

LENGVŲJŲ SPORTINIŲ AUTOMOBILIŲ PRIEKINIO STABILIZATORIAUS PADĖTIES ĮTAKOS VAŽIAVIMO GREIČIUI VERTINIMAS PASITELKiant KOMPIUTERINES SIMULIACIJAS

Modestas CELIEŠIUS, Vytauto Didžiojo universiteto, Žemės ūkio akademija, Inžinerijos fakultetas,
el. paštas: modestas.celiesius@stud.vdu.lt

Egidijus KATINAS, Vytauto Didžiojo universiteto, Žemės ūkio akademija, Inžinerijos fakultetas,
el. paštas: egidijus.katinas@vdu.lt

Santrauka

Automobilių sporte ieškoma įvairiausių būdų sukurti kuo efektyvesnes važiuokles automobiliams, kurios padėtų pasiekti aukščiausius rezultatus. Tačiau nedidelio biudžeto komandoms sudėtinga naudotis brangiais simulatoriais. Todėl naudojami viešai prieinami simulatoriai (Assetto Corsa Competizione). Šio tyrimo tikslas yra atlikti sportinio automobilio priekinio stabilizatoriaus padėties bandymus, stebėti jų sudaromą įtaką automobilio greičiui pasitelkiant kompiuterines simuliacijas. Tokiu būdu galima sumažinti reikalingus finansinius ir laiko resursus, sunaudojamus automobilių sportui, pasitelkiant simuliacijas kaip įrankį siekiant šio rezultato. Tyrimo metu analizuojama sportinio automobilio Porsche GT3 CUP (992) važiuoklės komponento – stabilizatoriaus padėtis, naudojant lenktynių simulatorių. Keičiant stabilizatoriaus padėties poziciją, įvertinamas trasos laiko įveikimo laikas bei apskaičiuojamas stabilizatoriaus (arba stabilizatoriaus traukės) standumas (*stiffness at the wheel*), reiškiantis pakabos sistemos sukimo standumą ties ratu. Matuojamas N/mm – kada naudojama vertinant jėgą, reikalingą tam tikram ratų vertikaliam poslinkiui ir palyginamas su automobilio charakteristikose nurodytu parametru. Atlikus simuliacijas, lėčiausiai įveiktas ratas naudojant stabilizatorių 7-oje padėtyje dėl sukuriamos didžiausios pasipriešinimo jėgos. Automobilis greičiausiai įveikė ratą naudojant 1-ąją stabilizatoriaus padėtį, t. y. turinčią mažiausią pasipriešinimo jėgą. Lyginant apskaičiuotus ir automobilio charakteristikoje gautus duomenis, paklaidos svyravo tarp $\pm 1\%$. Toks simulatoriaus panaudojimas ir rezultatų tikslumas leidžia taupyti finansinius išteklius ir laiko sąnaudas, ypač reikalingas ruošiantis varžybų sezonui.

Reikšminiai žodžiai: sportinis automobilis, važiuoklė, kompiuterinė simuliacija, stabilizatorius, Porsche GT3 CUP (992).

