



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS**

Justinas Eglynas

**HIBRIDINIO AUTOMOBILIO ENERGIJOS REGENERAIVIMO
TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Doc. dr. Darius Juodvalkis

KAUNAS, 2015

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS

HIBRIDINIO AUTOMOBILIO ENERGIJOS REGENERAVIMO
TYRIMAS

Baigiamasis magistro projektas
Transporto priemonių inžinerija (621E20001)

Vadovas

(parašas) Doc. dr. Darius Juodvalkis
(data)

Recenzentas

(parašas) Prof. dr. Alvydas Kondratas
(data)

Projektą atliko

(parašas) Justinas Eglynas
(data)

KAUNAS, 2015

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS
TRANSPORTO INŽINERIJOS KATDERA

Suderinta:

2015 m. vasario mėn. 6 d.

MAGISTRO BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS

Išduota studentui: *Justinui Eglynui*

1. Darbo tema: Hibridinio automobilio energijos regeneravimo tyrimas

Research on hybrid car energy regeneration

Patvirtinta: 2015 m. gegužės mėn. 11 d. dekanų įsakymu Nr. ST17-F-11-2

2. Darbo tikslas: ištirti hibridinio automobilio stabdymo procesą ir nustatyti regeneruojamos energijos kieki, esant skirtingo intensyvumo stabdymui.

3. Darbo uždaviniai ir reikalavimai:

1. Apžvelgti hibridinių automobilių sandarą, jų tipus ir juose naudojamus komponentus.
2. Atlikti natūrinius hibridinio automobilio stabdymo eksperimentus, jų metu matuojant automobilio dinامينius parametrus bei į bateriją regeneruojamą energiją.
3. Ištirti eksperimentų rezultatus:
 - Nustatyti vėjo įtaką;
 - Nustatyti konkretaus atvejo ratų pasipriešinimo riedėjimui jėgą;
 - Apskaičiuoti regeneruotos energijos kieki.
4. Surasti stabdymo režimą, kurio metu regeneruojamas didžiausias energijos kiekis į traukos bateriją.

4. Darbo konsultantai (nurodant projekto skyrius)¹:

5. Užduoties išdavimo terminas: 2015 m. vasario mėn. 6 d.

Užbaigto darbo pateikimo terminas: 2015 m. gegužės mėn. 29 d.

Vadovas: _____

(vardas, pavardė)

(parašas)

Užduotį gavau : _____

(studento vardas, pavardė)

(parašas)

¹ Esant reikalui, suderinus su katedros vedėju



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Mechanikos inžinerijos ir dizaino

(Fakultetas)

Justinas Eglynas

(Studento vardas, pavardė)

Transporto priemonių inžinerija (621E20001)

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Hibridinio automobilio energijos regeneravimo tyrimas“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

2015 m. Gegužės 28 d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano, **Justino Eglyno**, baigiamasis projektas tema „Hibridinio automobilio energijos regeneravimo tyrimas“ 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)

Eglynas, J. Hibridinio automobilio energijos regeneravimo tyrimas. *Sausumos transporto inžinerijos magistro* baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Darius Juodvalkis; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Kaunas, 2015. 62 p.

SANTRAUKA

Šio baigiamojo darbo tikslas – ištirti hibridinio automobilio stabdymo procesą ir nustatyti regeneruojamos energijos kieki, esant skirtingo intensyvumo stabdymui.

Teorinėje darbo dalyje aptariami hibridinių automobilių tipai, atsižvelgiant į naudojamos technologijos lygį, analizuojama jų sandara. Detaliau nagrinėjami hibridinio automobilio komponentai, naudojami regeneruoti energijai gauti.

Tyrimų metodikos dalyje aprašomos eksperimentų atlikimo sąlygos ir naudota matavimo įranga. Įvertinama vėjo greičio įtaka, kuri nustatoma iš riedėjimo neutralia pavara eksperimentų ir priimama jo reikšmė lygi 1 m/s. Šių eksperimentų metu taip pat nustatoma pradinė ratų pasipriešinimo riedėjimui koeficiento reikšmė – 0,008195 ir pateikiama rezultatų apskaičiavimo metodika.

Rezultatų aptarimo dalyje pateikiami eksperimentų metu gauti ir apskaičiuoti kinetinės energijos pokyčio – ΔE_k , sunaudoto aerodinaminei – E_{aer} , pasipriešinimo riedėjimui – E_r jėgoms, frikciniam stabdymui – E_{stab} ir regeneruoto į traukos bateriją – E_{ibat} energijos kiekiai. Išanalizavus gautus rezultatus didžiausia regeneruojamo energijos kiekio reikšmė lygi 0,11468 kWh, stabdant vidutiniu 0,78409 m/s² pagreičiu. Šiuo pagreičiu stabdant, iš turėto kinetinės energijos kiekio net 67,66 procento regeneruojama į traukos bateriją, o likusi energijos dalis sunaudojama – nugalėti pasipriešinimo jėgas ir stabdymui frikciniiais stabdžiais.

Raktiniai žodžiai: regeneracinis stabdymas, hibridinis automobilis, stabdymo pagreitis, traukos baterija.

Eglynas, J. Research on hybrid car energy regeneration. *Vehicle engineering master program* final project / supervisor doc. dr. Darius Juodvalkis; Kaunas University of Technology, Faculty of mechanical engineering and design.

Kaunas, 2015. 62 p.

SUMMARY

The aim of this thesis is to research the braking process of hybrid car and to measure the amount of regenerated energy when braking intensity is uneven.

In the theory of this thesis discusses the types of hybrid cars, based on level of technology used to make them. Particular are analyzed those components of the hybrid car which are used to produce the regenerated energy.

In the part about research methods describes the measuring equipment used for experiment and also the conditions of experiment. The influence of the wind speed is estimated from the roll on free gear it was made equal to 1 m/s. During these experiments the primary wheel resistance coefficient value which is 0,008195 and also methodology part describes the result getting ways.

Finally in the result part shows the values which are counted during the experiments with kinetic energy alteration – ΔE_k , used for aerodynamic – E_{aer} , ride resistance – E_r force, frictional braking – E_{stab} and the regenerated to battery power thrust amount – E_{ibat} .

Conclusions shows that the biggest regenerated amount of energy value is equal to 0,11468 kWh when braking in the average 0,78409 m/s² acceleration. When braking in this specific acceleration from given amount of kinetic energy 67,66 % regenerates into thrust battery and the other amount of the energy is used to overcome the force of resistance and to brake using frictional brakes.

Key words: regenerative braking, hybrid car, braking acceleration, traction battery.

TURINYS

ĮVADAS	8
1. TECHNINĖ APŽVALGA	10
1.1 Hibridinių automobilių perspektyvos	11
1.2 Hibridinių automobilių tipai	13
1.3 Atkinsono ciklas hibridinio automobilio VDV	18
1.4 Hibridinių automobilių traukos baterijos	19
1.5 Regeneracinė stabdymo sistema (RSS)	22
1.6 Hibridinio automobilio transmisija	25
1.7 Hibridinių automobilių elektros varikliai	27
1.8 Elektroninis galios modulis	29
2. TYRIMO METODIKA	31
2.1 Eksperimentuose naudota įranga	31
2.2 Eksperimentų atlikimo sąlygos ir režimai	37
2.3 Vėjo greičio įtakos nustatymas	40
2.4 Pradinio pasipriešinimo riedėjimui koeficiento nustatymas	43
2.5 Energijos kiekio, reikalingo pasipriešinimo jėgoms, frikciniams stabdžiams ir regeneruoto į traukos bateriją jo kiekio nustatymas	45
2.5.1 Pasipriešinimo jėgoms išnaudoto energijos kiekio nustatymas	46
2.5.2 Į traukos bateriją regeneruoto energijos kiekio nustatymas	47
2.5.3 Kinetinės energijos ir reikalingo frikciniams stabdžiams energijos kiekio nustatymas	48
3. REZULTATŲ ANALIZĖ	50
3.1 Stabdymo metu gauti energijos kiekio rezultatai	50
3.2 Optimalaus pagreičio ir $E_{ibat} / \Delta E_k$ santykio nustatymas	57
3.3 Gautų rezultatų patikimumas	59
IŠVADOS IR REKOMENDACIJOS	60
INFORMACINIŲ ŠALTINIŲ SĄRAŠAS	61

IVADAS

Temos aktualumas. Žmonės pradeda suprasti ekonomiškumo ir ekologijos naudą. Pažvelgus į statistinius duomenis pasaulyje matoma tendencija, kad hibridinių ir elektrinių automobilių skaičius didėja. Elektromobilio privalumas, kad įveikti tokį patį atstumą yra pigiau nei hibridiniu automobiliu, tačiau elektromobilis turi trūkumą – dėl vis dar ribotos jo traukos baterijų talpos nepavyksta įveikti didelių atstumų. Hibridiniu automobiliu galima keliauti ilgus atstumus, kadangi gali būti varomas vidaus degimo varikliu, elektros varikliu ar abiem kartu. Hibridinio automobilio privalumas – regeneracinis stabdymas. Šio proceso metu dalis stabdymui reikalingo energijos kiekio regeneruojama į traukos bateriją. Regeneruota energija naudojama sukurti el.variklį.

Hibridiniu, lyginant su įprastiniu vidaus degimo varikliu varomu automobiliu, galima sunaudoti 10 – 100 % mažiau kuro, priklausomai nuo hibridinio automobilio technologinio lygio ir važiavimo režimo. Siekiantiems ekonomiškumo svarbus stabdymo metu regeneruojamas energijos kiekis. Esminė problema, koku pagreičiu stabdyti automobilį, kad būtų regeneruojamas didžiausias energijos kiekis į bateriją.

Nagrinėjama problema keliama klausimu: koku pagreičiu stabdomas hibridinis automobilis regeneruotų didžiausią energijos kiekį į traukos bateriją.

Darbo objektas – hibridinis Toyota Prius automobilis.

Darbo tikslas – ištirti hibridinio automobilio stabdymo procesą ir nustatyti regeneruojamos energijos kiekį, esant skirtingo intensyvumo stabdymui.

Baigiamojo darbo uždaviniai:

5. Apžvelgti hibridinių automobilių sandarą, jų tipus ir juose naudojamus komponentus.
6. Atlikti natūrinius hibridinio automobilio stabdymo eksperimentus, jų metu matuojant automobilio dinaminis parametrus bei į bateriją regeneruojamą energiją.
7. Ištirti eksperimentų rezultatus:
 - Nustatyti vėjo įtaką;
 - Nustatyti konkretaus atvejo ratų pasipriešinimo riedėjimui jėgą;
 - Apskaičiuoti regeneruotos energijos kiekį.
8. Surasti stabdymo režimą, kurio metu regeneruojamas didžiausias energijos kiekis į traukos bateriją.

Darbo struktūra. Darbą sudaro trys pagrindinės dalys.

Pirmojoje (techninės apžvalgos) dalyje aptariami hibridinių automobilių tipai, atsižvelgiant į naudojamą technologijos lygį, išanalizuojama jų sandara. Detaliau nagrinėjami hibridinio automobilio komponentai, naudojami regeneruoti energijai gauti.

Antrojoje (tyrimų metodikos dalyje) aprašomos eksperimentų atlikimo sąlygos, matavimo įranga. Šioje dalyje pateikiamas vėjo greičio ir krypties įtakos įvertinimas pasipriešinimo jėgų dedamajai, nustatomas pradinis kelio pasipriešinimo riedėjimui koeficientas ir pateikiama rezultatų apskaičiavimo metodika.

Trečiojoje (rezultatų aptarimo) dalyje pateikiami eksperimentų metu metu gautos bei apskaičiuotos kinetinės energijos pokyčio ΔE_k , sunaudoto aerodinaminei – E_{aer} , pasipriešinimo riedėjimui – E_r jėgoms, frikciniam stabdymui – E_{stab} ir regeneruoto į traukos bateriją – E_{ibat} energijos kiekio vertės. Analizuojami gauti rezultatai bei nustatomas optimalus stabdymo pagreitis, kurio metu regeneruojamas didžiausias energijos kiekis į traukos bateriją. Nustatomos gautų rezultatų patikimumas.

Darbo metodai. Siekiant atskleisti problemą, baigiamajame darbe atliekama mokslinės literatūros ir internetinių šaltinių analizė. Praktiškai nustatyti regeneruoją energijos kiekį, pasinaudota hibridiniu automobiliu Toyota Prius (XW30) ir matavimo prietaisais: oscilografu „Picoscope 3423 su srovės replėmis ir dinaminių parametrų matavimo prietaisu „DL1 Data Logger“.

1. TECHNINĖ APŽVALGA

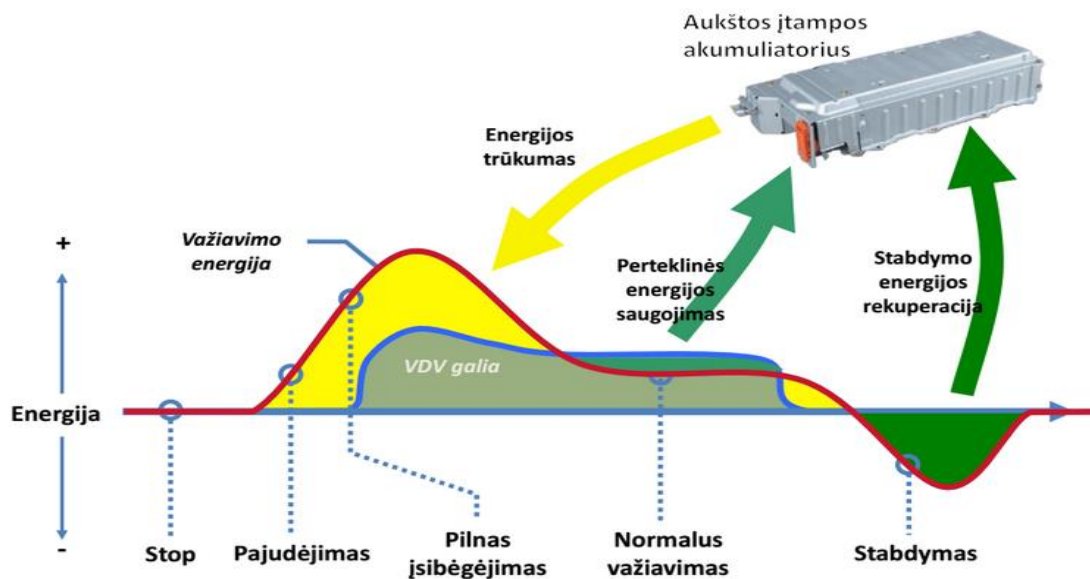
Hibridinis automobilis (toliau HA) – automobilis, naudojantis vidaus degimo variklį (toliau VDV) ir integruotą pakartotinai įkraunamą energijos saugojimo sistemą, kad būtų efektyviau naudojami degalai ir automobilis nebūtų apribotas atstumo iki įkrovimo kolonėlės, kaip elektromobiliai, kurie naudoja baterijas, įkraunamas išorinių įkroviklių [14]

Hibridinę pavarą gali sudaryti:

- Turbina ir elektros variklis;
- VDV ir hidraulinės mašinos arba mechaninės energijos akumulatoriai (pvz., dideli smagračiai);
- VDV ir elektros variklis.

Lengvuosiuose automobiliuose dažniausiai naudojama vidaus degimo ir elektros variklių komponuotė. Hibridiniuose automobiliuose el. variklis padeda VDV veikti ekonomiškiau. Priklausomai nuo pasirinkto važiavimo režimo (spaudžiamo akseleratoriaus pedalo) automobilis varomas VDV ir/arba elektrinio variklio. Elektros variklis (toliau EV) yra palaikomas nedidelės talpos, įkraunamos traukos baterijos – važiuojant EV (vien elektra) režimu nuvažiuojamas atstumas siekia apie 4km (Toyota Prius 3 kartos). Pačios baterijos įkraunamos regeneraciniu stabdymu– automobiliui stabdant jo judėjimo kinetinė energija yra paverčiama elektros energija.

Hibridinio automobilio naudingumas pasireiškia stop/start situacijose, kada regeneraciniu stabdymu kaupiama energija ir sustojus užgesinamas VDV. Kaip pateikta 1.1 paveiksle didžiausias energijos kiekis sukaupiamas stabdymo metu, o daugiausia sunaudojama staigiai įsibėgėjant.



1.1 pav. Hibridinio automobilio energijos suvartojimo schema [14]

Vien elektriniu varikliu nuvažiuojamas atstumas yra labai menkas, tačiau važiuojant mieste, kai vairavimo metu yra pakankamai dažnai stabdoma, baterija yra įkraunama greitai. Buvo paskaičiuota, kad vien elektriniu varikliu yra nuvažiuojama apie 30 – 40% vienos dienos įveikiamo atstumo mieste (Toyota duomenimis) [13].

Hibridiniai automobiliai pagerina kuro ekonomiją bei sumažina į atmosferą išmetų teršalų kiekį. Automobilio gamybai naudojamos kompozitinės medžiagos, tokios kaip anglies pluoštas ar lengvasvoriai metalai – aliuminis bei magnis, ko pasekoje automobilis tampa lengvesnis bei mažiau energijos reikalinga greitėjimui bei nustatyto greičio palaikymui. Hibridiniai automobiliai pasižymi nedideliu aerodinaminiu pasipriešinimo koeficientu ir specialiai jiems pritaikytomis, žemo pasipriešinimo riedėjimui, padangomis, kad kuo efektyviau būtų taupoma energija.

1.1 Hibridinių automobilių perspektyvos

VĮ „Regitra“ duomenimis Lietuvoje 2015 metais oficialiai registruotų hibridinių automobilių buvo 2843, o elektromobilių – vos 65. „EVP International“ duomenimis eksploatuojant hibridinį automobilį, kai per metus prasukama 15 tūkst. km rida, sutaupoma 400 – 600 eurų vien degalams, neatsižvelgiant į eksplotacinius kaštus [14].

Pasauliniu lygmeniu hibridinių automobilių naudojimas sparčiai auga, o prie to labiausiai prisideda Japonija, JAV ir ekonomiškai stiprios Europos šalys. 2007 -2014 metų laikotarpiu oficialiai įregistruotų hibridinių automobilių skaičius padidėjo virš milijono vienetų. Hibridinių automobilių kiekio kitimo tendencijas pasaulyje ir atskirose šalyse galime stebėti 1.1 lentelėje.

