = 1146$ kg; $k_1 = 886$ kN/m) įvažiuoja į iki smūgio nejudėjusį automobilį ($m_2 = 1495$ kg; $k_2 = 1564$ kN/m) greičiu $v_1 = 18$ km/h [14];
- Pirmasis automobilis ($m_1 = 1100$ kg; $k_1 = 1681$ kN/m) įvažiuoja į iki smūgio nejudėjusį automobilį ($m_2 = 1101$ kg; $k_2 = 872$ kN/m) greičiu $v_1 = 65$ km/h [15].

Automobilių duomenys iš šių testų suvedami į metodologinėje dalyje pateiktus skaičiavimus. Gauti apskaičiuoti bei iš atlikto realaus susidūrimo gauti rezultatai pateikiami 4.1. lentelėje.

4.1. lentelė

Realių ir apskaičiuotų rezultatų palyginimas

			Rezultatai iš realaus susidūrimo		Apskaičiuoti rezultatai	
			Automobilis nr.1	Automobilis nr.2	Automobilis nr.1	Automobilis nr.2
Testas nr.1 [14]						
Pradiniai duomenys	Masė, kg	m	1146	1495	--	--
	Standumas, kN/m	k	886	1564	--	--
	Greitis prieš smūgį, km/h	v	18	0	--	--
Rezultatas	Greitis po smūgio	u	14	10,4	14,6	11,1
Testas nr.2 [15]						
Pradiniai duomenys	Masė, kg	m	1100	1101	--	--
	Standumas, kN/m	k	1681	872	--	--
	Greitis prieš smūgį, km/h	v	65	0	--	--
Rezultatas	Greitis po smūgio	u	28,9	36,6	30,8	40,2

Gauta, kad pirmojo testu metu kai susidūrimo greitis yra mažesnis (18 km/h), paklaida tarp pirmojo automobilio greičio po smūgio gauto iš realaus susidūrimo tyrimo ir apskaičiuoto pagal surinktą metodiką yra ~4 %, o tarp antrojo – ~6 %.

Antrojo testo atveju, kai susidūrimo greitis yra didesnis (65 km/h), ši paklaida pirmajam automobiliui yra ~6,5 %, o antrajam – ~10 %.

Pagrindiniai dydžiai, kurie lemia paklaidas tarp skaičiavimų ir realių atvejų, yra tie, kurie skaičiavimuose laikomi pastoviais, o realiu atveju kinta keičiantis susidūrimo greičiui. Pirmasis jų – ribinis susidūrimo greitis v_0 , kuris skaičiavimuose nulemia tai, kad nuo tam tikro susidūrimo greičio atstatomųjų deformacijų dydis tampa pastovus, o antrasis dydis – bendras automobilio standumas k . Skaičiavimuose bendras automobilio standumas vertinamas kaip pastovus dydis, o realiu atveju šis dydis kinta keičiantis susidūrimo greičiui, nes esant mažesnėms ar didesnėms automobilių deformacijoms, deformuojasi skirtingi komponentai, kurių standumas yra labai įvairus.

Taigi pagal surinktą metodologinę medžiagą, šiame darbe ribinis susidūrimo greitis $v_0 = 4$ km/h. Pažiūrėkime kaip pasikeis skaičiavimo paklaidos iš 4.1. lentelės kuomet skaičiavimuose šį dydį pakeičiame į $v_0 = 3$ km/h. Rezultatai pateikti 4.2. lentelėje.

4.2. lentelė

Realių ir apskaičiuotų rezultatų palyginimas kai ribinis automobilių greitis $v_0 = 3$ km/h

			Rezultatai iš realaus susidūrimo		Apskaičiuoti rezultatai	
			Automobilis nr.1	Automobilis nr.2	Automobilis nr.1	Automobilis nr.2
Testas nr.1 [14]						
Pradiniai duomenys	Masė, kg	m	1146	1495	--	--
	Standumas, kN/m	k	886	1564	--	--
	Greitis prieš smūgį, km/h	v	18	0	--	--
Rezultatas	Greitis po smūgio	u	14	10,4	14,2	10,8
Testas nr.2 [15]						
Pradiniai duomenys	Masė, kg	m	1100	1101	--	--
	Standumas, kN/m	k	1681	872	--	--
	Greitis prieš smūgį, km/h	v	65	0	--	--
Rezultatas	Greitis po smūgio	u	28,9	36,6	31,1	40,9

Gauta, kad pirmojo testu metu kai susidūrimo greitis yra mažesnis (18 km/h), paklaida tarp pirmojo automobilio greičio po smūgio gauto iš realaus susidūrimo tyrimo ir apskaičiuoto pagal surinktą metodiką yra ~1,5 %, antrojo – ~4 %.

Antrojo testo atveju, kai susidūrimo greitis yra didesnis (65 km/h), ši paklaida pirmajam automobiliui yra ~7,5 %, o antrajam – ~12 %.