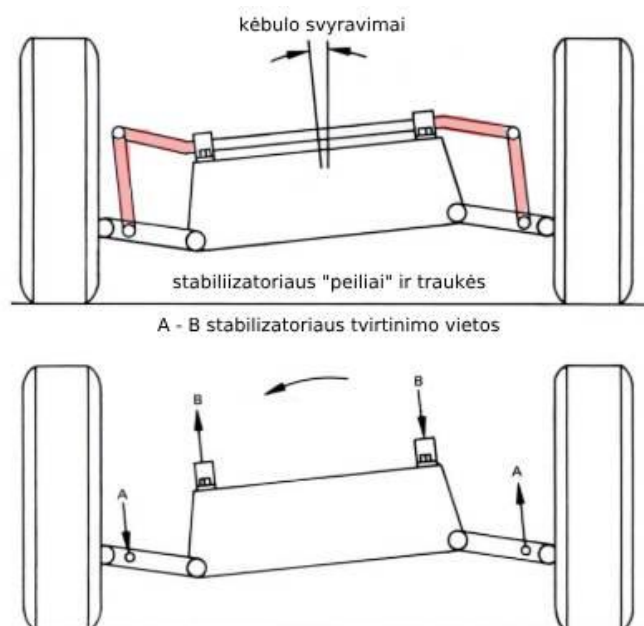
Įvadas

Automobilio važiuoklė yra komponentų grupės vienetą, kurį sudaro padangos, amortizatoriai, spyruoklės, traukės, svirtys, sferiniai guoliai, šarnyrai ir lankstai, skirti automobiliui suteikti kuo pastovesnį ir maksimalų sukibimo lygį su kelio danga, sumažinti kėbulo svyravimus ir slopinti jėgas, tenkančias automobiliui važiuojant kelio nelygumais (Jiregna, Sirata, 2020).

Priekinėje automobilio ašyje naudojama „McPherson“ konstrukcija (Felzien, Cronin, 1985). Šios konstrukcijos važiuoklės itin dažnai naudojamos standartiniuose ir kėbuliniuose automobiliuose, naudojamuose lenktynėse. Konstrukcija turi plačias reguliavimo galimybes. Skirtingais būdais galima keisti automobilio aukštį, svorio pasiskirstymą, ratų išvartimo kampą, važiuoklės kietumą ir daug kitų opcijų. Šio dizaino neigiami aspektai: automobilis negali būti toks žemas lyginant su kito tipo konstrukcijomis, dėl didesnio komponentų kiekio didėja „nespyruoklinis svoris“ (*unsprung weight*). Svarbu nepamiršti, kad sportinio automobilio važiuoklės reguliavimo galimybės yra ženkliai didesnės, tai reiškia, kad gatvėje naudojamame automobilyje galima pakeisti tik ratų suvedimą (Balkwill, 2018).

1 paveiksle pavaizduotas automobilio stabilizatoriaus veikimo principas, kai automobilio kėbulas svyruoja automobiliui judant posūkyje. Svyravimai perteikia apkrovą į keturis automobilio taškus „A-B“, prie kurių yra pritvirtintas automobilio stabilizatorius. Naudojant šią konstrukciją, apkrova yra perduodama į išorinį ratą posūkio metu, sumažinant kėbulo svyravimus ir paskirstant apkrovas abiem ratams (Phun, 1976). Reguluoti stabilizatoriaus kietumą galima trimis būdais: (1) naudojant didesnio arba mažesnio skersmens vamzdį, (2) keičiant stabilizatoriaus peties ilgį tarp tvirtinimų, arba (3) naudoti stabilizatorių su standumą reguliuojančiais „peiliais“. Pastarojo tipo stabilizatoriaus reguliavimas keičiant „peilio“ kampą yra aktualus dėl greito panaudojimo sportinėse lenktynėse, todėl ši važiuoklės konstrukcija pasirinkta šiame darbe.

Tobulėjant technologijoms, inžinieriai, siekdami aukščiausių rezultatų automobilių sporte, nuolat ieško įvairių būdų sukurti kuo efektyvesnes važiuokles automobiliams, kurios galėtų užtikrinti aukščiausią įmanomą automobilio stabilumą ir sukibimą su keliu, naudojant kompleksiškas važiuoklės konstrukcijas. Siekiant tai padaryti, automobilį reikia nuodugniai išbandyti, kiekvieną kartą atlikus važiuoklės nustatymų ar kitų komponentų pakeitimus, tačiau atliekant bandymus realybėje dėl didelio skaičiaus kintamųjų, bandymo sąlygų vienodumą užtikrinti ypatingai sudėtinga. Pagrindiniai kintamieji veiksniai: oro sąlygos, kelio dangos būklė, padangų nusidėvėjimas, ar degalų kiekis automobilyje (Kaikaris ir kt., 2008). Pasitelkiant simuliacijas automobilių sporte, galima sutaupyti daug laiko ir pinigų. Naudojant simulatorius, kintamąsias vertes pavertus į nekintamąsias, t. y. užtikrinant identiškas oro sąlygas visiems bandymams, tada sukibimo lygis išliktų identiškas visų bandymų metu. Galima atlikti ir ilgalaikius bandymus su kintamosiomis sąlygomis, simuliaciją atliekant ilgesnį laiką, siekiant paruošti automobilį ilgų distancijų lenktynėms (Zhang et al., 2025).