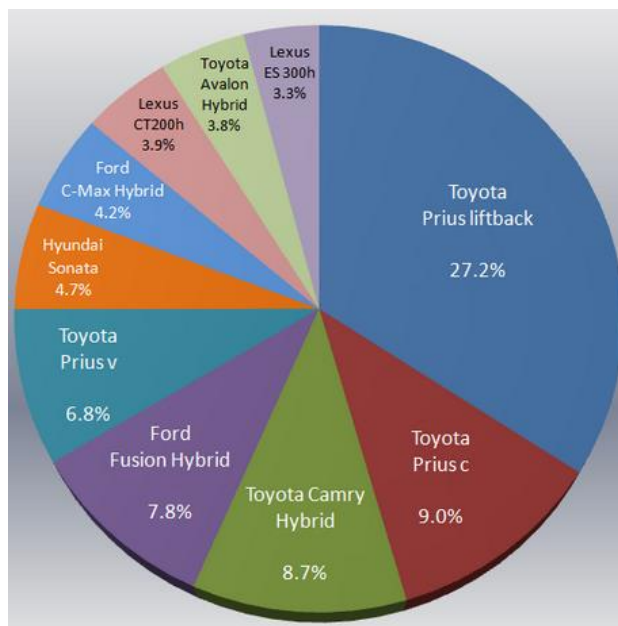
1.1 lentelė

Hibridinių automobilių skaičiaus kitimas pasaulyje 2007 – 2014 metų laikotarpiu [21]

Šalis	Registruoti automobiliai							
	2014	2013	2012	2011	2010	2009	2008	2007
Japonija	Virš milijono	679,100	678,000	316,300	392,200	334,000	94,259	69,015
JAV	452,152	495,771	434,498	268,752	274,210	290,271	312,386	352,274
Prancūzija	42,813	46,785	27,730	13,340	9,443	9,399	9,137	7,268 ^l
Didžioji Britanija	37,215	29,129	24,900	23,391	22,127	14,645	15,385	15,971
Vokietija	27,435	26,348	21,438	12,622	10,661	8,374	6,464	7,591
Olandija	10,341	18,356	19,519	14,874	16,111	16,122	11,837	3,013
Kanada	-	~15,000	14,595	-	-	16,167	19,963	14,828
Pasaulyje	Virš 1,57 milijono	Virš 1,31 milijono	Virš 1,22 milijono	-	-	740,000	511,758	500,405

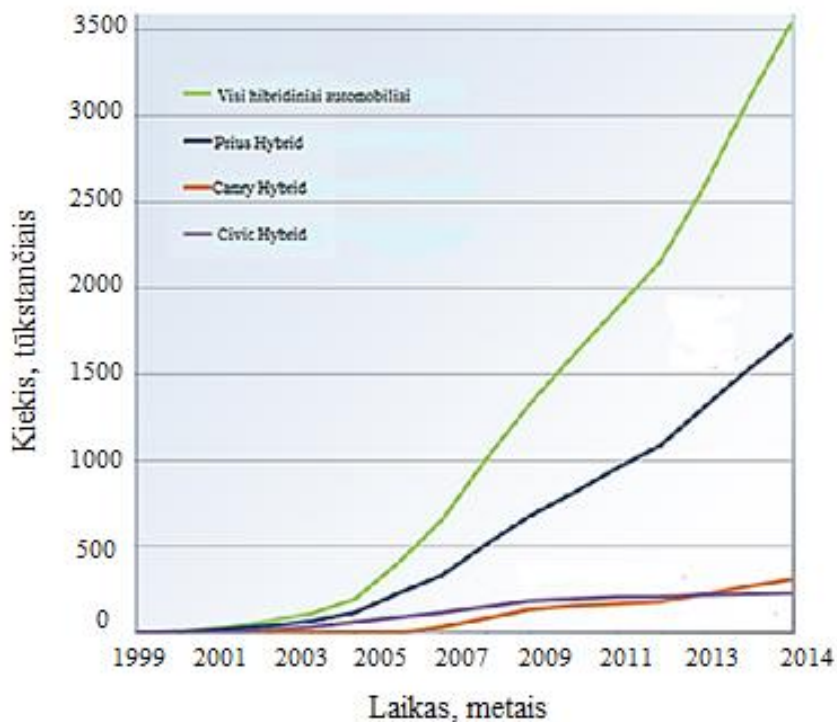
Daugiausia parduodama automobilių gamintojos Toyota serijinių hibridinių automobilių. 2014 metais šios gamintojos automobiliai sudarė 55,5 % visų parduotų hibridinių automobilių. Pagal

daugiausia parduotus automobilių modelius 2014 m. lyderiauja Toyota Prius liftback, Prius c bei Camry hybrid modeliai. Detalesnius pardavimų rezultatus 2014 metais galima išvysti 1.2 paveiksle.



1.2 pav. Hibridinių automobilių modelių pardavimai 2014 metais [21]

Hibridinių automobilių pardavimus 1999 – 2014 metų laikotarpyje galima išvysti 1.3 paveiksle, kuriame pateikiami ir populiariausių hibridinių automobilių modelių pardavimai.



1.2 pav. Hibridinių automobilių pardavimų kitimas 1999 – 2014 metų laikotarpiu [21]

Iš pateiktos pardavimų diagramos galima teigti, kad hibridiniai automobiliai esti populiarumo viršūnėje ir pardavimai vis didės, atsižvelgiant į tai, kad naftos kainos kyla. Populiariausiu hibridiniu automobiliu eile metų išlieka Toyota Prius, kuriam konkurenciją rinkoje palaiko tik kitas japonų gamintojas Honda su hibridiniu automobiliu Civic.

1.3 Hibridinių automobilių tipai

Hibridiniai automobiliai gali būti skirstomi pagal įvairius bruožus. Dažniausiai skirtomi pagal naudojamos technologijos lygį ir pavarų komponavimą.

Hibridiniai automobiliai, žvelgiant į sudėtingumą ir naudojamą technologinį lygį, skirstomi:

- „Micro“ hibridinius automobilius;

„Micro“ arba kitaip „stop/ start“ hibridai nėra laikomi tikrais hibridiniais automobiliais, nes nėra tiesiogiai varomi elektros variklio. Jie paprastai turi santykinai mažą elektros variklį, kuris nesuka tiesiogiai ratų, bet turi pakankamai galios, beveik akimirksniu, pakartotinai paleisti variklį. Naudojant stop/ start technologiją, VDV gali užgesti automatiškai, automobiliui stovint (pvz.: sankryžoje laukiant žalios šviesos) ir vėl pradėti veikti, kai tik vairuotojas nuspaus akceleratorių (šiuo atveju vairuotojui nereikia pasukti uždegimo raktelio ar netgi žinoti, kad variklis nedirba). „Micro“ hibridai paprastai sutaupo apie 10 – 20% kuro, tačiau turi pranašumą būdami santykinai nebrangiais [18].

„Mucle“ hibridai naudoja elektros variklį kaip papildomą galios šaltinį, kuris veikia kaip turbokompresorius. Vietoje to, kad akseleruojant būtų sunaudojama daugiau degalų, pasitelkiamas EV, kuris suteikia papildomos galios. Šio tipo automobilio atstovas – Porsche 918 Spyder.

- „Mild“ hibridinius automobilius;

„Mild“ tipo hibridai turi stop/ start funkciją, kai EV naudojamas pajudėjimui iš vietos. Šio tipo HA gali būti varomas VDV ir elektriniu varikliu vienu metu. Elektros variklis nėra pakankamai galingas, kad išjudinti automobilį, tačiau jis atlieka dalį tam reikalingo darbo. Šiose hibriduose taip pat naudojama regeneracinio stabdymo sistema, kuri dalį stabdymui reikalingos energijos paverčia į el. energiją, kuri naudojama įkrauti baterijas. „Mild“ hibridai sumažina kuro suvartojimą bei CO₂ emisiją 25%, lyginant su įprastine transporto priemone [14].

- „Full“ hibridinius automobilius;

Klasikinis pavyzdys Toyota Prius ar koks kitas automobilis su Toyota gamintojos užpatentuota technologija „Hybrid Synergy Drive“. Šiuo metu jau daugelis automobilių gamintojų rinkoje siūlo šios technologijos automobilius. „Full“ tipo hibridiniai automobiliai daug efektyvesni už benzininius ar dyzelinius automobilius, nes automatiškai parenkamas nuoseklus, lygiagretus ar visai elektrinis veikimo būdas. Trumpiau tariant elektros variklis per transmisiją suka varančiuosius ratus, o VDV

suteikia energijos generatoriui. Kai važiuojant automobiliu nereikalinga pilna galia, elektros variklis veikia kaip generatorius ir įkrauna baterijas. Baterijos įkraunamos ir regeneracinio stabdymo metu. Esant eismo sąlygom, kai reikia dažnai stabdyti ar važiuoti mažais greičiais, t.y. kai VDV mažiausiai ekonomiškas, jis išsijungia ir pradeda veikti elektros variklis. Automobilis gali būti varomas tik VDV, arba tik EV arba abiem kartu.

Toyota sistema, kuri licencijuota naudoti Ford Escape hibriduose, naudoja „galios paskirstymo“ įrenginį, kuris dalį benzininio variklio galios perduoda tiesiogiai ratams, o dalį į generatorių. Generatorius suka EV, kurio galia perduodama ratams. Sistema sudėtinga, bet pasiekiamas didelis efektyvumas, leidžiantis varikliui dirbti ekonomiškai visą laiką. Panaši sistema eksploatuojama 4 varomų ratų Lexus RX400h, tačiau turi du elektros variklius: vienas priekiniams ratams, kitas – galiniams (1.4 pav.).



1.4 pav. „Full“ hibridinis automobilis Lexus RX400h su 2 EV priekyje ir gale [22]

- Kištukinius (plug – in) hibridinius automobilius.

Kištukiniai hibridai turi visas savybe būdingas „Full“ tipo hibridams, tačiau turi didesnės talpos traukos bateriją, kuri gali būti įkraunama iš elektros tinklo. Pagal tarptautinius IEEE standartus, automobilis priskiriamas kištukiniams hibridams, jei nuvažiuojamas atstumas vien elektra yra bent 16 kilometrų. Toks automobilis leidžia mieste važiuoti vien elektra. Vien elektros variklio pagalba Toyota Prius (Plug – in) ir Ford C - Max Energi (1.5 pav.) gali įveikti 6 -14 mylių, o Chevy Volt net iki 38 mylių. Vienu aspektu Volt automobilis yra artimesnis elektromobiliui, tuo kad baterijos yra kraunamos prailgintu režimu – kada baterijos iškraunamos, ir tik tai VDV sukamo generatoriaus pagalba automobilis juda – tai vyksta ne dėl lygiagreto variklių veikimo [1].



1.5 pav. „Plug – in“ tipo hibridinis automobilis Ford C-Max Energi [18]

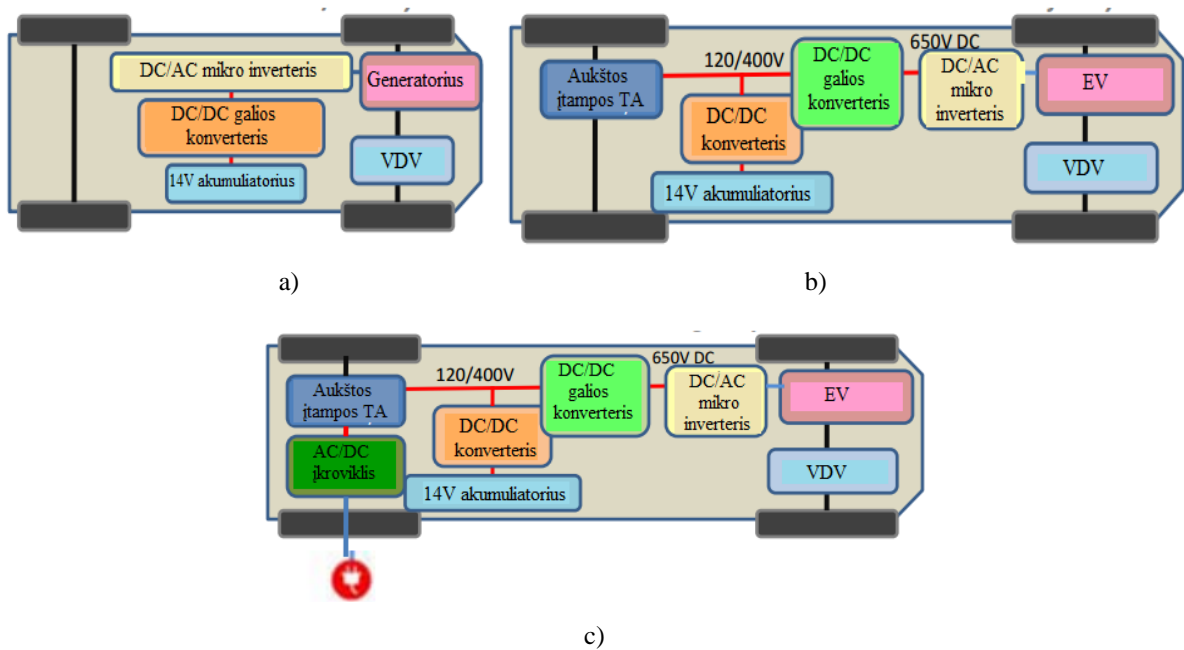
Apibendrinant šią klasifikaciją suformuojama 1.2 lentelė, kurioje bus palyginami hibridinių automobilių technologiniai lygiai.

1.2 lentelė

Hibridinių automobilių tipų palyginimas tarpusavyje bei su elektromobiliu [19]

Funkcijos	Micro ir mucle HA	Mild HA	Full HA	Plug – in HA	Elektromobilis
Stop/start sistema	+	+	+	+	+
Regeneracinis stabdymas	+	+	+	+	+
Pridedama el. energija keletui sekundžių	+	+	+	+	+
EV dėka nuvažiuojamas neilgas atstumas			+	+	+
EV dėka nuvažiuojamas ilgas atstumas ir įkraunamas iš el. tinklo				+	+
Energijos sutaupymas, %	5 – 10 (mieste iki 25)	10 – 25	25 – 40	50 - 100	100
Elektros galia, kW	1,5 – 10	5 – 20	30 – 75	70 - 100	30 - 100
Tipinis automobilis	PSA C2	Honda Civic	Toyota Prius	GM Volt	Nissan Leaf

Atsižvelgiant į hibridinio automobilio technologijos lygį esti skirtingų ir pavarų komponavimo schemų. Taigi 1.6 pav. apžvelgiamos technologinės schemos skirtingo lygio hibridiniuose automobiliuose. 1.6 pav. a schema būdinga „micro“ ir „micro/mild“ hibridams, b schema naudojama „mild“ ir „full“ hibriduose, c schema - kištukiniuose hibridiniuose automobiliuose bei elektromobiliuose. Schema c šiuo metu aukščiausio techninio lygmens. Šiose schemose raudonomis linijomis žymima nuolatinės srovės (DC) tekėjimas, o mėlynomis – kintamos srovės (AC) tekėjimas.

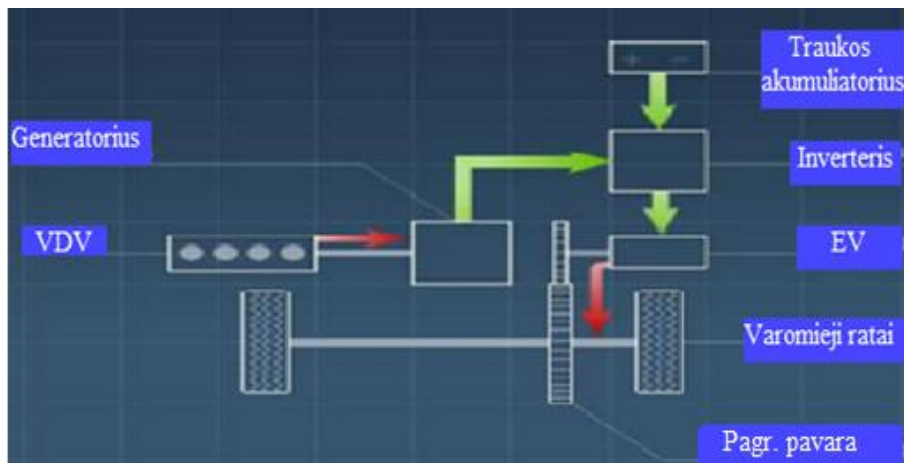


1.6 pav. Hibridinių automobilių schemas pagal technologinį lygį: a) – 1 lygis (žemiausias); b) – 2 lygis; c) – 3 lygis [8]

Pagal hibridinių pavarų komponavimo pobūdį hibridiniai automobiliai klasifikuojami:

- Nuoseklaus jungimo (1.7 pav.);
- Lygiagretaus jungimo (1.8 pav.);
- Mišraus jungimo (1.9 pav.).

Hibridinio automobilio, kuris veikia pagal nuoseklią pavarų komponavimo schemą, el. generatorius, sukamas VDV, gamina el. energiją. Generatorius visą laiką krauna bateriją, kuri tiekia el. energiją varikliui (iams). Šios schemas atveju, gaunami dideli energijos nuostoliai dėl mechaninės energijos transformavimo el. energija ir atvirkščiai. Schema tinkama automobiliams, kuriais bus dažniau naudojamos mieste.



1.7 pav. Nuosekli HA pavarų komponavimo schema [18]

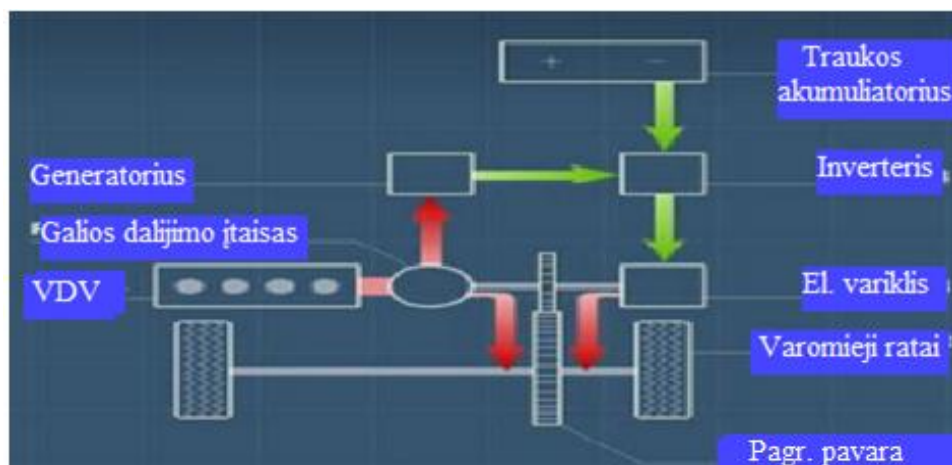
Automobilyje skirtingos spalvos rodyklės parodo kryptis, kuriomis keliauja el. energija (žalios sp.) ir mechaninė energija (raudona sp.).