Taigi sumažinus ribinį automobilių greitį v_0 , esant mažesniai susidūrimo greičiui, paklaidos tarp realių ir apskaičiuotų automobilių greičių po smūgio sumažėjo, o esant didesniam susidūrimo greičiui – paklaidos padidėjo

5. IŠVADOS

Šiame darbe buvo tiriami dviejų susiduriančių automobilių dinaminiai parametrai smūgio metu bei po jo, žinant automobilių mases, bendrus standumus bei judėjimo greičius prieš smūgį. Atlikus tyrimą, galima padaryti sekančias išvadas:

- Atliekant naudotus matematinius skaičiavimus bei žinant tyrimo objektų mases, standumus bei greičius prieš smūgį, galima gana tiksliai apskaičiuoti dviejų susiduriančių automobilių, kurių ašys susidūrimo metu yra vienoje tiesėje, greičius po smūgio, esant nedideliems susidūrimo greičiams. Kai susidūrimo greitis yra 18 km/h, paklaida tarp skaičiavimų ir realaus atvejo yra apie 5 %, o susidūrimo greičiui esant 65 km/h – paklaida yra apie 8 %;
- Susidūrimo greičiui didėjant, paklaida tarp realių ir apskaičiuotų parametru didėja dėl dviejų priežasčių: pirmoji priežastis – skaičiavimo metodikoje priimta sąlyga apie atstatomųjų deformacijų dydį, kuris nuo tam tikro susidūrimo greičio tampa pastovus, o antroji priežastis – skaičiavimuose naudojamas atskirų automobilių bendras standumas. Skaičiavimuose bendras automobilio standumas naudojamas kaip pastovus dydis, o realiu atveju šis dydis kinta keičiantis susidūrimo greičiui (esant mažesnėms ar didesnėms automobilių deformacijoms, deformuojasi skirtingi komponentai, kurių standumas skiriasi);
- Lyginant realaus testo rezultatus su apskaičiuojamais bei priartėjimo būdu keičiant antrame punkte paminėtus dydžius, galima sumažinti skaičiavimo paklaidas;
- Palyginus realaus testo automobilių greičius po smūgio su tokiam pačiam atvejui apskaičiuotais, galima teigti, kad ir kitų apskaičiuotų parametru paklaidos yra panašios su greičių po smūgio paklaidomis;
- Nenaudojant kompiuterinių programų, galima gana tiksliai apskaičiuoti dviejų susiduriančių automobilių, kurių ašys susidūrimo metu yra vienoje tiesėje, greičius po smūgio. Apskaičiuota, kad didėjant susidūrimo greičiui, skaičiavimo paklaidos didėja ir maksimaliu palygintu atveju (kai susidūrimo greitis 65 km/h) yra ~10 %.

6. LITERATŪRA

1. „Coefficient of restitution of sports balls: A normal drop test“. Prieiga per internetą: < <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/36/1/012038/pdf> > [žiūrėta 2016-10-12]
2. „Automobilių smūgio testo vaizdinė medžiaga“. Prieiga per internetą: < <https://www.youtube.com/watch?v=IkX16uDkHm8> > [žiūrėta 2016-11-22]
3. „Determining the speed of vehicles before and after crash“. Prieiga per internetą: < http://pernerscontacts.upce.cz/22_2011/Tseveennamjil.pdf > [žiūrėta 2016-12-02]
4. „Linear Force Model in Car Accident Reconstruction“. Prieiga per internetą: < <https://arxiv.org/ftp/physics/papers/0511/0511127.pdf> > [žiūrėta 2016-12-02]
5. „A restitution model of two-car collinear collision“. Prieiga per internetą: < <http://www.fpz.unizg.hr/traffic/index.php/PROMTT/article/viewFile/928/778> > [žiūrėta 2016-12-02]
6. „Modeling of low speed, front to rear vehicle impacts“. Prieiga per internetą: < <https://www.brachengineering.com/content/publications/SAE-2003-01-0491-Brach-Engineering.pdf> > [žiūrėta 2016-11-12]
7. „The Determination of Vehicle Speeds from Delta-V in Two Vehicle Planar Collisions“. Prieiga per internetą: < <https://www.dora.dmu.ac.uk/bitstream/handle/2086/9826/Determining%20Real%20Speeds%20from%20DeltaV.pdf?sequence=1> > [žiūrėta 2016-11-12]
8. „Signal Analysis, Modeling and Simulation of Vehicle Crash Dynamics“. Prieiga per internetą: < <https://brage.bibsys.no/xmlui/handle/11250/136710> > [žiūrėta 2017-02-12]
9. „Accident analysis and evaluation of PC-Crash“. Prieiga per internetą: < <http://www.mate.tue.nl/mate/pdfs/5707.pdf> > [žiūrėta 2017-02-03]
10. „Consideration on the Behavior of Vehicle Side Impact“. Prieiga per internetą: < <http://www.wseas.us/elibrary/conferences/2014/CambridgeUSA/COMP/COMP-04.pdf> > [žiūrėta 2017-01-02]
11. „Stopping Distance for Auto“. Prieiga per internetą: < <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/crstp.html> > [žiūrėta 2017-03-08]
12. „Static and Kinetic Friction“. Prieiga per internetą: < http://ffden-2.phys.uaf.edu/211_fall2002.web.dir/ben_townsend/staticandkineticfriction.htm > [žiūrėta 2017-04-12]
13. „Kinematikos pagrindai“. Prieiga per internetą: < https://protas.pypt.lt/fizika/fizikos_teorijos_konspektas/kinematikos_pagrindai > [žiūrėta 2016-12-02]

14. „Low Speed Collinear Impact Severity: A Comparison Between Full Scale Testing and Analytical Prediction Tools with Restitution Analysis”. Prieiga per internetą:
< <http://papers.sae.org/2002-01-0540/> > [žiūrėta 2017-04-22]
15. „An Investigation into Vehicle Frontal Impact Stiffness, BEV and Repeated Testing for Reconstruction”. Prieiga per internetą:
< <http://papers.sae.org/930899/> > [žiūrėta 2017-04-22]