1 pav. Stabilizatoriaus veikimo principas. Šaltinis: sudaryta pagal (Phun, 2021)

Fig. 1 The operating principle of a Anti roll bar. Source: according to (Phun, 2021)

Automobilio kūrimui ir parametų nustatymui simuliacijas naudoja aukščiausio lygio „Formulės 1“ komandos, tačiau jų naudojamos programos nėra viešai prieinamos, kad nacionalinio lygio lenktynių komandos galėtų jomis naudotis. Viešai prieinami simulatoriai, tokie kaip „Assetto Corsa Competizione“ (Assettocorsa, 2019 m.)– palengvina virtualių bandymų prieinamumą nacionalinėms komandoms.

Šio darbo tikslas – pasitelkiant simulatorių „Assetto Corsa Competizione“, išsiaiškinti automobilio „Porsche GT3 CUP (992)“ važiuoklės stabilizatoriaus padėties įtaką lenktynių rato įveikimo laikui.

Šiam tikslui pasiekti sprendžiami šie **uždaviniai**:

1. Automobilio „Porsche GT3 CUP (992)“ atliekami bandymai simulatoriuje „Assetto Corsa Competizione“.
2. Keičiant priekinio stabilizatoriaus padėtį, atlikti simuliacijas ir įvertinti automobilio trasos įveikimo laiką.
3. Gauti simulatoriaus duomenys palyginami su gamintojo teikiamais rezultatais techninėje automobilio knygoje.

Tyrimų objektas ir metodika

Tyrimo objektas „Assetto Corsa Competizione“ (ACC) simulatorius ir „Motec I2“ (Motec Europe Ltd., 2019) duomenų analizei skirta programa. „ACC“ programoje pasirenkamas „Porsche GT3“ automobilis ir parenkama Austrijos, „Redbull ring“ trasa. Parenkama lauko temperatūra 27 °C, trasos dangos temperatūra 28 °C.

Visų pirma, prieš atliekant tyrimą yra svarbu sureguliuoti automobilio važiuoklę, atitinkamai pagal tai, kokie yra numatytieji nustatymai pateikti automobilio techninėje knygoje – „default setup“. Parenkami automobilio telemetriniai duomenys, priklausomai nuo automobilio važiuoklės geometrijos, amortizatorių nustatymų ir t.t. 2 paveiksle pateikti numatytieji automobilio nustatymai, kurie nurodo degalų kiekį automobilyje, galinio sparno poziciją, pradinę padangų slėgį, automobilio važiuoklės geometriją.

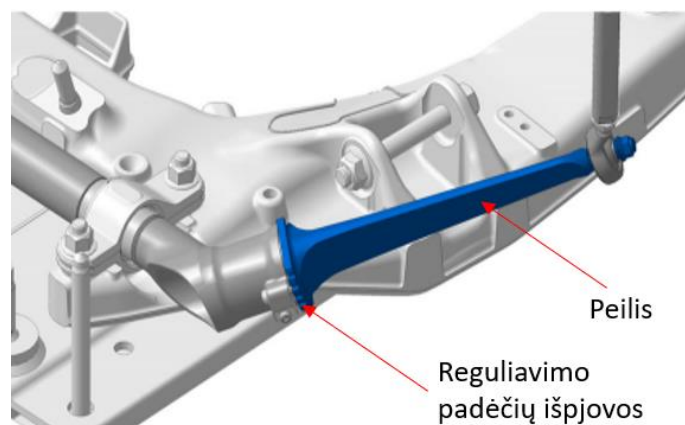
		Front axle	Rear axle
Tank volume		Priekinė ašis	Galinė ašis
Driver weight			
Pos. rear wing.			
Tyres		Michelin SBM 30/65-18	Michelin SBM 31/71-18
Rim		APP Tech 12.0 x 18	APP Tech 13.0 x 18
Brake	Brake caliper	Brembo	Brembo
	Brake disc	380 mm	380 mm
	Brake pad	Pagid	Pagid
Inflation pressure 1 bar = 14.5035 psi		1.85	
Ride height (slicks 1.85 bar)		80.0	113.0
Anti-roll bar pos. (left/right)		3/3	4/4
Camber (deg)		-4.20	-3.70
Toe (min) per wheel		-1.0	+2.0