Lygiagrečios schemos hibridinio automobilio ratai per transmisiją gali būti varomi VDV arba elektros variklio, o traukos baterija įkraunama per galios keitiklį iš elektros tinklo arba regeneracinio stabdymo būdu. Paprastai automobilis užmiestyje varomas VDV, o mieste – EV, nes tuomet nėra tuščios veikos ir regeneruojama stabdymo energija grąžinama į traukos bateriją.



1.8 pav. Lygiagreči HA pavarų komponavimo schema [18]

Mišrios hibridinių pavarų jungimo schemos atveju, automobilio ratai per galios dalijimo įtaisą gali būti varomi VDV arba el. variklio EV, arba abiem kartu. Dažnai šios schemos atveju, traukos baterija papildomai įkraunama iš elektros tinklo.



1.9 pav. Mišri HA pavarų komponavimo schema [18]

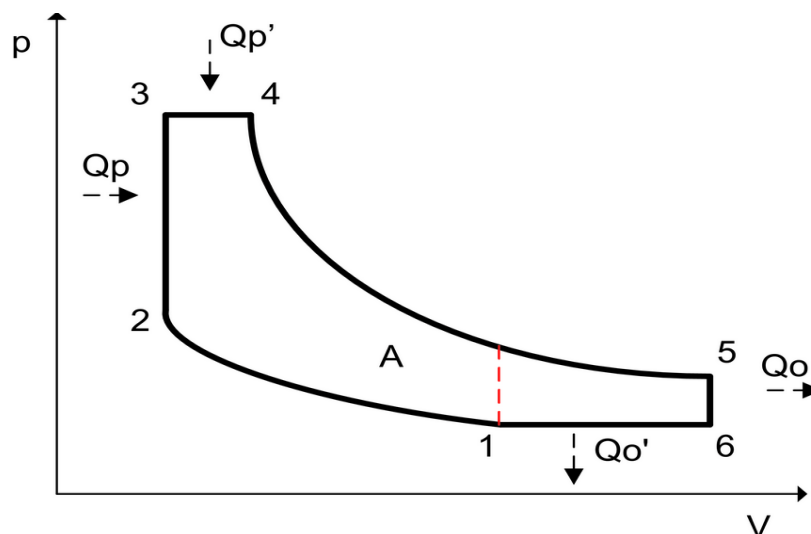
Mišrios hibridinių pavarų jungimo schemos atveju CO₂ emisija sumažėja iki 30% bei galimas, pasinaudojus EV, ilgalaikis (daugiau kaip 10min.) sukimo momento padidinimas.

1.4 Atkinsono ciklas hibridinio automobilio VDV

D. Atkinsonas patobulino keturtaktį VDV, padalinęs stūmoklio švaistiklį į 2 dalis ir sujungęs jas mechanizmu, leidžiančiu keisti stūmoklio eigą. Šio mechanizmo dėka įsiurbimo ir suspaudimo taktai sutrumpinami, o darbo ir išmetimo – prailginami, lyginant su VDV veikiančiu Otto ciklu. Taip pakeičiant variklio darbą, efektyviau išnaudojama degimo produktų energija, taupomas kuras bei mažinamas išmetamų dujų kiekis. Ši mechaninė sistema sudėtinga ir jos savikaina brangi [15].

Idealus Atkinsono ciklas (1.10 pav.) susideda iš 6 procesų:

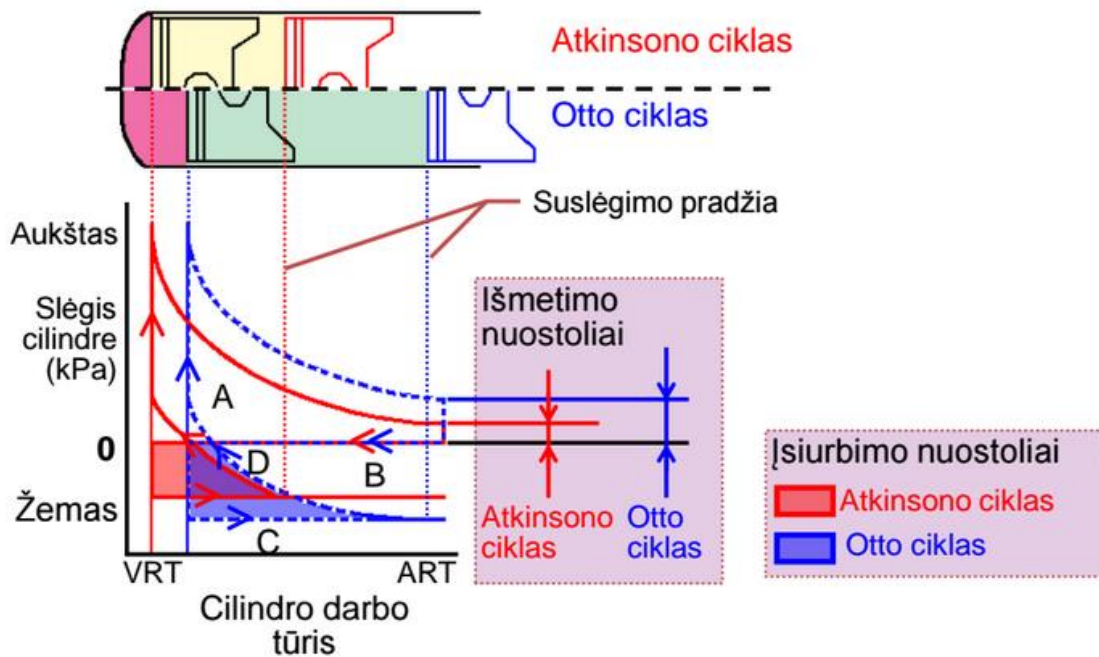
- 1-2 Izoentropinis arba grįžtamasis adiabatinis suspaudimas;
- 2-3 Izochorinis šildymas (Q_p);
- 3-4 Izobarinis šildymas ($Q_{p'}$);
- 4-5 Izoentropinis išsiplėtimas;
- 5-6 Izochorinis atšaldymas (Q_o);
- 6-1 Izobarinis atšaldymas ($Q_{o'}$).



1.10 pav. Idealaus Atkinsono ciklo schema [15]

Šiuolaikiniuose hibridiniuose automobiliuose naudojamos sistemos, imituojančios cilindro eigos valdymą. Tokias sistemas naudoja automobilių gamintojai Mazda bei Toyota (pvz., Prius modelyje). Šių sistemų veiksena esmė, kad vėliau uždaromi įsiurbimo vožtuvai, keičia suspaudimo laipsnių santykį suspaudimo bei darbo (degimo) taktuose. Honda sukūrė variklį, kuriame buvo visi Atkinsono elementai, tačiau variklis buvo inertiškas ir nebuvo panaudotas transporto priemonėse. Jame buvo pasiektas suspaudimo laipsnis darbo takto metu - 17,6:1, o suspaudimo takte 12,2:1. Variklio naudingumo koeficientas smarkiai išaugo.

Hibridinio automobilio VDV, veikiančio Atkinsono ir Otto ciklais, palyginimas pateiktas 1.11 paveiksle. Kaip matome, įsiurbimo bei išmetimo nuostoliai mažesni Atkinsono ciklu veikiančiame VDV.



1.11 pav. Atkinsono bei Otto ciklų palyginimas: A – darbo taktas, B – išmetimo taktas, C – įsiurbimo taktas, D – suslėgimo taktas [13]

Atkinsono ciklas kaip ir Otto ciklas prasideda įsiurbimo taktu, tačiau Otto ciklo variklyje apatiniame rimties taške (toliau ART) įsiurbimo vožtuvai užsidaro. Atkinsono ciklo variklyje įsiurbimo vožtuvai užsidaro tik tada, kai stumoklis jau būna pakilęs šiek tiek aukščiau ART, taigi dalis kuro bei oro mišinio, kuris įpurškiamas ART, išstumiami atgal į įsiurbimo kolektorių. Taigi suslėgimo taktas Atkinsono ciklo variklyje prasideda aukščiau ART. Pasiėkus viršutinį rimties tašką (toliau VRT) suslėgimo taktas baigiamas. Prasideda darbo taktas, kur degančio kuro bei oro mišinio šiluminė energija paverčiama į mechaninį stumoklio judesį žemyn. Atkinsono ciklo variklyje didesnė dalis šiluminės energijos paverčiama į mechaninę, nes stumoklio eiga ilgesnė. Atkinsono ciklo variklyje slėgis ir temperatūra cilindre ART žemesni nei Otto. Išmetimo takto metu generuojama mažiau išmetamųjų dujų, o dėl ilgesnės stumoklio eigos sumažėja kuro suvartojimas.

1.5 Hibridinių automobilių traukos baterijos

Kaip ir visos baterijos, HA aukštos įtampos traukos baterijos (toliau TB) turi du elektrodus. Elektrodai įprastai būna labai arti – nuo susilietimo saugo polimero juosta. Elektrolitu būna skystis, gelis arba kieta medžiaga. Rūgštinis ar šarminis bus elektrolitas priklauso nuo TB tipo.

Antros kartos Toyota Prius TB sudaryta iš 28 Panasonic firmos nikelio metalo hidrido modulių, kurių kiekvienas susideda dar iš šešių 1,2V celių, kurios sujungtos nuosekliai suteikia 201,6V vardinę įtampą. Celių skaičius siekia 168, tačiau lyginant su pirmos kartos Toyota Prius, kuriame buvo 38 moduliai, kuriuose buvo po 6 celes. TB montuojama už užpakalinės sėdynės.

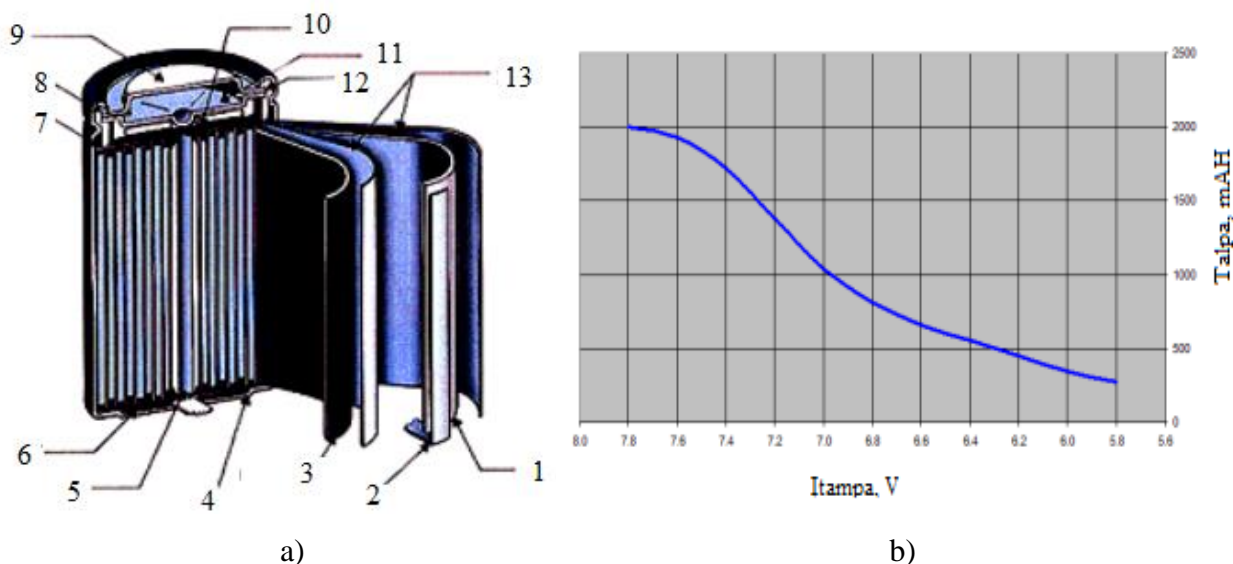
TB svoris siekia 53,3 kg (1.12 pav.). Traukos baterijos galia maksimaliai siekia 20 kW. Prius modelis turi procesorių, kuris skirtas tik išlaikyti bateriją optimalioje temperatūroje ir įkrovimo lygyje. Oras šaldomas iš salono oro kondicionieriaus pagalba bei 12 V ventiliatoriumi, kuris sumontuotas virš galinio rato vairuotojo pusėje.



1.12 pav. Antros kartos Toyota Prius NiMh aukštos įtampos traukos akumuliatorius [9]

Pirmuosiuose HA buvo naudojami švino rūgšties TB, tačiau jų talpos ir svorio santykis neatitiko keliamų reikalavimų. Vėliau pradėtos naudoti nikelio metalo hidrido (NMh) traukos baterijos, kurios tebenaudojamos ir dabar. Jos turi aukštą savitąją energiją (30 – 80 Wh/kg) ir ilgą gyvavimo ciklą. Jos yra perdirbamos ir beveik neteršia aplinkos, kadangi anodas pagamintas iš nesunkiųjų metalų lydinių. NMh traukos baterijų didžiausias trūkumas – žymi savaiminė elektrolito iškrova. Tinkamai eksploatuojamos jos turi ilgą darbo amžių, kuris viršija 10 metų [3].

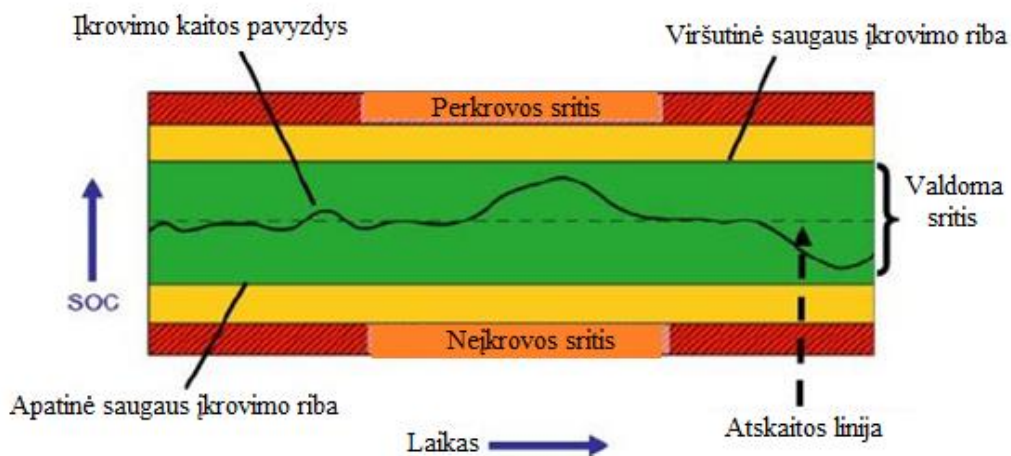
Dabartiniuose hibridiniuose automobiliuose (pvz., Toyota Prius Plug – in) bei elektromobiliuose naudojamos ličio – jonų (Li-ion) baterijos. Jos turi labai aukštą savitąją energiją (150 Wh/kg) ir ilgą gyvavimo ciklą. Šio tipo baterijos turi dvigubai didesnę talpą lyginant su NMh baterijomis, kurios turi atitinkamai dvigubai didesnę talpą nei švino rūgšties (PbA) baterijos mūsų automobiliuose. Ličio – jonų baterijos yra 40 % mažesnės ir perpus lengvesnės nei NMh, tačiau turi ir trūkumų – perkrovus galima pažeisti elektrodus, reikalingos saugos priemonės baterijai ir celėms bei pavojingos tinkamai nesirūpinant. Ličio – jonų baterijos sandara pateikta 1.13 pav. a schemeje, o 1.13 pav. b schemeje pateikta Ličio – jonų baterijos talpos priklausomybė kaupiamos įtampos.



1.13 pav. a – ličio – jonų baterijos sandara [19]: 1 – anodas, 2 – anodo jungtis, 3 – katodas, 4 – anodo talpykla, 5 – galvutė, 6 – izoliatorius, 7 – izoliatorius, 8 – tarpiklis, 9 – katodo dangtelis, 10 – katodo jungtis, 11 – saugos anga, 12 – teigiamos terminio koeficiento įtaisas (PTC), 13 – atskyriklis; b – ličio – jonų baterijos talpos priklausomybės nuo įtampos grafikas [19]

Tipinis anodas (neigiamas elektrodas) yra paprastai pagamintas iš grafito, bet katodo (teigiamas elektrodas) cheminė sudėtis labai skiriasi. Kiekviena iš kelių konkuruojančių katodo medžiagų suteikia skirtingą ekonominių sąnaudų, patvarumo, efektyvumo ir saugumo santykį. Pagrindiniai konkurentai pakeisti ličio katodą:

- Kobalto dioksidas;
- Nikelis – kobaltas – manganas (NCM);
- Nikelis – kobaltas – aliuminis (NCA);
- Mangano oksidas (MnO);
- Geležies fosfatas (FePo).



1.14 pav. TB modulių paketo balanso nustatymas [20]

Tikrinti periodiškai traukos baterijas tiesiog būtina. Aukštos įtampos TB patikra galima daugeliui serijinių hibridinių automobilių. Veikiant hibridiniam automobiliui normaliomis sąlygomis, įkraunant iki maksimalių ir iškraunant aukštos įtampos traukos bateriją iki minimalių ribų, nustatomas jos modulių paketo balansas.

Daugumai HA aukštos įtampos baterijos saugaus įkrovimo palaikymo būseną (toliau SOC) nustatoma apie 60%.

Taipogi nustatomos viršutinė (Upper SOC control limit) bei apatinė (Lower SOC control limit) įkrovimo būsenos ribos. Delta SOC - normali įkrovimo deviacija yra neviršijanti 20%.

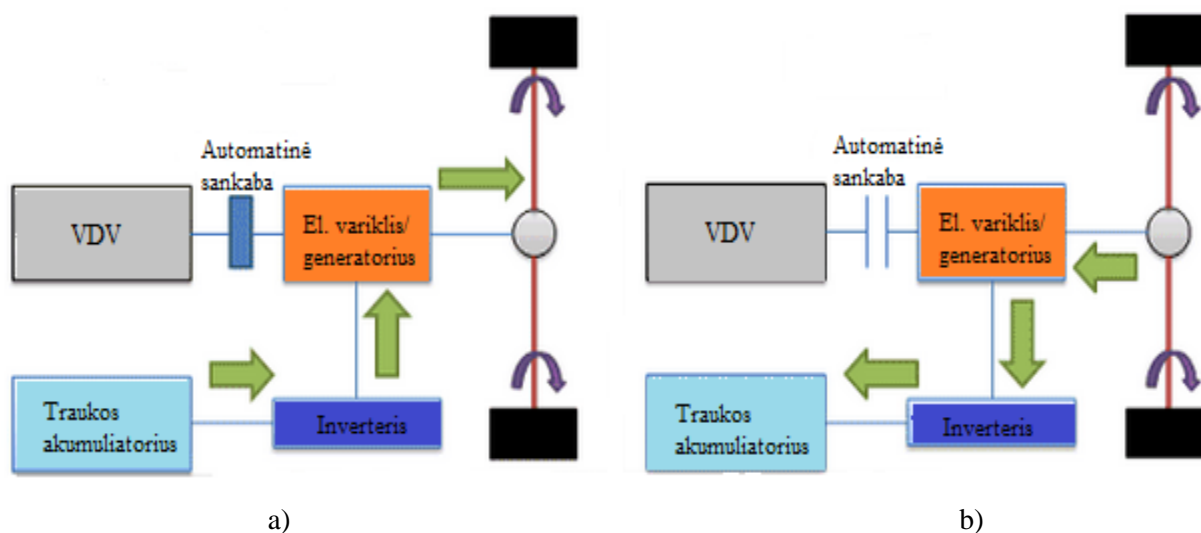
Atliekant aukštos įtampos TB patikrą tikrinami įkrovimo deviacijos nuokrypiai, kurie turi neviršyti 20 % ribos. 1.14 paveiksle matome, kad įkrovimo deviacija nekinta iškraunant bei vėl įkraunant traukos bateriją. Modulių balansas nepažeistas bei ir toliau tinkamas naudoti.

1.6 Regeneracinė stabdymo sistema (RSS)

Transporto inžinieriai surado būdą kaip automobilio kinetinę energiją surinkti ir paversti ją elektros energija, kuri būtų naudojama įkrauti automobilio bateriją. Pirmoji transporto priemonė, kurioje buvo panaudota ši sistema buvo tramvajus. Sistema buvo pavadinta regeneracine stabdymo sistema (angl. regenerative braking system).

Šiuo metu RSS daugiausia aptinkama hibridiniuose automobiliuose, tokiose kaip Toyota Prius, ir elektromobiliuose, tokiose kaip Tesla Roadster. Šiose automobiliuose išlaikyti aukštos įtampos TB įkrautą yra labai svarbu. Šią technologiją dabartiniu metu naudoja jau ir elektriniai dviračiai bei formulės 1 bolidai.

Tradicinėje stabdžių sistemoje stabdžių trinkelės kartu su stabdžių diskais sudaro trinties porą, kuri sulėtina ar sustabdo transporto priemonę. Stabdymo metu atsiranda papildoma trintis tarp rato ir kelio paviršiaus. Ši trintis automobilio kinetinę energiją paverčia šiluma. Pasitelkus RSS atliekamas pagrindinis transporto priemonės stabdymas. Elektrinėse bei hibridinėse transporto priemonėse, paspaudus stabdžių pedalą, šis stabdymas pasireiškia elektros variklio sukimosi į priešingą pusę, t.y. elektros variklis generuoja neigiamą sukimo momentą ir elgiasi kaip generatorius, todėl transporto priemonė lėtėja. Važiuojant atgal elektros variklis taip pat veikia kaip generatorius, kuris tiekia elektros energiją į traukos bateriją. Sukaupta energija traukos baterijoje, panaudojama transporto priemonei greitėjant ir kaupiama stabdant arba važiuojant atbulon (1.15 pav.).



1.15 pav. Elektros energijos kryptys: a – greitėjant, b – stabdant [24]

Šis stabdymas efektyviausias situacijose, kai dažnai intensyvaus eismo sąlygomis tenka stabdyti ir vėl startuoti. HA bei elektromobiliai turi ir frikcinius stabdžius, kurie situacijose, kai RSS nesuteikia reikalingo stabdymo efektyvumo, yra panaudojami. Tais atvejais, svarbu vairuotojams napanikuoti, nes stabdžių pedalas skirtingai reaguoja į spaudimą, taigi jis gali nukristi iki pat dugno.

Regeneracinės stabdžių sistemos esmė tokia, kad automobilio lėtėjimo mechaninė energija paverčiama elektros energija, kuri tiekama į traukos bateriją. Sudėtingos elektros grandinės yra būtinos tam, kad nuspręsti kada reikalinga elektros variklio režimą pakeisti į generatoriaus ir saugiai transportuoti el. energiją į traukos bateriją. Be to šie automobiliai taip pat naudoja ir frikcinę stabdžių sistemą, taigi automobilio elektronika turi nuspręsti kurią sistemą tuo metu naudoti. Kadangi tiek daug yra valdoma elektroniniu būdu regeneracinės stabdžių sistemos parametru, tai dar įmanoma vairuotojui pasirinkti tam tikrus nustatymus, kad nustatytų, kaip transporto priemonė reaguotų įvairiose situacijose. Pavyzdžiui, vairuotojas gali pasirinkti, ar regeneracinis stabdymas turėtų prasidėti iš karto, kai tik jis koja nespaudžia akceleratoriaus pedalo ir RSS stabdys automobilį visą kelią.

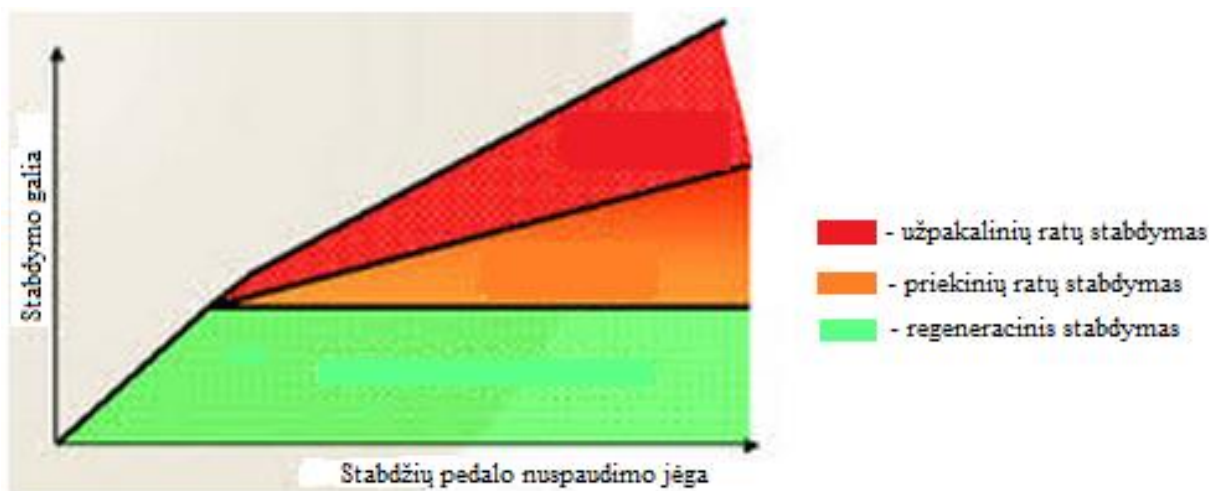
Stabdžių valdikliai yra elektroniniai prietaisai, kurie kontroliuoja stabdžius nuotoliniu būdu, nusprendžia, kada stabdymas prasideda ir baigiasi, ir kaip greitai stabdžiai turi būti panaudojami. Pavyzdžiui velkant priekabą, stabdžių valdikliai gali kordinuoti automobilio bei priekabos stabdymą.

Regeneracinis stabdymas įgyvendinamas kartu su stabdžių antiblokavimo sistema (ABS), taigi regeneracinio stabdymo valdiklis yra panašus į ABS valdiklio, kuris stebi ratų sukimosi greitį ir greičio skirtumas tarp skirtingų ratų.

Automobiliuose, kurie naudoja RSS, stabdžių valdiklis ne tik stebi ratų greitį, tačiau jis gali apskaičiuoti, koks sukimo momentas - sukimosi jėga - yra generuojama bei elektros energija tiekama atgal į bateriją. Atliekant stabdymą, stabdžių valdiklis nukreipia elektros energiją į traukos

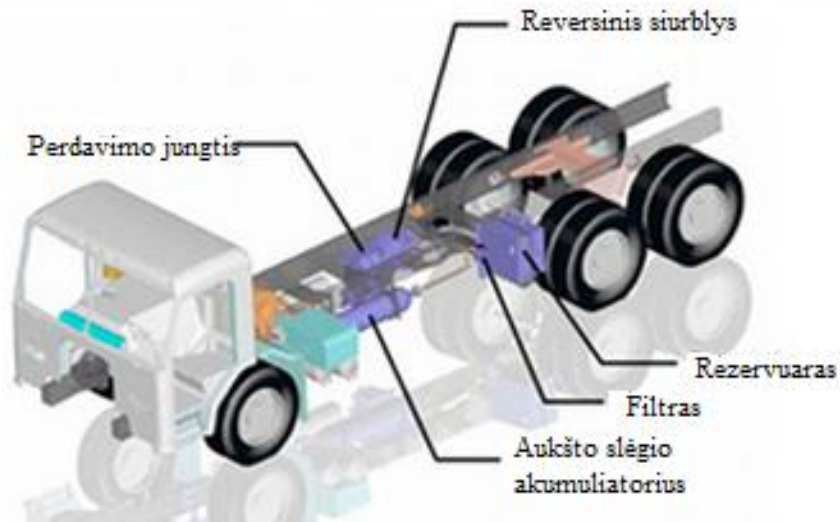
akumulatorius ar kondensatorius. Valdiklis užtikrina, kad traukos baterijos gautų optimalų energijos kiekį bei elektros energijos srautas būtų ne didesnis kaip baterijos leidžiamas.

Svarbiausias stabdžių valdiklio funkcija yra sprendžiant, ar el. variklis, veikiantis generatoriaus režimu, yra tuo metu pajėgus sustabdyti mašiną, atsižvelgiant į stabdžių pedalo paspaudimą. Jei taip nėra, stabdžių valdiklis įjungia frikcinius stabdžius, kurie padeda išvengti galimos katastrofos. 1.16 paveiksle pateikta stabdymo galia priklausomai nuo stabdžių pedalo nuspaudimo jėgos bei pateikta stabdymo galios sudėtis. Automobiliuose, kurie naudoja šiuos tipų stabdymą, stabdžių valdiklis padaro regeneracinį stabdymo procesą įmanomą.



1.16 pav. Stabdymo galios priklausomybė nuo stabdžių pedalo nuspaudimo jėgos [25]

Kaip alternatyva regeneracinei stabdymo sistemai sunkvežimiuose naudojama HPA sistema (hydraulic power assistant). 1.17 pav. pateikta primityvi HPA sistemos sandara su pažymėtais pagrindiniais elementais sunkvežimyje. Su HPA, vairuotojui paspaudus stabdžių pedalą, automobilio kinetinė energija yra panaudojama varyti reversinį siurblių, kuris siunčia hidraulinio skystį iš žemo slėgio akumulatoriaus (rezervuaro) transporto priemonės viduje į aukšto slėgio akumulatorius. Slėgis sukuriamas azoto dujų akumulatoriuje, kurios yra spaudžiamos hidraulinio skysčio ir yra erdveje virš hidraulinio skysčio. Tai lėtina automobilį ir padeda jam sustoti. Hidraulinis skystis išlieka esant slėgiui akumulatoriuje, kol vairuotojas nepaspaudžia akceleratoriaus pedalo, tada siurblys pakeičia sukimosi kryptį ir suspaustas hidraulinis skystis yra panaudojamas padidinti transporto priemonės greitį, t.y. efektyviai paverčiama kinetinė energija, kurią transporto priemonė turėjo prieš stabdymą, į mechaninę energiją, kad atgauti prarastą greitį. HPA sistema suteikia iki 80% pagreitį prarastą transporto priemonės lėtėjimo metu ir panaudoja jį. Ši procentinė dalis yra išpūdingesnė nauda, nei kurios iš dabartinių regeneracinių stabdžių sistemų. Kaip ir elektroninės regeneracinės stabdymo sistemos, ši HPA sistema efektyviausiai išnaudojama vairuojant mieste, kur daug stabdoma ir vėl akseleruojama.

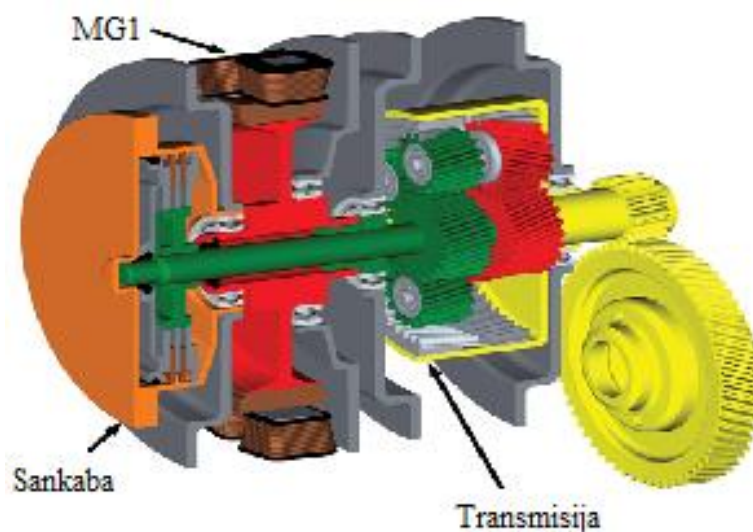


1.17 pav. HPA sistemos pagrindiniai elementai [24]

Regeneracinio stabdymo sistema gali sumažinti degalų suvartojimą 10 – 25 procentus, tačiau HPA sistema gali suteikti dar įspūdingesnių rezultatų, gali sumažinti kuro naudojimą 25 – 45%. Tai labai ženklus žingsnis siekiant atsisakyti iškastinio kuro, tačiau su HPA sistema visdar bandoma.

1.7 Hibridinio automobilio transmisija

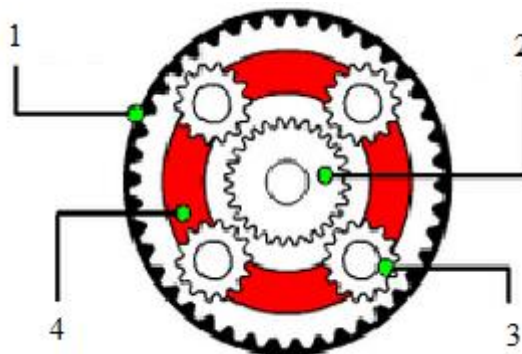
Dažnai lygiagretaus pavarų komponavimo atveju nenaudojami planetinių krupliaračių rinkiniai (1.18 pav.). El. variklis – generatorius MG1 tiesiogiai sujungtas su VDV ir transmisija sankabos arba sukimo momento konverterio. El. variklis – generatorius gali varyti automobilio ratus arba krauti aukštos įtampos traukos bateriją.



1.18 pav. Lygiagretaus pavarų komponavimo transmisija [16]

Toyota Prius hibridiniame automobilyje širdis yra galios paskirstymo įrenginys. Tai išmani pavarų dėžė, kuri leidžia VDV, generatoriui ir elektros varikliui veikti kartu. Tai leidžia automobiliui veikti kaip lygiagrečiam hibridui, t.y. automobilis gali būti varomas EV, VDV arba abiejų kartu. Galios paskirstymo įrenginys taip pat leidžia automobiliui veikti kaip nuosekliam hibridui - VDV gali veikti nepriklausomai nuo automobilio greičio, krauti traukos bateriją ar teikti trūkstamą galią varantiems ratams. Ši pavarų dėžė taip pat suteikia nuolat kintantį perdavimą(CVT), kuris panaikina rankinės arba automatinės transmisijos poreikį. Galios paskirstymo įrenginys leidžia generatoriui užvesti variklį, taigi automobiliui nereikia starterio.

Galios paskirstymo įrenginys yra planetinių pavarų rinkinys (1.19 pav.). Elektros variklis prijungtas prie žiedinio krumpliaračio 1. Taip pat yra tiesiogiai prijungtas prie diferencialo, kuris varo ratus. Taigi, bet koks elektros variklio ir žiedinio krumpliaračio sukimosi greitis įtakoja automobilio greitį.



1.19 pav. Toyota Prius planetinių pavarų rinkinys: 1 – žiedinis krumpliaračis; 2 – centrinis krumpliaračis; 3 – planetiniai krumpliaračiai (satelitai); 4 – vediklis [7]

Generatorius prijungtas prie centrinio krumpliaračio 2, o VDV yra sujungtas su planetiniu vedikliu 4. Žiedinės pavaros 1 greitis priklauso nuo visų trijų komponentų, todėl jie turi dirbti kartu visą laiką kontroliuodami išėjimo greitį.

Greitėjant, iš pradžių elektros variklis ir VDV veikia visa galia. Galios paskirstymo įrenginio žiedinis krumpliaračis prijungtas prie EV, todėl jis pradeda sukintis kartu. Planetinis vediklis, kuris yra prijungtas prie VDV, nejuda, nes VDV neveikia. Dėl žiedinio krumpliaračio 1 sukimosi, planetiniai krumpliaračiai 3 turi sukintis bei sukelti centrinio krumpliaračio 2 ir generatoriaus sukimąsi. Automobiliui greitėjant, generatorius sukasi nepriklausomai nuo automobilio greičio iki tol, kol VDV būna išjungtas.

Kai pasiekiamas apie 64 km/h greitis, VDV užkuriamas. Generatorius staiga keičia sukimosi greitį, todėl planetinis vediklis pasuka ir užveda VDV. Kai VDV veikia, jis sukasi pastoviu greičiu, o generatorius keičia savo greitį, kad atitiktų išvesties EV greitį. Jei pagreitėti pakankamai sunku, el.

variklis pasinaudoja papildoma energija iš traukos akumulatoriaus. Kai važiuojama atitinkamu greitkeliui greičiu, automobilis važiuos VDV ir el. energijos galios kombinacija, o el. energija tiekiamą iš generatoriaus.

Toyota Prius traukos baterijos niekada nereikia papildomai įkrauti, nes generatorius automatiškai palaiko tinkamą įkrovimo lygį.