2 pav. Numatytieji automobilio nustatymai paruošiant automobilį simuliacijai. Šaltinis: sudaryta pagal Technical manual (2022)

Fig. 2 Default car settings when preparing the car for simulation. Source: according to Technical manual (2022)

Atliekami pakeitimai priekiniam stabilizatoriui (žr. 3 pav.). Komponentas išbandomas penkiomis skirtingomis padėtimis. Keičiant stabilizatoriaus peilio kampą gaunama skirtinga pasipriešinimo jėga. „Peilis“ yra pagrindinis šio komponento reguliavimo elementas. Pakeitus peilio poziciją, keičiasi stabilizatoriaus veikimo kampas, o tai tiesiogiai daro įtaką jo standumui. Esant stačiam kampui su pagrindu, bus generuojama daugiau pasipriešinimo jėgos svyruojančiam kėbului ir peiliui esant horizontalioje padėtyje, bus sukurama mažiau pasipriešinimo jėgos svyruojančiam kėbului. Šio komponento veikimą galimaulyginti su įprasto peilio lenkimu. Kai peilis yra vertikaloje padėtyje, o lenkimas vyksta gniuždant arba tempiant pjovimo briauną, jo deformacijai reikalinga itin didelė jėga. Peilį lenkiant į šonus, jį lankstyti yra itin nesudėtinga ir tam nereikia didelės apkrovos.

Siekama nustatyti, ar šie nustatymai atitiks gamintojo nurodytus parametrus. Programoje atliekamos dirbtinio intelekto vairuotojo simuliacijos. Dirbtinio intelekto vairuotojas naudojamas dėl rezultato pastovumo ir patikimumo. Su kiekvienu norimu nustatymu privaloma, kad būtų įveikti bent trys lenktynių trasos ratai siekiant gauti kuo tikslesnius ir objektyvius rezultatus. Paleidus simuliacijas, duomenys įrašomi ir automatiškai pritaikomi „Motec i2“ programai, kur vėliau atliekama jų analizė, stebimi stabilizatoriaus eigos ir važiuoklės eigos duomenys. Pagal juos apskaičiuojama, ar rezultatai atitinka gamintojo pateiktus parametrus keičiant stabilizatoriaus padėtį. Atliekant tyrimą svarbu užtikrinti, kad pradinis padangų slėgis būtų naudojamas 1.85 bar, ir padangoms pasiekus tinkamą darbinę temperatūrą t.y. 60–90 °C. Naudojamas optimalus 2.0–2.1 bar oro slėgis padangose pagal numatytas „Michelin“ padangų gamintojo charakteristikas.



3 pav. Regiuojamas priekinis stabilizatorius Šaltinis: sudaryta pagal Technical manual (2022)

Fig. 3 Adjustable front stabiliser Source: according to Technical manual (2022)

Tyrimas atliekamas naudojant numatytuosius automobilio parametrus, parametrai viso tyrimo privalo būti išlaikomi identiškais. Keičiama tik priekinio stabilizatoriaus kampo padėtis. Atliekami penki bandymai. Kiekvieno bandymo metu lenktynių trasoje įveikiami trys ratai ir duomenys yra įrašomi į atskirą dokumentą numeruojant bandymo sekos numerį ir komponento padėties numerį. Naudojamos stabilizatoriaus padėties: 1, 2, 3, 5, 7.