1.8 Hibridinių automobilių elektros varikliai

Elektros variklis lyginant su vidaus degimo varikliu turi savo privalumų, tokių kaip tylus el. variklio darbas ir nėra tiesioginių teršalų. Daugiau el. variklio privalumų galima surasti 1.3 lentelėje.

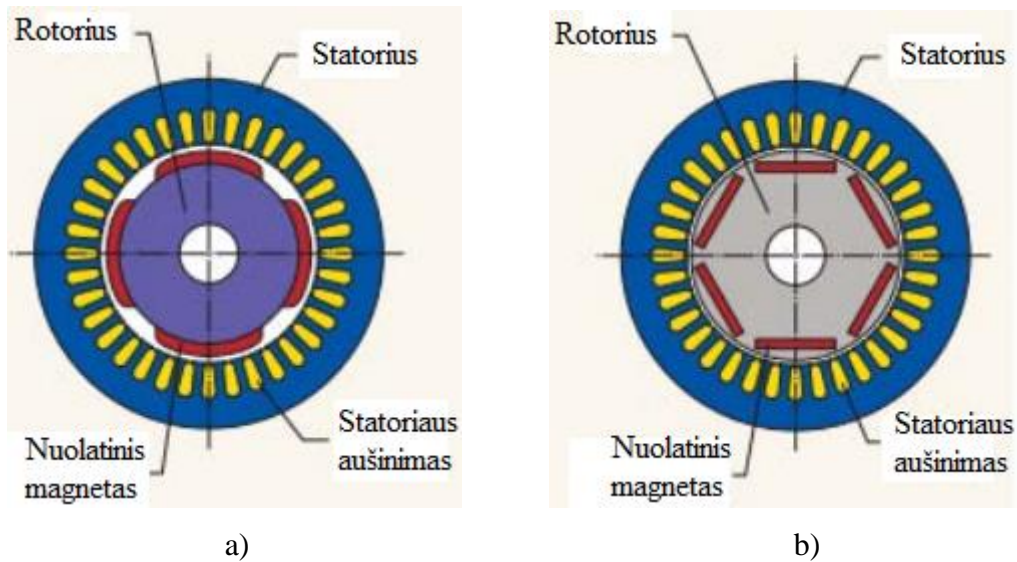
1.3 lentelė

El. variklio bei vidaus degimo variklio palyginimas[8]

Eil. nr.	Palyginami dalykai	Elektros variklis	Vidaus degimo variklis
1	Naudingumo koeficientas	geriausiu atveju 90-95 %	33 %
2	Variklio aušinimo sistema	Radiatorius nereikalingas	Reikalingas radiatorius
3	Teršalai	Tiesioginių teršalų nėra	Į aplinką išmetami teršalai
4	Tuščia veika	Nėra tuščios veikos	Yra tuščios veikos kuro nuostoliai
5	Energijos konversija	Stabdymo energija gražinama į bateriją	Negrįžtama
6	Variklio svoris	Lengvas ir mažas (75 kW – 13 kg; 5,8 kW/kg)	Didelis ir sunkus (0,7 kW/kg)
7	Erdvės poreikis	Gali būti įrengti automobilio ratuose	Reikalauja daug vietos automobilyje
8	Triukšmo lygis	Triukšmas labai mažas, duslintuvo nereikia	Triukšmingas, reikalingas duslintuvas

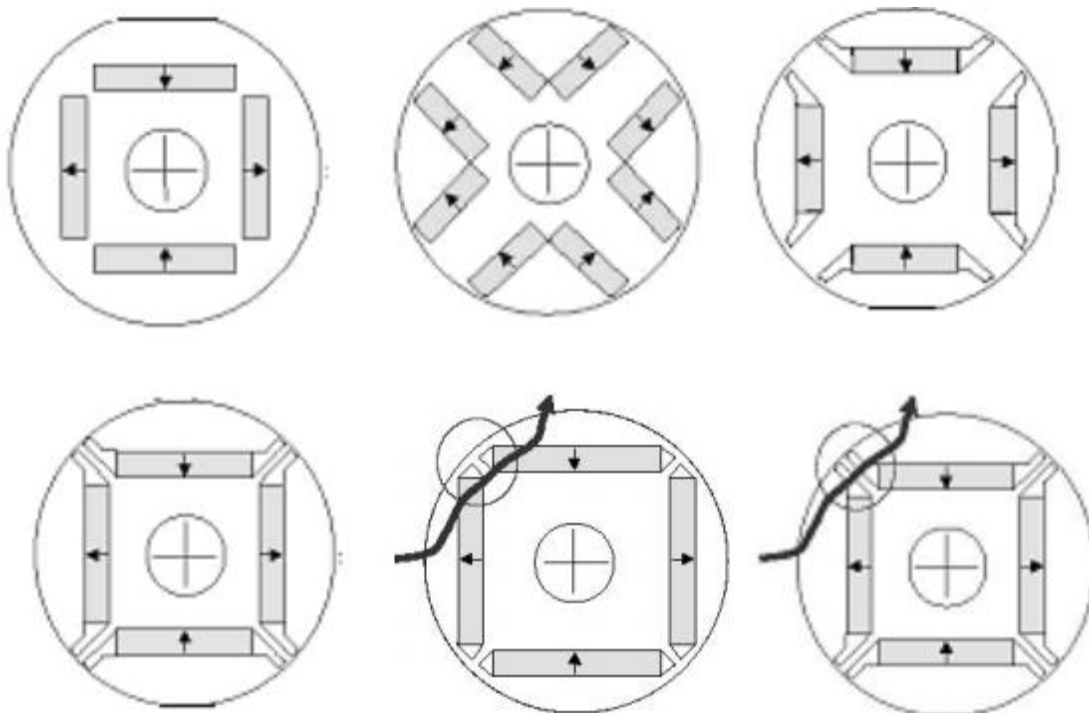
Hibridiniuose automobiliuose montuojami dviejų rūšių trifaziai kintamos srovės nuolatinio magneto sinchroniniai EV, t.y. el. varikliai, kuriuose nuolatiniai elektromagnetai integruoti rotoriaus paviršiuje (1.20 pav. a) bei jo viduje (1.20 pav. b). EV su nuolatiniais magnetais rotoriaus paviršiuje dominuoja pasaulyje.

EV su integruotais nuolatiniais elektromagnetais rotoriaus viduje yra pranašesni už EV su nuolatiniais magnetais rotoriaus paviršiuje, kadangi sukuriamas aukštesnis srauto tankis bei intensyvumas, ko pasekoje suteikiamas didesnis sukimo momentas. EV su integruotais nuolatiniais elektromagnetais naudojami įtaisuose, kuriuose reikalingas didelis sukimo momentas, tokiuose kaip, kranai, keltuvai, gervės taip pat šio tipo EV įtaisuose, kur reikalingi dideli energijos kiekiai (nepertraukiamo veikimo ventiliatoriai, siurbliai, kompresoriai). Šio EV mažesni šilumos nuostoliai, geometriniai matmenys bei taipogi paprastesnis sukimosi greičio reguliavimas.



1.20 pav. Hibridinių automobilių elektros variklių sandara: a – EV su nuolatiniais magnetais rotoriaus paviršiuje; b – EV su nuolatiniais magnetais rotoriaus viduje [12]

EV su nuolatiniais magnetais rotoriaus viduje turi keletą rotoriaus tipų, kurie pateikti 1.21 paveiksle.



1.21 pav. Synchroninio el. variklio su nuolatiniais magnetais rotoriaus viduje rotoriaus variantai [12]

Gaminant el. variklius su integruotais nuolatiniais magnetais rotoriuje, kurie naudojami HA, buvo susidurta su projektavimo problemomis, kaip keisti bei kontroliuoti nuolatinųjų magnetų sužadinimą bei parinkti optimalų rotoriaus sukimąsi, magnetines varžas. Be to EV su integruotais

rotoriaus viduje nuolatiniais elektromagnetais turi didesnę naudingumo koeficientą, kuris siekia 97,5%, lyginant su alternatyviu EV, kuris elektros energiją į mechaninę paverčia 94,6%.

1.9 Elektroninis galios modulis

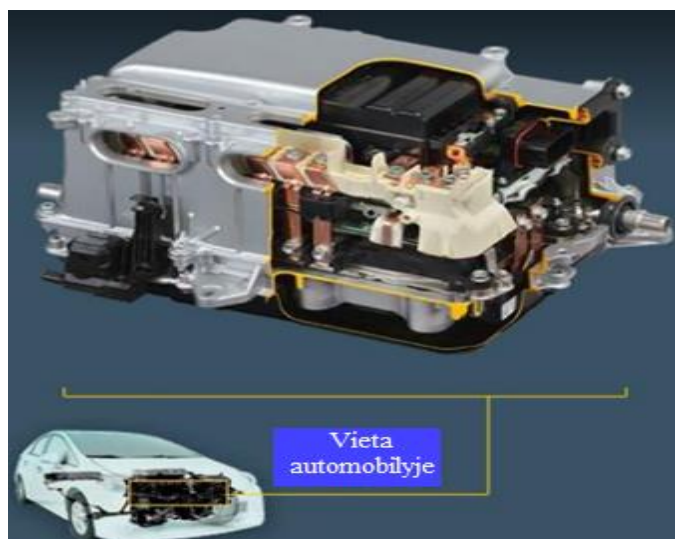
Šis modulis kontroliuoja energijos konvertavimo ir įkrovimo sistemas. Šio modulio pagalba kontroliuojami aukštos įtampos traukos baterijos įkrovimo bei iškrovimo parametrai. Taip pat kontroliuojamos įtampos vertės, EV apsisukimo dažnis, jo sukimo momentas bei regeneracinio stabdymo sistema. Kad traukos baterija neperkaistų, modulis valdo aliumines šilumos išsklaidymo plokšteles ir ventiliacijos liuką, įrengtą prie vairuotojo pusės galinio rato.

Pagrindiniai šio modulio komponentai:

- Rezistoriai;
- Aukštos įtampos kondensatoriai;
- Padėties davikliai (induktyvaus tipo);
- Inverteriai bei konverteriai.

Aukštos įtampos kondensatoriai naudojami filtruoti bei išlaikyti krovimo sistemoje reikalingą įtampą. Inverteriai ir konverteriai skirti aprūpinti įvairiomis įtampos vertėmis BAS iš automobilio krovimo sistemos. Inverteriai nuolatinę srovę paverčia elektros varikliui tinkančia elektros srove. Konverteriai keičia nuolatinės bei kintamos srovės įtampos vertes. Rezistoriai naudojami apriboti įėjimo srovei, kondensatorių iškrovimui, srovės lyginimui, maitinimo valdymui aukštos įtampos magistralėje, varžiniams šildytuvams ir t.t.

Inverteriai ir konverteriai dažniausiai sujungiami į vieną vienetą, kaip parodyta 1.22 paveiksle, valdo galios bei krovimo grandines.

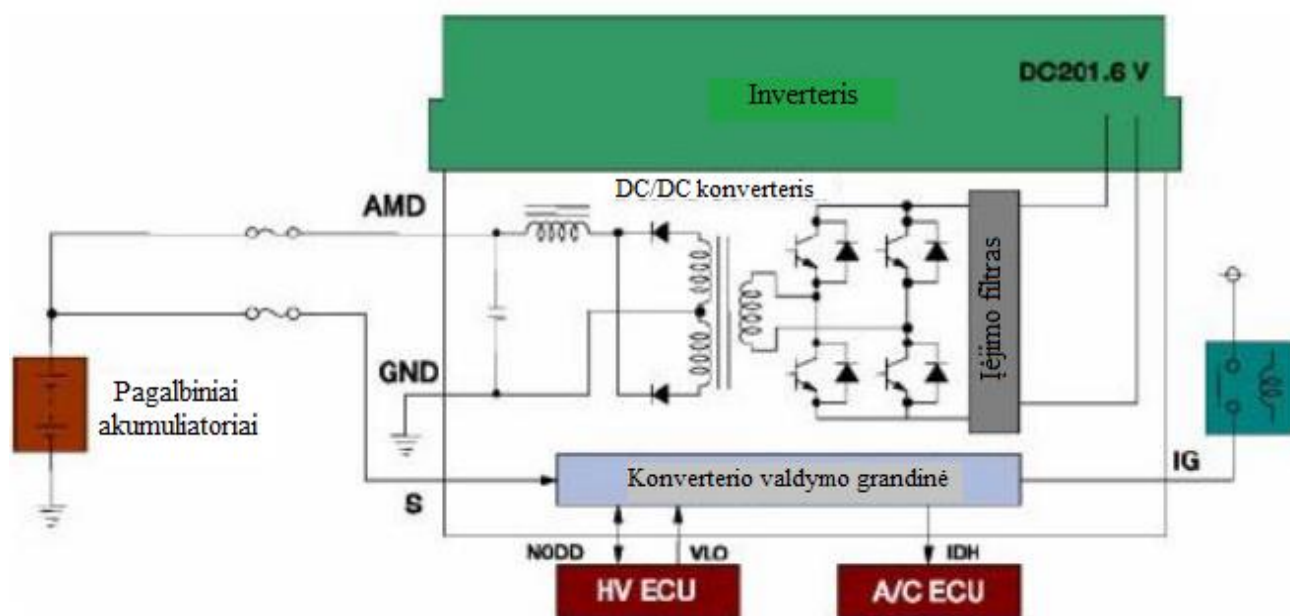


1.22 pav. Toyota Prius inverterių bei konverterių junginys bei jo vieta automobilyje [11]

Traukos baterijoje kaupiama žemos įtampos nuolatinė srovė (dažniausiai apie 210 V), taigi ji turi būti paverčiama kintama srove, nes hibridiniuose automobiliuose dažniausiai sutinkami didelio naudingumo koeficiento aukštos įtampos kintamos srovės trifaziai el. varikliai – generatoriai (apie 650 V). Inverterio – konverterio vienetė kartu dirba skirtingų įtampų bei srovės verčių srovės bei šis įrenginys gali turėti atskirą aušinimo sistemą. Inverteriai yra beveik tokie patys hibridiniuose automobiliuose bei elektromobiliuose, kurių galia iki 50 kW. IGBT inverteris pasižymi didele galia, aukštu efektyvumu bei greitu perjungimu, tačiau turi ir trūkumą, t.y. generuojama šiluma sunkia išsklaidoma, taigi mechanizmas gali perkaisti. SiC turi didesnę galios tankį, mažesnius energijos nuostolius bei didesnę darbinę temperatūrą, kuri reiškia mažesnes aušinimo išlaidas. SiC inverteris turi vieną minusą – didelę kainą. GaN inverteris turi geresnę kainos bei galimybių santykį lyginant su SiC.

Inverteris Toyota Prius automobilyje kaupiamą 201,6 V nuolatinę srovę paverčia kintama, kuri reikalinga oro kondicionavimo sistemos inverteriniam kintamos srovės kompresoriui.

Konverteriai keičia nuolatinės bei kintamos srovės dydį. Jie didina bendrą sistemos efektyvumą. Pavyzdžiui, nuolatinės srovės maitinimo įtampa 201,6 V paverčiama į 14 V nuolatinę srovę, kuri tiekama automobilio sistemoms kaip ECU. Toks nuolatinės srovės konverteris pavaizduotas 1.23 paveiksle, t.y. pateikta detali jo schema.



1.25 pav. DC/DC konverterio elektrinė schema [12]

Inverteriai ir konverteriai apjungiami į vieną vienetą dėka, kurio reikalingas tik aukštos įtampos traukos akumuliatorius. ECU ir kitoms sistemos 14 V nuolatinė srovė, trifaziams EV reikalinga apie 650 V kintama elektros srovė, taigi šiuos nesutapimus pašalina jungtinis konverterių ir inverterių vienetas.

2. TYRIMO METODIKA

Šiame skyriuje pateikiama natūrinių eksperimentų atlikimo metodika. Nustatoma vėjo įtaka, pradinis ratų pasipriešinimo riedėjimui koeficientas ir konkrečiu atveju nustatomas energijos kiekis regeneruotas į bateriją ir reikalingas pasipriešinimo jėgoms, frikciniam stabdymui.

2.1 Eksperimentuose naudota įranga

Siekiant surasti išnaudotus energijos kiekius aerodinaminei bei pasipriešinimo riedėjimui jėgoms nugalėti, frikciniam stabdymui išnaudotą bei regeneruotą į traukos bateriją buvo atliekami eksperimentai. Eksperimentams atlikti pasitelktas hibridinis Toyota Prius (XW30) automobilis (2.1 pav.). Šis, eksperimentams naudotas hibridinis automobilis, gali būti varomas 3 kuro rūšimis: benzinu, suskystintomis naftos dujomis (LPG) bei el. energija.



2.1 pav. Bandydams naudotas hibridinis automobilis Toyota Prius. [28]

Hibridinio automobilio geometrinės bei aerodinaminės charakteristikos, kurios pateiktos 2.1 lentelėje. Automobilio masė šioje lentelėje nurodyta, kaip techniniame automobilio pase, tačiau automobilyje yra sumontuota dujų įranga bei matavimo laiku hibridiniame automobilyje su vairuotoju buvo ir keleivis, taigi skaičiavimuose automobilio masę laikysime 1575 kg.

2.1 lentelė

Toyota Prius (XW30) geometrinės bei aerodinaminės charakteristikos [27]

Automobilio ilgis	4480 mm
Automobilio plotis	1745 mm
Automobilio aukštis	1491 mm
Automobilio masė	1350 kg
Midelio plotas	2,304 m ²
Aerodinaminis koeficientas	0,25

Šio hibridinio automobilio 1798 cm³ darbinio tūrio VDV gali būti varomas benzinu bei gamtinėmis dujomis. Taip pat jame yra trifazis sinchroninis elektros variklis.

Bandyams naudoto hibridinio automobilio jėgainių charakteristikos pateiktos 2.2 lentelėje.

2.2 lentelė

Toyota Prius (XW30) HSD hibridinės jėgainės charakteristikos [26, 28]

Vidaus degimo variklis	
Darbinis tūris	1798 cm ³
Variklio tipas	4 cilindrai, VVT-i, 16 vožtuvų, DOHC, Atkinsono ciklo 2ZR-FXE
Variklio veleno apsisukimai	1000-6500 aps/min
Maksimali galia	73 kW (98 AG)/ 5200 aps.
Maksimalus sukimo momentas	142 Nm/4000 aps.
Suspaudimo laipsnis	13,0:1
Terminis naudingumo koeficientas	0,38
Elektros varikliai	
MG1 maksimali įtampa	650 V
MG2 tipas	Trijų fazių, sinchroninis, nuolatinio magneto
MG2 sukimo momentas	207 Nm
MG2 galia	60 kW
MG2 maksimali įtampa	650 V (AC)
Aukštos įtampos traukos akumulatorius	
Baterijos tipas	NiMh, nuolatinės srovės
Baterijos įtampa	201,6 V (DC)
Maksimali galia	27 kW
Baterijos talpa	6,5 Ah
Maksimali srovė įkrovimo/ iškrovimo	100 A/100 A
Specifinė galia	1310 W/kg
Specifinė energija	44 Wh/kg

Bandyimų metu hibridinio automobilio greitį, pagreitį bei kitas dinamines charakteristikas užfiksuoti buvo pasitelktas „DL1 Data Logger“ matavimo prietaisas. Šio prietaiso užfiksuotus rodmenis vėliau naudosime skaičiavimuose ir duomenų palyginime. Prietaisas buvo lokacizuotas taip, kad jo koordinatų ašys x, y, z būtų lygiagrečios automobilio koordinatų sistemai. Šio prietaiso parengimą darbui galime matyti 2.2 bei 2.3 paveisluose, kuriuose pateikiama prietaiso lokalizacijos vieta bei jo prijungimas prie 12 V automobilio maitinimo sistemos, bei GPS antenos pritvirtinimas ant automobilio stogo. Antena tvirtinama nuolatinio magneto pagalba.



2.2 pav. „DL1 Data Logger“ matavimo prietaiso lokalizacija bei matavimo prijungimas.

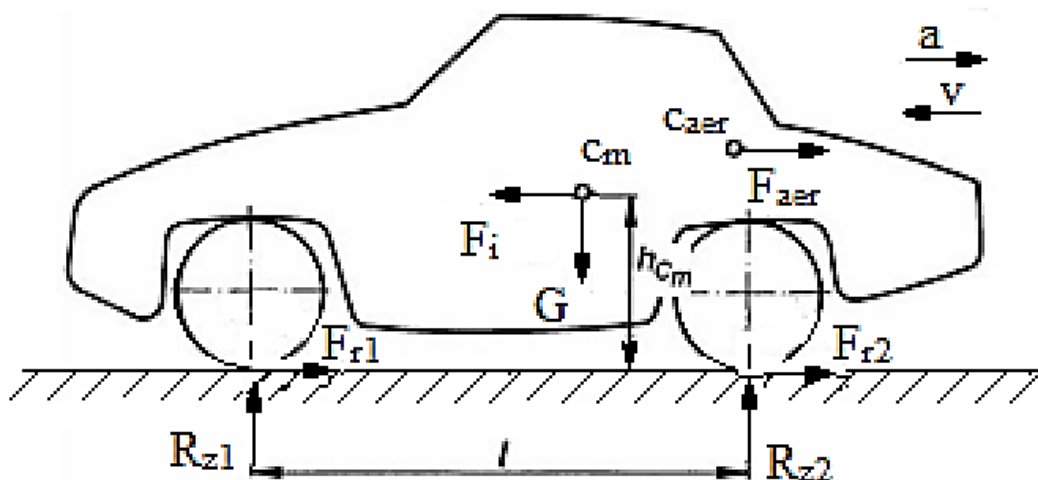


2.3 pav. „DL1 Data Logger“ matavimo prietaiso GPS antenos tvirtinimas ant automobilio stogo.

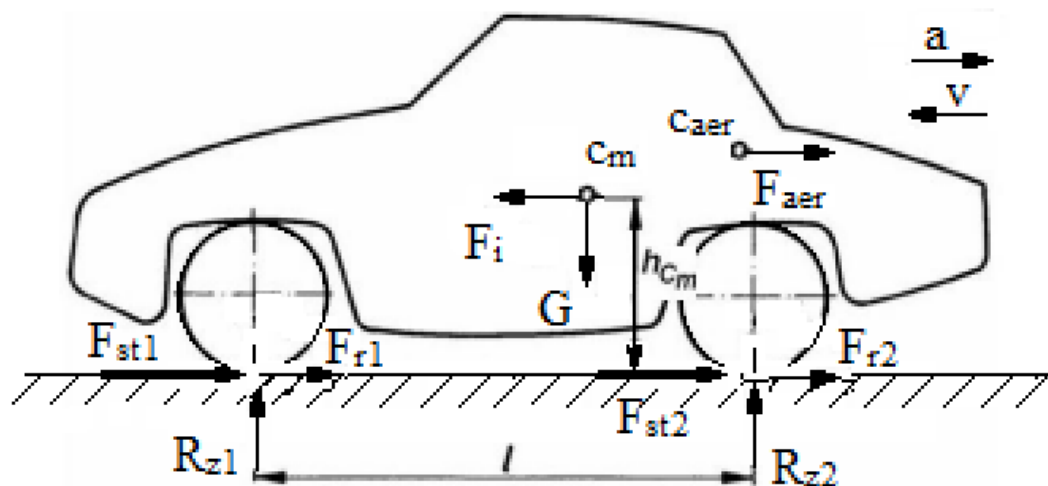
Įprastiniuose VDV varomuose automobiliuose, riedant laisva eiga arba esant įjuntai pavarai, automobilis lėtėja dėka aerodinaminio pasipriešinimo F_{aer} ir atitinkamai suminės priekinės F_{r1} bei užpakalinės F_{r2} automobilio ašių ratų pasipriešinimo riedėjimui jėgos. Automobilio greitį bando išlaikyti inercijos jėga F_i . Lėtėjant automobilio greičio ir pagreičio ir pagreičio kryptys priešingos. Pagreitis su minuso ženklu, o greitis su pliuso ženklu. Esant įjungtai pavarai dar susidaro nuostoliai automobilio transmisijoje. Automobilį veikiančių jėgų schema lėtėjant laisva eiga arba esant įjuntai pavarai pavaizduota 2.4 paveiksle. Šiame paveiksle automobilio svorio jėga žymima G raide, automobilio priekinės bei užpakalinės ašies reakcijos atitinkamai R_{z1} ir R_{z2} . Automobilio masės bei aerodinaminis centrai žymimi c_m ir c_{aer} .

Stabdymo metu prisideda prisideda suminė, priekinę F_{st1} bei užpakalinę F_{st2} automobilio ašis veikianti, ratų stabdymo jėga, kuri neleidžia ratams prisisukti, kitaip tariant stabdymui reikalinga energija pavirsta šiluma. Stabdymo metu automobilio masės centras pasislenka į priekį. Stabdymo metu automobilį veikiančios jėgos pateiktos pateiktos 2.5 paveiksle.

Hibridiniuose automobiliuose stabdymui reikalinga energija dalijama į dvi dalis: viena dalis elektros srovės pavidalu regeneruojama į traukos akumuliatorių, o kita dalis energijos prarandama šilumos pavidalu frikciniuose ratų stabdžiuose.



2.4 pav. Automobilį veikiančios jėgos lėtėjant laisva eiga arba esant įjungtai D pavarai [6]



2.5 pav. Automobilį veikiančios jėgos stabdymo metu [6]

Hibridiniuose automobiliuose įrengti įprastiniai frikciniai stabdžiai ir energijos regeneravimo sistema, kuri stabdymo metu regeneruotą energiją tiekia į hibridinio automobilio traukos bateriją. Matuojant į traukos bateriją tekančios srovės stiprį buvo naudojami keturių kanalų oscilografas „Picoscope 3423“ (2.6 pav.) ir kintamą bei nuolatinę srovę matuojančios srovės replės.



2.6 pav. Keturių kanalų oscilografas „Picoscope 3423“ [23]

Šio automobilinio oscilografo techninės charakteristikos pateiktos 2.3 lentelėje.

2.3 lentelė

Oscilografo „Picoscope 3423“ techninės charakteristikos [23]

Vertikali raiška	12 bitų
Analoginio signalo dažnis	10 MHz
Kanalų kiekis	4
Maksimalus reikšmių skaitymas per 1 s: 3-4 kanalų	$5 \cdot 10^6$
Įvestys	4 BNC įvestys su 1 MW galios varža
Matavimo diapazonai	$\pm 50 \text{ V}$, $\pm 20 \text{ V}$, $\pm 10 \text{ V}$, $\pm 5 \text{ V}$, $\pm 2 \text{ V}$, $\pm 1 \text{ V}$ $\pm 500 \text{ mV}$, $\pm 200 \text{ mV}$, $\pm 100 \text{ mV}$, $\pm 50 \text{ mV}$, $\pm 20 \text{ mV}$
Perkrovimo apsauga	$\pm 100 \text{ V}$
Paklaidos	Įtampos: 1 %, laiko: 0,005 %

Eksperimentams naudotos srovės replės taip pat to paties gamintojo. Jos techninės charakteristikos pateiktos 2.4 lentelėje.

2.4 lentelė

Srovės matavimo replių techninės charakteristikos

Svoris	290 g	
Laikymo temperatūra	-20 iki +70 °C	
Matavimo temperatūra	0 – 50 °C	
Tikslumas	DC 0 – 600 A	$\pm (2 \% \text{ skalės} + 2 \text{ A})$
	AC 0 – 400 A	$\pm (2 \% \text{ skalės} + 2 \text{ A})$
	AC 400 – 500 A	$\pm (3 \% \text{ skalės} + 2 \text{ A})$
	AC 500 – 600 A	$\pm (6 \% \text{ skalės} + 2 \text{ A})$
Apkrovos varža	10 k Ω	
Matavimo skalė	0 – 600 mV (0 – 600 A)	

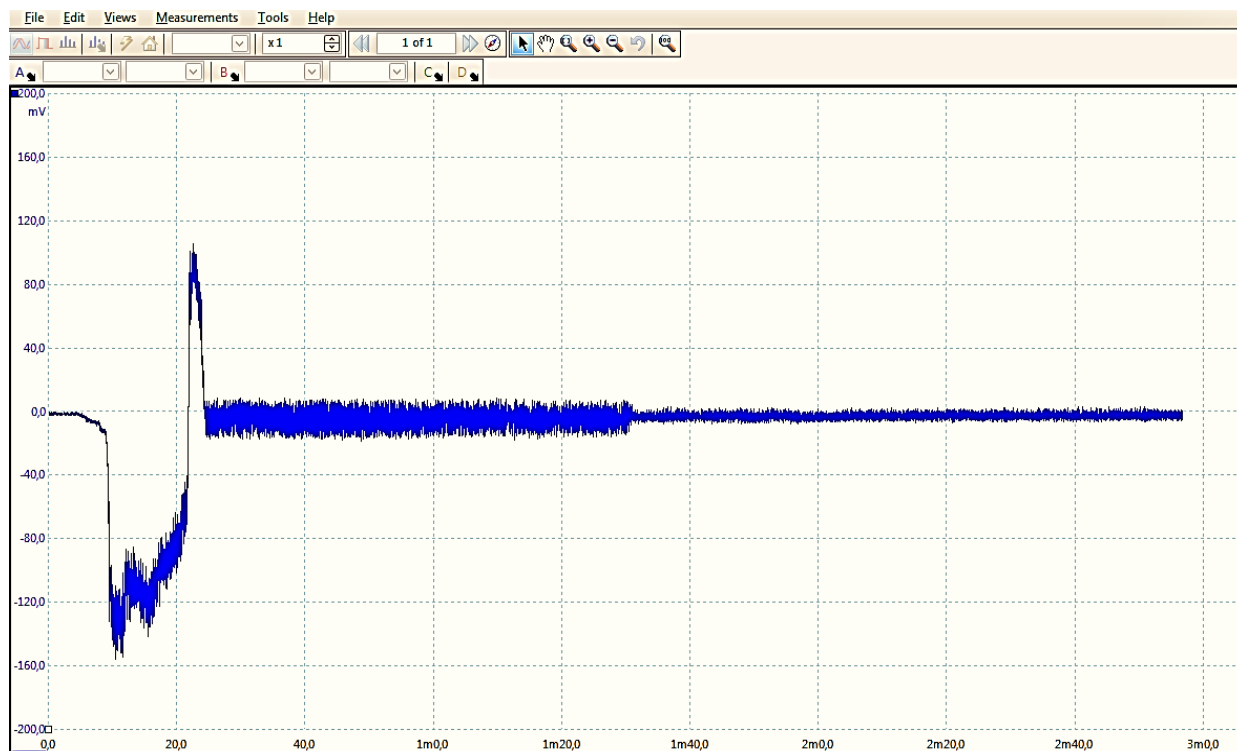
Atliekant natūrinių eksperimentus, srovės replės buvo uždėtos ant traukos baterijos įkrovimo/iškrovimo galios kabelio kaip pateikta 2.7(a) paveiksle, o 2.7 (b) paveikle pateiktas iš tolėliau nufotografuotas variklio skyriaus vaizdas su prijungtomis srovės replėmis.



2.7 pav. Srovės matavimo replės: a – jų uždėjimas ant galios kabelio; b – jų vaizdas kartu su variklio skyriumi

Matavimo replių laidas pro variklio skyrių, keleivio pusės pusės priekinių durelių stiklą buvo atvestas į automobilio saloną bei prijungtas prie automobilinio oscilografo „Picoscope 3423“, o šis per USB jungtį jungiamas prie nešiojamo kompiuterio. Automobilio salono viduje oscilografo vietą galima išvysti ankščiau pateiktame 2.2 paveiksle.

Srovės matavimo replių dėka išmatuotą įtampą užfiksuojuame „PicoScope 6“ duomenų vizualizavimo bei išsaugojimo programa. 2.8 paveiksle yra pateikta eksperimento metu gauti grafiniai rezultatai.



2.8 pav. Įtampos kitimo laike kreivė „PicoScope 6“ darbiniam lange

Atkreipiame dėmesį į tai, kad srovės stipris pateiktas mV, tačiau pagal srovės matavimo replių charakteristiką 1 mV atitinka 1A srovės stiprį. Srovės reikšmės buvo fiksuojamos kas 13,3 ms, o pasirinktas matavimo diapazonas ± 200 mV, nes apžvelgus į traukos baterijos charakteristikas galima maksimali 100A srovė, o tai atitinkamai pagal replių charakteristiką 100 mV.

2.2 Eksperimentų atlikimo sąlygos ir režimai

Eksperimentiniai matavimai vyko kelyje Kaunas – Jonava. Eksperimentų atlikimo metu oro temperatūra buvo 17 – 18 °C, vėjas - pietvakarių krypties, kurio greitis siekė 1-2 m/s (www.meteo.lt duomenimis).

Atliekant eksperimentus buvo matuojamas hibridinio automobilio regeneruojamos el. srovės stipris bei jo dinaminės charakteristikos.

Eksperimentinių matavimų atlikimo sąlygos:

- Matavimai atliekami kelio kryptimis: Jonava – Kaunas ir priešinga šiai kryptiai kryptimi.
- Visais režimais hibridiniu automobiliu įsibėgėjama iki 102 – 105 km/h ir nedidelį laiko tarpą išlaikomas šis greitis.
- Įjungtama matavimo įranga bei pradedamos fiksuoti regeneruojamos į traukos bateriją srovės vertės oscilografu „Picoscope 3423“ su prijungtomis matavimo replėmis bei hibridinio automobilio dinaminės charakteristikos matavimo prietaisu „DL1 Data Logger“ ;
- Lėtėjimo metu hibridinio automobilio vairuotojas stengiasi išpildyti pasirinkto režimo sąlygas.
- Eksperimento matavimai nutraukiami, kai automobilis pasiekia 25 km/h greitį riedant neutralia N ir stabdant D pavarą, o naudojant stabdžių pedalą - kol visiškai sustoja . Sustojimo metu gautos srovės stiprio vertės išsaugomos kompiuterio kietajame diske, o matavimo prietaiso „DL1 Data Logger“ duomenys – atminties kortelėje.

Režimai, kurių metu atliekami eksperimentiniai matavimai:

1. Automobilio stabdymas, esant išjungtai pavarai (pavarų perjungimo svirtis N padėtyje). Automobilis stabdomas tik aerodinaminės ir ratų pasipriešinimo riedėjimui jėgų. Šiuo režimu atliekami matavimai, norint gauti reikalingų duomenų, kad būtų galima apskaičiuoti pradinį ratų pasipriešinimo riedėjimui koeficientą bei vėjo greitį. Šio režimu metu matuojamos tik automobilio dinaminės charakteristikos prietaisu „DL1 Data Logger“.

2. Automobilio stabdymas, esant įjungtai pavarai be stabdžių pedalo paspaudimo (pavarų perjungimo svirtis D padėtyje). Kadangi žinome, kad šis hibridinis automobilis regeneruoja el. energiją į traukos bateriją esant įjungtai D pavarai, taigi atliekame matavimus šiuo režimu (2.9 pav.).



2.9 pav. Hibridinio automobilio prietaisų skydelio rodmenys atliekant 2 režimo matavimus.

3. Automobilio stabdymas, esant įjungtai pavarai (pavarų perjungimo svirtis D padėtyje) bei stabdymas stabdžių pedalo paspaudimu, siekiant išlaikyti apie pusę prietaisų skydelyje rodomos traukos akumulatoriaus krovimo skalės (2.10 pav.). Prietaisų skydelyje rodomas traukos akumulatoriaus krovimo lygis 2.10 pav. rodomas CHG (anglų kalboje charging) skalėje.



2.10 pav. Hibridinio automobilio prietaisų skydelio rodmenys atliekant 3 režimo matavimus.

4. Automobilio stabdymas, esant įjungtai pavarai (pavarų perjungimo svirtis D padėtyje) bei stabdymas stabdžių pedalo paspaudimu, siekiant išlaikyti pilnai užpildytą prietaisų skydelyje rodomą traukos baterijos krovimo skalę (2.11 pav.).