Šie duomenys yra importuojami į „Motec I2“ programinę įrangą. Įkėlus pasirinktą duomenų paketą, programoje reikia nustatyti, kad programa pateiktų grafikus, skirtus parodyti automobilio greitį, vairo padėties kampą ir priekinės važiuoklės eigą. Siekiant apskaičiuoti stabilizatoriaus kietumą pagal jo padėtį, reikia įvertinti stabilizatoriaus eigą ir tuo metu apkrovą, tenkančią stabilizatoriui. Priekinio kairiojo (L_K) ir dešiniojo (L_D) stabilizatoriaus eiga apskaičiuojama pagal formules:

$$L_K = SUS_TRAVEL_LF \times 0.9 \quad (1)$$

$$L_D = SUS_TRAVEL_RF \times 0.9 \quad (2)$$

Čia: SUS_TRAVEL_LF – Priekinio kairiojo amortizatoriaus eiga,

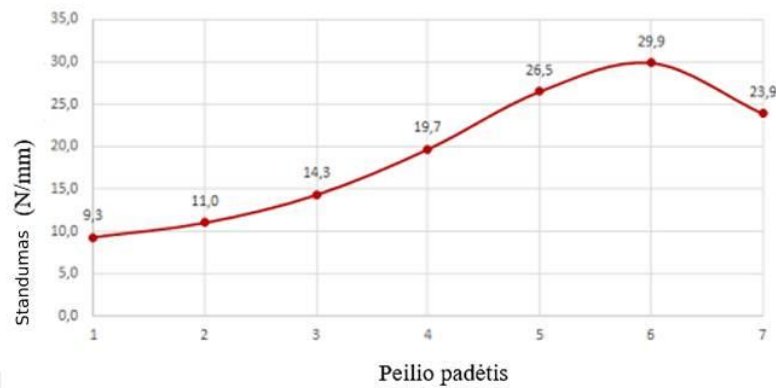
SUS_TRAVEL_RF – Priekinio dešiniojo amortizatoriaus eiga.

Tuomet naudojama formulė, kuria apskaičiuojama apkrovimo jėga (F_{Stb}), tenkanti automobilio stabilizatoriui važiuojant trasa:

$$F_{Stb} = \frac{G \times m \times h}{k} \quad (3)$$

čia: G – šoninė pagreičio komponentė iš akcelerometro duomenų [m/s^2], m – priekinės ašies masė (504 kg), h – automobilio masės centro aukštis (0.415 m), k – priekinės ašies plotis (1.684 m).

Naudojantis 1–3 formulėmis, gaunama stabilizatoriaus eiga bei jėga apkraunanti stabilizatorių.



4 pav. Priekinio stabilizatoriaus standumo kitimas pagal parinktą padėtį

Fig. 4. The front stabilizer stiffness graph based on the selected position

Apskaičiavus stabilizatoriaus eigą ir jėgą, apkraunančią stabilizatorių, galima apskaičiuoti jo standumą (žr. 4 pav.). Pagal šį parametą informacija yra tikrinama, ar duomenys simulatoriuje atitinka pateiktus automobilio techninėje knygoje. Pateiktame grafike vaizduojama stabilizatoriaus standumo priklausomybė nuo peilio nustatytos padėties tam, kad būtų galima įvertinti pokyčius kiekvienoje padėtyje ir jų sudaromus skirtumus galutiniam rezultatui.

Tyrimų rezultatai ir jų aptarimas

Įvertinus „Force on swaybar“ ir „Stiffness at wheel“ santykį kartu su stabilizatoriaus eiga, gaunama eigos vertė 24.9 mm. Gauta apkrova stabilizatoriui yra 274.24 N, kuri yra padalinama iš 11 N – standumo antroje jo padėtyje ir taip yra gaunama teorinė stabilizatoriaus eiga kurios paklaida siekia 0.24 proc., lyginant su gautąja eiga iš surinktų duomenų. Šis rezultatas leidžia tiksliai įvertinti važiuoklės stabilizatoriaus įtaką automobilio dinamikai. Bendrosios paklaidos vidurkis tyrimo metu turi neviršyti 1 proc., norint simulatorių naudoti kaip įrankį ir teisingai sureguliuoti sportinį automobilį ir kitoms lenktynių trasoms. Šį tyrimą būtų galima papildyti atlikus tokio paties tipo bandymus su galinės ašies automobilio stabilizatoriumi, amortizatoriais ar galiniu sparnu generuojančiu prispaudžiamąją jėgą automobiliui bei stebėti, kaip šie nustatymai pakeistų duomenis, gaunamus iš automobilio.

Naudotos stabilizatoriaus padėties buvo: 1, 2, 3, 5, 7. Bandymai atlikti tik šiose padėtyse, kadangi didinant stabilizatoriaus standumą rato įveikimo laikas prastėjo.

Apskaičiavus stabilizatoriaus eigą ir jėgą, apkraunančią stabilizatorių, apskaičiuotas priekinio stabilizatoriaus standumas. Stabilizatorių nustačius antroje padėtyje, gaunama vertė 24.84 mm, tai yra stabilizatoriaus eiga duotuoju momentu, nes stabilizatoriaus eiga ir apkrova kinta, atitinkamai nuo automobilio greičio, posūkio kampo ir t.t. Duomenys buvo lyginami ir skaičiuojami viso bandymo metu ir lyginamas atitikimas su gamintojo pateiktais duomenimis. Vidutinė surinktų duomenų paklaida yra 0.24 proc. (stabilizatoriui esant antrojejoje padėtyje). Gauti paklaidų rezultatai kiekvienai stabilizatoriaus padėčiai ir pateiktos vidutinės paklaidos gautos skaičiavimų metu (žr. 1 lentelę).

1 lentelė Stabilizatoriaus standumo paklaidos įvairiose padėtyse

Table 2. Stabilizer stiffness errors in various positions

Padėtis	Pokytis, %
1-oji	+0.45
2-oji	-0.24
3-oji	+0.78
4-oji	-0.32
5-oji	+1.00

Apskaičiuotos reikšmės skirtingose stabilizatoriaus padėtyse svyruoja, lyginant su techniniu vadovu (Technical manual, 2022 m.). Kai kuriose padėtyse jos yra neigiamos, o kai kuriose – teigiamos. Tai siejama su eksperimentinių duomenų tikslumu, modeliavimu ir skaičiavimo metodika. Keičiant priekinio stabilizatoriaus padėtį, kito vidutinis rato įveikimo laikas. Greičiausiai įveiktas ratas truko 1:31:9, naudojant pirmąją stabilizatoriaus padėtį, t.y. turinčią mažiausią pasipriešinimo – standumo jėgą (pirmoji peilio padėtis turi mažiausią standumą). Lėčiausiai įveiktas ratas 1:32:9, naudojant stabilizatorių septintoje padėtyje, su didžiausia pasipriešinimo jėga, lyginant su pasirinktomis stabilizatoriaus padėtimis atliekant bandymus. Darant šiuos pakeitimus – keičiant stabilizatoriaus padėtį toliau, rato įveikimo laikas didėjo.

Atsižvelgiant į gautus rezultatus ir nedideles rezultatų paklaidas, kurios neviršija 1 proc., lyginant su gamintojo pateiktais komponentų duomenis galima teigti, kad šis būdas skirtas automobilio važiuoklės sureguliuojimui pasitelkiant simuliacijas yra pakankamai tikslus įrankis naudotis būtent šiuo metodu.