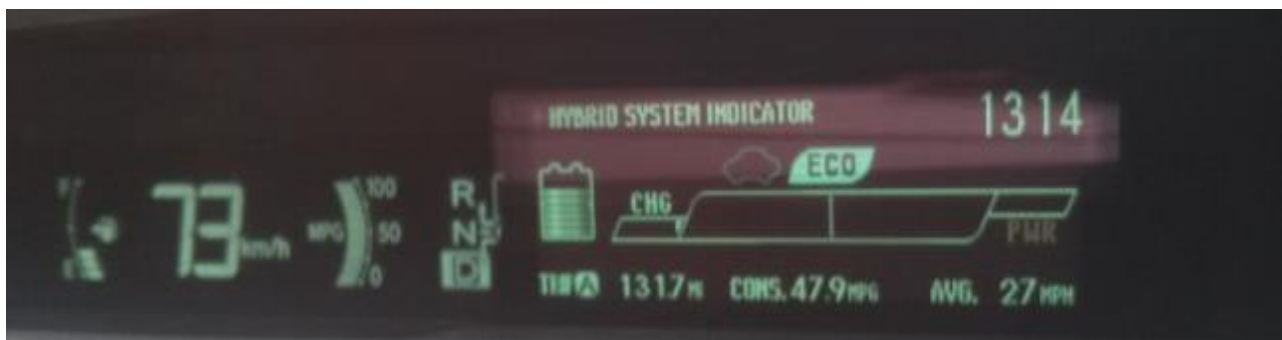
2.11 pav. Hibridinio automobilio prietaisų skydelio vaizdas atliekant matavimus 4 režimu

5. Automobilio stabdymas, esant įjungtai pavarai (pavarų perjungimo svirtis D padėtyje) bei stabdant stabdžių pedalo paspaudimu virš pilnai užpildytos traukos baterijos krovimo skalės.

6. Automobilio stabdymas, esant įjungtai pavarai (pavarų perjungimo svirtis D padėtyje) bei stabdymas stabdžių pedalo paspaudimu, siekiant imituoti mieste pasitaikančius įvairaus intensyvumo bei trukmės stabdymus. 2.12 paveiksle pavaizduotos įvairios traukos akumulatoriaus krovimo reikšmės, kurias sukelia skirtingi stabdymo intensyvumai.



a)



b)

2.12 pav. Hibridinio automobilio prietaisų skydelio vaizdas atliekant matavimus 6 režimu: a – stabdant intensyviai darbiniais stabdžiais; b – stabdant mažu darbinį stabdžių intensyvumu

Suprantama, kad hibridinio automobilio vairuotojui nepavyks tiksliai išpildyti pasirinktų režimo sąlygų, tad 2.5 lentelėje pateikiamos atliktų eksperimentų pagrindinės charakteristikos bei priežastys, koku tikslu juos atlikome.

2.5 lentelė

Atliktų eksperimentų pagrindinės charakteristikos ir tikslai

Eil. nr.	Eksperimento pavadinimas	t, s	$a_{st}, m/s^2$	Eksperimento sąlygos	Eksperimento tikslas
1.	N ₁	152,4	0,13484	Riedėjimas neutralia N pavarą (pavėjui).	Vėjo greičio įtakos ir pradinio ratų pasipriešinimo riedėjimui koeficiento nustatymas
2.	N ₂	132	0,15775	Riedėjimas neutralia N pavarą (prieš vėją).	

3.	D_1	61,4	0,34091	Stabdymas D pavara (pavėjui).	Regeneruojamos į traukos bateriją elektros srovės stiprio ir automobilio dinaminių charakteristikų (greičio ir pagreičio) kitimo laike nustatymas.
4.	D_2	59,1	0,35469	Stabdymas D pavara (prieš vėją).	
5.	$1S_1$	50,3	0,55188	Neintensyvus stabdymas (prieš vėją)	
6.	$1S_2$	45,7	0,59902	Neintensyvus stabdymas (pavėjui)	
7.	$2S_1$	35,4	0,78409	Vidutiniško intensyvumo stabdymas (prieš vėją)	
8.	$2S_2$	29,5	0,93267	Vidutiniško intensyvo stabdymas (pavėjui)	
9.	$3S_1$	22,9	1,21289	Intensyvus stabdymas (prieš vėją)	
10.	$3S_2$	21,2	1,30694	Intensyvus stabdymas (pavėjui)	
11.	$4S_1$	14,7	1,88323	Labai intensyvus stabdymas (pavėjui).	
12.	$4S_2$	14,3	1,94940	Labai intensyvus stabdymas (prieš vėją).	

Eksperimentų atlikimo nustatyti, regeneruojamą į traukos bateriją energijos kiekį, esant skirtingai dydžio automobilio lėtėjimo pagreičiui (vidutinei jo reikšmei).

Siekiant ištirti hibridinio automobilio stabdymo procesą reikia nustatyti, aerodinaminei bei pasipriešinimo riedėjimui jėgoms reikalingus energijos kiekius. Taip pat surasti energijos kiekį, išnaudotą stabdant frikcinius stabdžius.

Norint apskaičiuoti pasipriešinimo riedėjimui bei aerodinaminę jėgą, reikia nustatyti vėjo greitį – v_v bei paradinį pasipriešinimo riedėjimui koeficientą – f_0 . Šių faktorių reikšmės bus skaičiuojamos 2.3 bei 2.4 skyriuose.

2.3 Vėjo greičio įtakos nustatymas

Siekdami gauti tikslesnius rezultatus, skaičiuojant aerodinaminę pasipriešinimo jėgą F_{aer} , turime įvertinti vėjo greitį ir kryptį. Vėjas buvo pietvakarių krypties (minėta 2.2 skyriuje), t.y. eksperimentų metu automobilio važiavimo kryptys buvo prieš vėją bei pavėjui.

Vėjo greitį nustatome iš riedėjimo neutralia pavara N eksperimentų N_1 ir N_2 (žiūrėti 2.5 lentelę), atliekant juos prieš vėją bei pavėjui. Skaičiavimams naudojama matavimo prietaiso „DL1 Data Logger“ gauti automobilio greičiai. Vėjo greitis ir kryptis labiausiai įtakoja aerodinaminei jėgai – F_{aer} , kuri apskaičiuojama naudojantis 2.1 išraiška:

$$F_{aer} = \frac{c_d \cdot A \cdot \rho \cdot v^2}{2} \quad (2.1)$$

čia:

c_d – automobilio aerodinaminio pasipriešinimo koeficientas (2.1 lentelė);

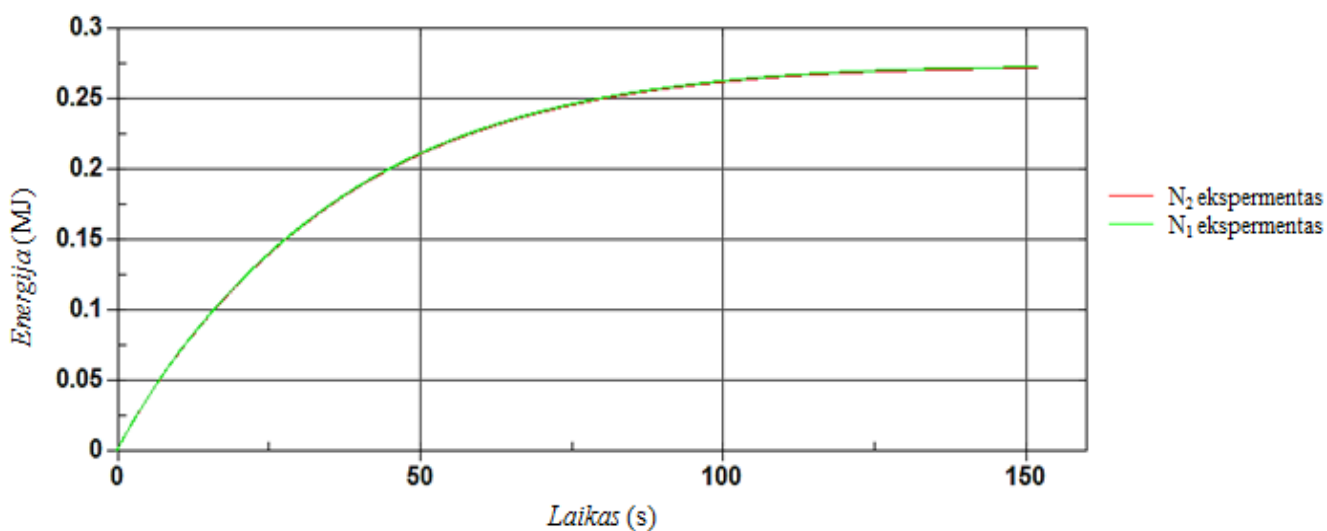
A – midelio plotas, m^2 (2.1 lentelė);

ρ – oro tankis, kuris lygus $1,29 \text{ kg/m}^3$;

v – automobilio greitis, m/s .

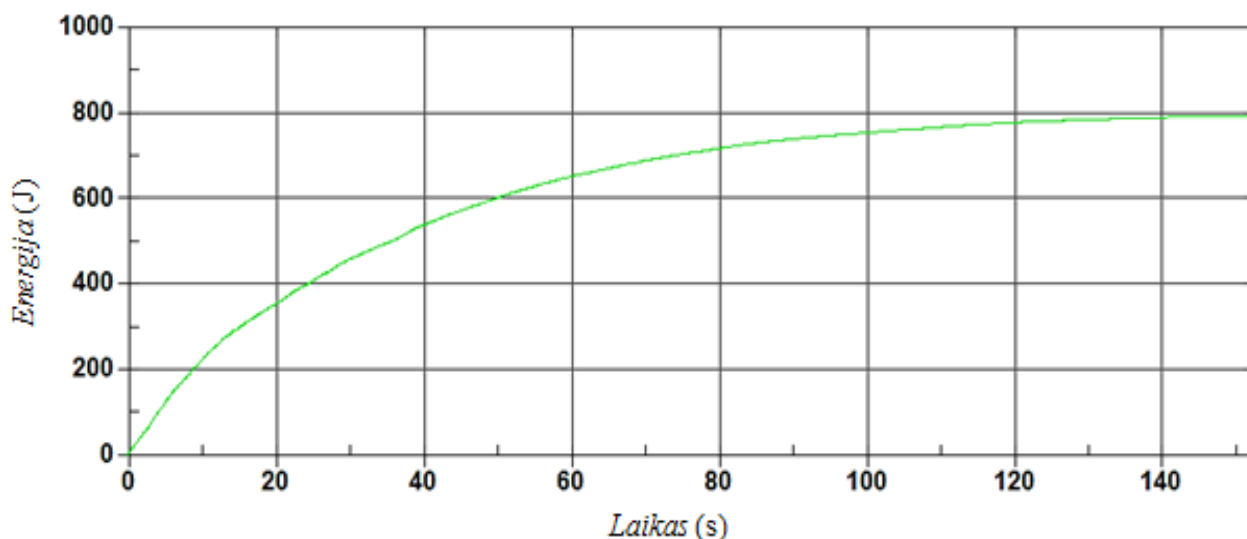
Aerodinaminės jėgos skaičiuojamos 152,4 s laiko intervale, kol automobilio greitis nuo 100 km/h pasikeitė iki 25,39 km/h pavėjui, prieš vėją – iki 17,97 km/h. Apskaičiavus aerodinamines jėgas, jos dauginamos iš momentinio automobilio greičio (žinoma, kad jėgos ir greičio vektorių skalarinė sandauga lygi galiui). Taip gaunama jėgai F_{aer} nugalėti reikalingos galios – P kitimo kreivė. Ją integravus laiko anžvilgiu gaunama energija - E_{aer} , reikalingą nugalėti jėgai F_{aer} .

Eksperimentų N_1 ir N_2 energijos kiekio, reikalingo aerodinaminei jėgai, priklausomybės nuo laiko pateiktos 2.13 paveiksle.



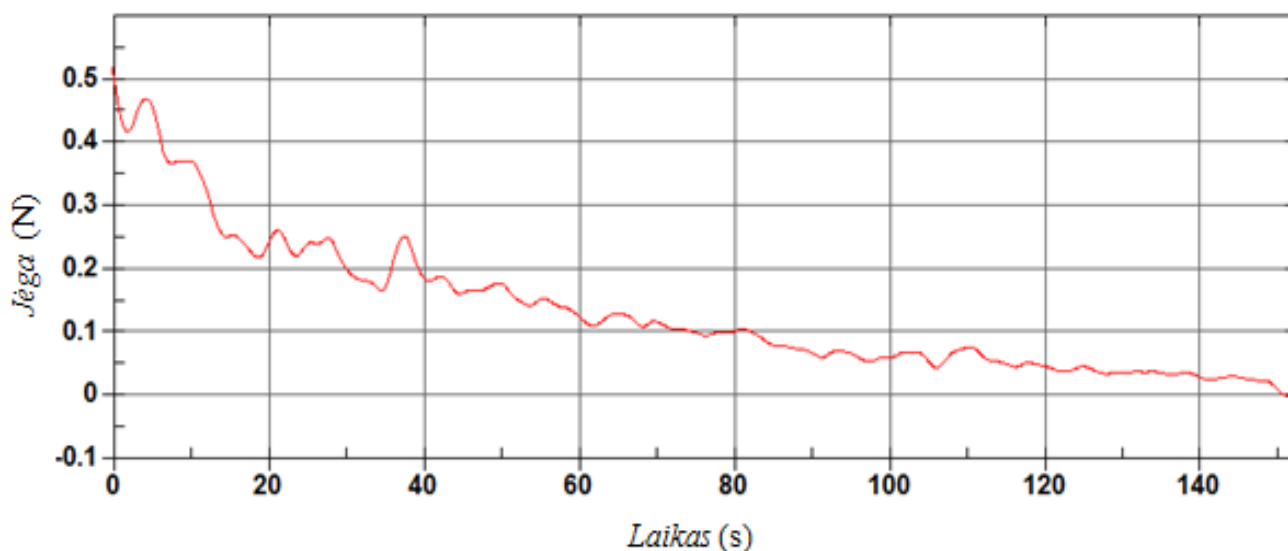
2.13 pav. Eksperimentų N_1 ir N_2 energijos kiekio, reikalingo aerodinaminei jėgai, priklausomybės nuo laiko

Energijos skirtumas susidaro dėka vėjo, t.y. esant tokiai pat skaitinei greičio reikšmei laiko momentu F_{aer} sumažėja pavėjui, o prieš vėją – atvirkščiai padidėja, dėl aerodinaminės jėgos formulėje naudojamo apipučiamo kūno greičio reikšmės (t.y sumuojasi automobilio ir vėjo greičiai esant priešingai jų veikimo kryptims, o esant tokiai pat minusuojasi vėjo greitis). Dėka vėjo greičio, susidariusio energijos kiekio priklausomybė nuo laiko pateikta 2.14 paveiksle.



2.14 pav. Suminė vėjo sukuriama energijos kiekio priklausomybė nuo laiko

2.14 pav. pateiktą priklausomybę diferencijuojant laiko atžvilgiu gaunama galios kitimas laike, o jį padalijus iš eksperimentų N_1 ir N_2 vidutinio automobilio greičio priklausomybės nuo laiko – gaunama dėka vėjo suteiktos jėgos F_{aerv} kitimo laike grafikas. Ši kreivė dalijama pusiau, darant prielaidą, kad vėjas tokio paties dydžio jėga veikia tiek artėjantį, tiek tolstantį automobilį tik skiriasi jų kryptys. 2.15 paveiksle pateikta vėjo pridedamos jėgos F_{aerv} , priklausomybė nuo laiko.



2.15 pav. Vėjo sukurtos aerodinaminės jėgos priklausomybė nuo laiko

Susumavus visas vėjo pridedamos jėgos F_{aerv} reikšmes laike, gaunama jos vidutinė reikšmė lygi 0,1333 N. Pasinaudojus 2.1 išraiška, lengvai apskaičiuojama vidutinė vėjo greičio – v_v reikšmė, pertvarkius 2.1 į 2.2 išraišką:

$$v_v = \sqrt{\frac{F_{aerv}}{c_d \cdot A \cdot \rho}}; \quad (2.2)$$

$$v_v = \sqrt{\frac{0,1333}{0,25 \cdot 2,304 \cdot 1,29}} = 0,599 \text{ m/s.}$$

Gautas vėjo greitis lygus 0,599 m/s, tačiau jo skaičiavimams naudoti negalime, nes eksperimentų atlikimo metu vėjo greitis protarpais padidėdavo, t.y susidarydavo stipresni vėjo gūšiai, kurie galėjo siekti 2 – 3 m/s. Tai vietoje apskaičiuotos vėjo greičio reikšmės, skaičiavimams ji pakoreguojama iki 1 m/s, dėl jau anksčiau minėtos priežasties.

2.4 Pradinio pasipriešinimo riedėjimui koeficiento nustatymas

Nuo pradinės ratų pasipriešinimo riedėjimui koeficiento – f_0 skaitinės reikšmės priklauso ratų pasipriešinimo riedėjimui jėga. Šis koeficientas skaičiuojamas, remiantis riedėjimo laisva eiga N_1 ir N_2 (žr. 2.5 lentelė) eksperimentiniais rezultatais. Naudojantis prietaiso „DL1 Data Logger“ gautais duomenimis, t.y hibridinio automobilio stabdymo greičiais ir pagreičiais bei perkėlus juos į kompiuterinę programą Microsoft Excell, nustatomi vidutiniai greičiai ir pagreičiai pasirinktose greičio mažėjimo atkarpose. Nustatytus 1 ir 2 bandymo automobilio vidutinius greičius bei pagreičius užrašome 2.6 ir 2.7 lentelėse. Turint šiuos duomenis ir žinant, kad automobilio stabdymą neutralia pavara suteikia priešingos važiavimo krypties pasipriešinimo jėgos: aerodinaminė jėga – F_{aer} ir ratų pasipriešinimo riedėjimui jėga – F_r , galime pasinaudoti antruoju Niutono dėsnio (kūną veikiančių jėgų atstojamoji lygi kūno masės ir įgyjamo pagreičio sandaugai). Šį dėsnį galima pateikti 2.3 išraiška:

$$m \cdot a + F_{aer} + F_r = 0; \quad (2.3)$$

čia:

m – automobilio su keleiviais masė, kg;

a – automobilio vidutinis pagreitis nagrinėjamo greičio atkarpoje, m/s^2 ;

F_{aer} – aerodinaminė jėga, N;

F_r – ratų pasipriešinimo riedėjimui jėga, N.

Žinoma, kad aerodinaminė ir ratų pasipriešinimo riedėjimui jėgos yra tokios pat krypties, t.y. priešingos automobilio važiavimui. Pertvarkius ankstesnę formulę gauname 2.4 išraišką:

$$F_{aer} + F_r = -m \cdot a \quad (2.4)$$

Aerodinaminė jėga skaičiuojama pagal 2.1 išraišką. Formulėje naudojamos automobilio greičio reikšmės prieš vėją bus 1 m/s didinamos, o pavėjui – 1 m/s mažinamos, siekiant įvertinti eksperimentų atlikimo metu vyravusį vėją, kurio priimtas skaičiavimams vidutinis greitis siekia 1 m/s.