Išvados

1. Atlikus automobilio „Porsche GT3 CUP (992)“ bandymus simulatoriuje „Assetto Corsa Competizione“, su keliais skirtingais priekinio stabilizatoriaus nustatymais, galima pastebėti skirtingos važiuoklės ir stabilizatoriaus eigos įtaką automobilio važiavimui.
2. Automobilis greičiausiai įveikė ratą, naudojant 1-ąją stabilizatoriaus padėtį, t.y. turinčią mažiausią pasipriešinimo jėgą. Lėčiausiai įveiktas ratas naudojant stabilizatorių 7-oje padėtyje, su didžiausia pasipriešinimo jėga. Lyginant apskaičiuotus ir automobilio charakteristikoje gautus duomenis, paklaidos svyravo tarp ± 1 proc. Pagrindinė šių paklaidų atsiradimo priežastis galėtų būti neturėjimas tikslaus masės centro aukščio matmens, tai ir gali indikuoti neatitikimus skaičiams po kablelio.
3. Simulatorių „Assetto Corsa Competizione“ ir programą „Motec I2“ galima naudoti kaip įrankį, siekiant tinkamai sureguliuoti automobilio važiuoklę. Nustatyta, kad simuliacijos rezultatai atitinka gamintojo teikiamus duomenis su variacija, todėl simulatorius gali būti laikomas tinkamu įrankiu važiuoklės reguliavimo analizei.

Literatūra

1. Assettocorsa, 2019 m. Prieiga per internetą: <https://assettocorsa.gg/assetto-corsa-competizione/> (žiūrėta 2025-03-16).
2. Balkwill J. (2011), Performance vehicle dynamics: Engineering and applications, Elsevier Science, 360 p.
3. Perel D. – Assetto corsa competizione: a racing driver's take (2019) prieiga per internetą: <https://davidperel.net/assetto-corsa-competizione-alpha-a-racing-drivers-take/> (žiūrėta 2025-03-16).
4. Felzien M.L., Cronin D.L., (1985), Steering error optimization of the MacPherson Strut automotive front suspension, *Mechanism and Machine Theory*, 20, 17-26, [https://doi.org/10.1016/0094-114X\(85\)90054-0](https://doi.org/10.1016/0094-114X(85)90054-0).
5. Jiregna I., Sirata G., (2020), A review of the vehicle suspension system, *Journal of Mechanical and Energy Engineering*, 4 (44), 109-114, <https://doi.org/10.30464/jmee.2020.4.2.109>.
6. Kaikaris P., Bružas A., Basakirskas A., Mačiulis A., Automobilių remontininko rengimas (2008), Profesinio mokymo metodikos centras.
7. Puhn, F. (1987). *How to Make Your Car Handle: Pro Methods for Improved Handling, Safety and Performance*. Penguin.
8. Motec Europe Ltd., (2019), Prieiga per internetą: <https://www.motec.com.au/> (žiūrėta 2025-03-17).
9. Technical Manual (2022), Porsche Motorsport North America Inc.
10. Zhang S., Zhao C., Zhang Z., Lv Y., (2025), Driving simulator validation studies: A systematic review. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 138, 102030, <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2024.103020>

EVALUATION OF THE INFLUENCE OF THE FRONT STABILIZER POSITION ON THE DRIVING SPEED OF LIGHT SPORTS CARS USING COMPUTER SIMULATIONS

Abstract

The main goal of this research is to minimise the needed financial and time resources that are invested into autosport using simulator as a tool to reach this desired result. Main problem rises from the reason being that it is hard to correctly setup and optimise a racing vehicle, and its suspension components, because it is nearly impossible to test the vehicle under identical circumstances regarding ever changing conditions. This is where simulation comes into play, because it allows using identical conditions under all times, and only the settings of a certain are changed and monitored to see what results does this provide and if are these results are viable and related to data provided by the vehicle manufacturer. During the testing lap times were evaluated and compared to how the car was set up, data was analysed and accounted for any miscalculations. The outcome of this test proved to be that this simulation method for testing can be used a proper tool trying to save time and money trying to perfect and optimise the setup of a selected race car.

Keywords: sports car, chassis, computer simulation, stabilizer, Porsche GT3 CUP (992).