Ratų pasipriešinimo riedėjimui jėga nustatoma pagal 2.5 išraišką. Ši jėga priklauso nuo automobilio greičio kvadrato, nes sprendžiant pagal 2.6 išraišką ratų pasipriešinimo riedėjimui koeficientas didėjant automobilio greičiui padidėja.

$$F_r = G \cdot f_a \quad (2.5)$$

čia:

G – automobilio svorio jėga, kuri lygi automobilio masės m ir laisvojo kritimo pagreičio g sandaugai, N;

f_a – pasipriešinimo riedėjimui koeficientas, esant atitinkamai greičio reikšmei.

$$f_a(v) = f_0 \cdot \left(1 + \frac{v^2}{1800} \right) \quad (2.6)$$

čia: f_0 – pradinis pasipriešinimo riedėjimui koeficientas.

Taigi, įstačius į 2.3 išraišką aptartas matematinės jėgų formules, gaunama 2.7 išraiška:

$$-ma = G \cdot f_0 \cdot \left(1 + \frac{v^2}{1800} \right) + \frac{c_d \cdot A \cdot \rho \cdot v^2}{2} \quad (2.7)$$

Pertvarkius ją gaunama 2.8 išraiška, kuria naudojantis galime apskaičiuoti pradinį ratų pasipriešinimo riedėjimui koeficientą – f_0 :

$$f_0 = \frac{-m \cdot a - \frac{c_d \cdot A \cdot \rho \cdot v^2}{2}}{m \cdot g \cdot \left(1 + \frac{v^2}{1800} \right)} \quad (2.8)$$

Pateikiama pavyzdinė N_1 eksperimento pradinio ratų pasipriešinimo riedėjimui koeficiento skaičiuotė, greičio mažėjimo nuo 79 km/h iki 75 km/h:

$$f_0 = \frac{-1575 \cdot (-0,49106) - \frac{0,25 \cdot 2,304 \cdot 1,29 \cdot (21,37295 + 1)^2}{2}}{1575 \cdot 9,81 \cdot \left(1 + \frac{21,37295^2}{1800} \right)} = 0,00812$$

Eksperimento N₁ pradinio ratų pasipriešinimo riedėjimui koeficiento skaičiavimo rezultatai

Greičio atkarpa, km/h	v_{vid} (m/s)	a_{vid} (m/s ²)	f	f_0	f_0 (perskaičiuotas)
100 -96	27,24706	-0,28971	0,01035	0,0963	0,0088
79 – 75	21,37295	-0,19770	0,00776	0,00812	0,00857
64 – 60	17,20674	-0,16752	0,00911	0,00884	0,00844
40 -36	10,58373	-0,11490	0,00849	0,00839	0,00829
				0,00866	

Eksperimento N₂ pradinio ratų pasipriešinimo riedėjimui koeficiento skaičiavimo rezultatai

Greičio atkarpa, km/h	v_{vid} (m/s)	a_{vid} (m/s ²)	f	f_0	f_0 (perskaičiuotas)
100 -96	27,24778	-0,23030	0,00691	0,00643	0,0088
79 – 75	21,37625	-0,19426	0,00982	0,00939	0,00857
64 – 60	17,23997	-0,13618	0,00754	0,00732	0,00844
40 -36	10,57953	-0,09866	0,00785	0,00776	0,00829
				0,00773	

Pradinis ratų pasipriešinimo riedėjimui koeficientas f_0 nustatomas sumuojant N₁ ir N₂ eksperimentų gautus šio koeficiento aritmetinius vidurkius bei padalijus pusiau pagal 2.9 išraišką:

$$f_0 = \frac{f_{01} + f_{02}}{2} \quad (2.9)$$

čia:

f_{01} ir f_{02} – N₁ ir N₂ eksperimentų pradinio ratų pasipriešinimo riedėjimui koeficientų aritmetiniai vidurkiai.

$$f_0 = \frac{0,00866 + 0,00773}{2} = 0,008195$$

Nustatytas pradinis ratų pasipriešinimo riedėjimui koeficientas f_0 lygus 0,008195, o šio koeficiento ribos geros būklės asfaltbetoniui, kintant automobilio greičiui, siekia 0,007 – 0,015.

2.5 Energijos kiekio, reikalingo pasipriešinimo jėgoms, frikciniams stabdžiams ir regeneruoto į traukos bateriją jo kiekio nustatymas

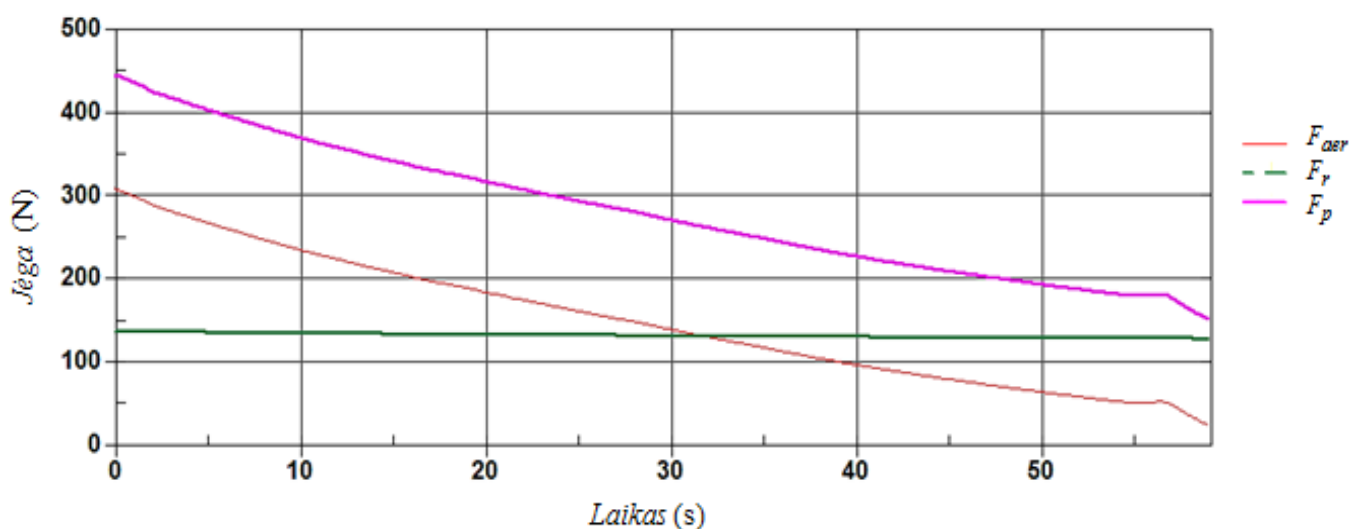
Šiame skyriuje aptariamas regeneruoto į traukos bateriją ir reikalingo pasipriešinimo jėgoms, frikciniam stabdymui energijos kiekio skaičiavimas.

2.5.1 Pasipriešinimo jėgoms išnaudoto energijos kiekio nustatymas

Konkreto atvejo, pasipriešinimo jėgoms išnaudoto energijos kiekio skaičiavimui, naudojami eksperimento D₂ (2.5 lentelė) duomenys .

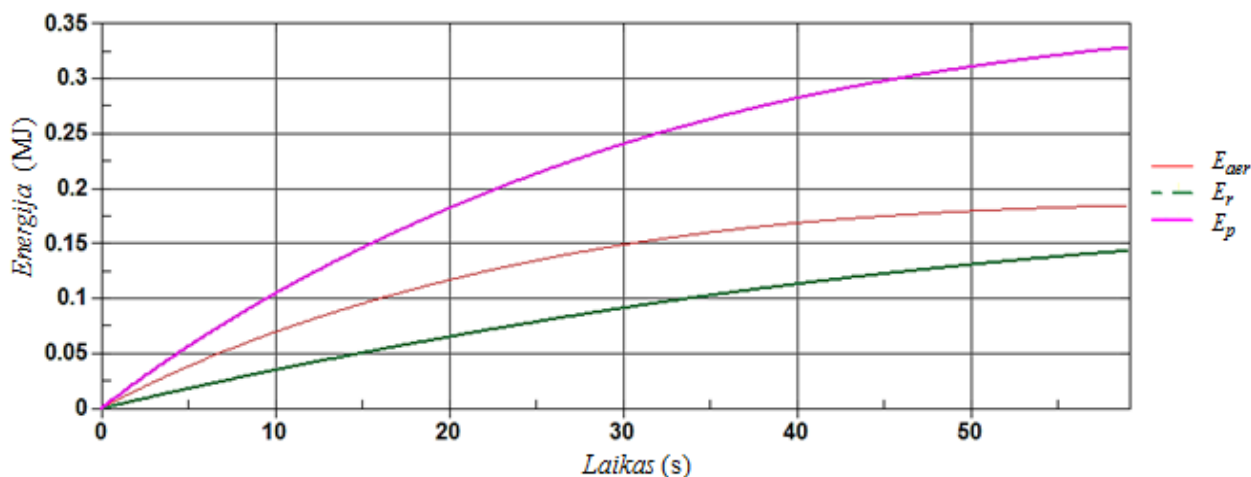
Neutralia pavara riedantį automobilį veikia dvi priešingos jo judėjimo krypties jėgos: aerodinaminė F_{aer} ir ratų pasipriešinimo riedėjimui F_r . Šios jėgos skaičiuojamos atitinkamai pagal 2.1 ir 2.5 išraiškas. Abi jėgas sudėjus gaunama suminė pasipriešinimo jėga – F_p , kuri išnaudoja visą kinetinės energijos pokytį. Nagrinėjamu D₂ eksperimento atveju kinetinės energijos kiekio pokytis išnaudojamas pasipriešinimo jėgoms ir įkrautai į bateriją srovei. Prisimename, kad šio eksperimento atveju, skaičiuojant aerodinaminę jėgą F_{aer} , prie automobilio greičio pridedamas vėjo greitis (eksperimentas vyko prieš vėją).

Eksperimento D₂ metu, vidutinė automobilio stabdymo pagreičio reikšmė lygi $a_{st} = 0,35469\text{m/s}^2$. Nustatytas pasipriešinimo jėgų – F_{aer} , F_r ir jų bendros sumos priklausomybės nuo laiko matome 2.16 paveiksle.



2.16 pav. Pasipriešinimo jėgų priklausomybės nuo laiko (eksperimentas D₂)

Jėgų reikšmės padauginus iš kūno (automobilio) greičio, nustatomos reikalingos galios aerodinaminei F_{aer} , pasipriešinimo riedėjimui F_r ir suminei pasipriešinimo F_p jėgoms priklausomybės nuo laiko. Gautas galios reikšmės suintegravus pagal laiką nuo t_0 (prasideda stabdymas) iki t (automobilis pilnai sustoja arba šiuo atveju sustabdomas iki 25 km/h) nustatomos reikalingo pasipriešinimo jėgoms energijos kiekio priklausomybės nuo laiko, kurios pateikiamos 2.17 paveiksle. Stabdant D pavara hibridinis automobilis visiškai nesustoja, nes mažuose greičiuose naudojama el. energija iš traukos baterijos, kuri palaiko mažą automobilio greitį.

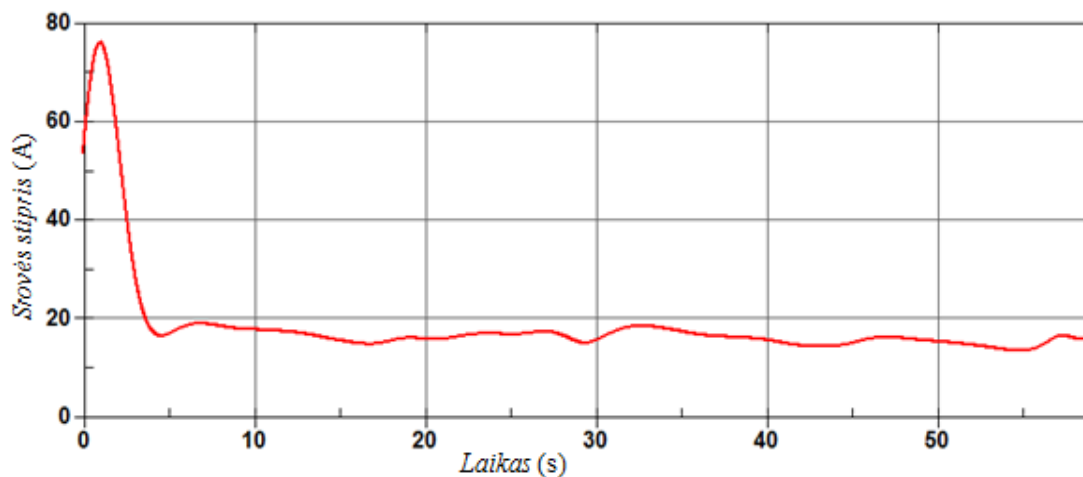


2.17 pav. Pasipriešinimo jėgoms reikalingo energijos kiekio priklausomybės nuo laiko (eksperimentas D₂)

Nagrinėjamu atveju matome, kad didelė dalis energijos prarandama dėl aerodinaminės jėgos – $E_{aer} = 0,185205$ MJ, o dėl pasipriešinimo riedėjimui jėgos $E_r = 0,145492$ MJ. Suminei jėgų dedamajai nugalėti reikalinga $0,328697$ MJ energijos kiekio. Šio eksperimento metu hibridinis automobilis sulėtėjo nuo 100 iki 25 km/h per 59,1 s.

2.5.2 Į traukos bateriją regeneruoto energijos kiekio nustatymas

Regeneruotos energijos kiekio metodikos nustatymui naudojami eksperimento D₂ rezultatais. Regeneruotos energijos kiekis į traukos bateriją nustatomas iš matuoto srovės stiprio rezultatų. Pasinaudojus oscilografu „Picoscope 3423“ ir srovės replėmis, nustatomos srovės stiprio vertės eksperimento metu. 2.18 paveiksle pateikta srovės stiprio priklausomybė nuo laiko. 2.18 paveiksle pateikta srovės stiprio priklausomybė nuo laiko filtruota naudojantis programinės įrangos LS DYNA duomenų analizės programa PrePost filtru sae/sfc, o pasirinktas filtravimo dažnis lygus 108 Hz.



2.18 pav. Regeneruojamos el. srovės stiprio priklausomybė nuo laiko (eksperimentas D₂)

Žinoma, kad srovės atliktas darbas lygus energijos kiekiui, regeneruotam į bateriją. Srovės atliktas darbas – A apskaičiuojamas pagal 2.10 išraišką:

$$A = \int_0^t I(t) \cdot U(t) dt \quad (2.10)$$

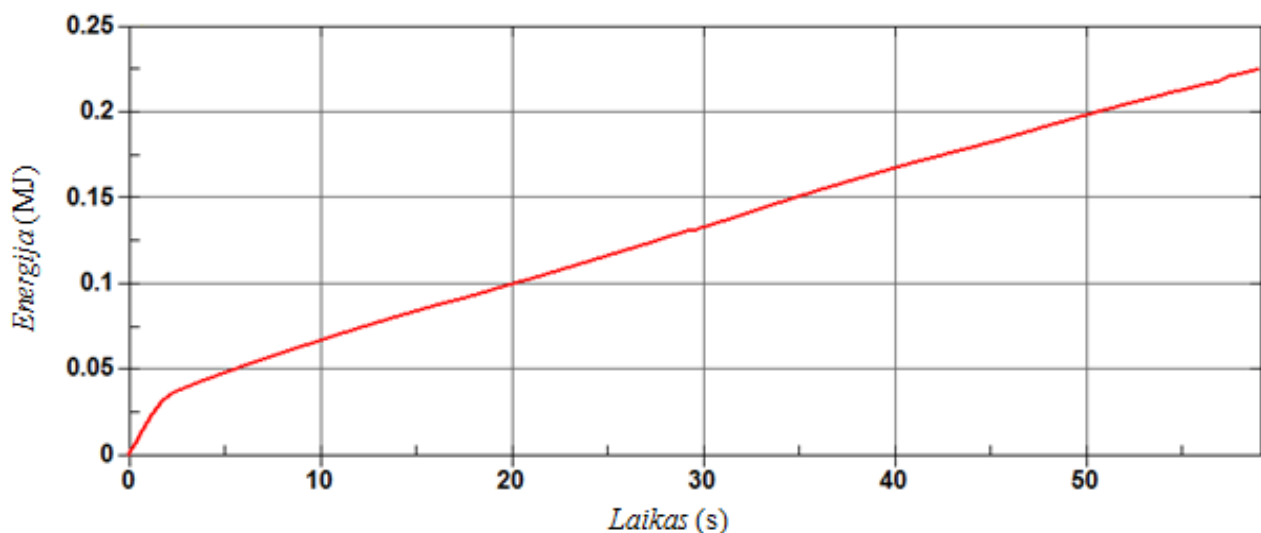
čia:

t – laikas iki kurio skaičiuojamas srovės darbas, s;

$I(t)$ – srovės stiprio momentinė reikšmė laike, A;

$U(t)$ – įtampos momentinė reikšmė laike, N.

Kadangi į bateriją tiekama nuolatinė srovė, kurios įtampa lygi 201,6 V, tai $U(t) = 201,6V = \text{const}$. Sudauginus 2.18 grafike gautas srovės stiprio reikšmes su įtampa $U = 201,6V$ gauname el. srovės galią, kurią integravus laike nustatomas el. srovės atliktas darbas – regeneruotos energijos kiekis. Suintegruotos galios priklausomybės nuo laiko grafinis vaizdas pateikiamas 2.19 paveiksle, t.y. regeneruoto energijos kiekio priklausomybė nuo laiko.



2.19 pav. Regeneruoto į bateriją energijos kiekio priklausomybė nuo laiko (eksperimentas D₂).

Pagal 2.19 grafiką į traukos bateriją regeneruojama 0,226175 MJ energijos kiekis.

2.5.3 Kinetinės energijos ir reikalingo frikciniams stabdžiams energijos kiekio nustatymas

Eksperimento D₂ kinetinės energijos pokytis lygus energijos kiekiui, kuris reikalingas aerodinaminei F_{aer} ir pasipriešinimo riedėjimui F_r jėgoms nugalėti bei į traukos bateriją regeneruotai energijai. Tai eksperimentais, kai jų metu naudojami frikciniai stabdžiai, dalis automobilio kinetinės energijos paverčiama šiluma frikciniuose stabdžiuose.

Kinetinės energijos pokytį - ΔE_k galima skaičiuoti kaip skirtumą tarp galinės E_{k2} ir pradinės E_{k1} kinetinės energijos. Kinetinės energijos pokytis skaičiuojamas pagal 2.11 išraišką:

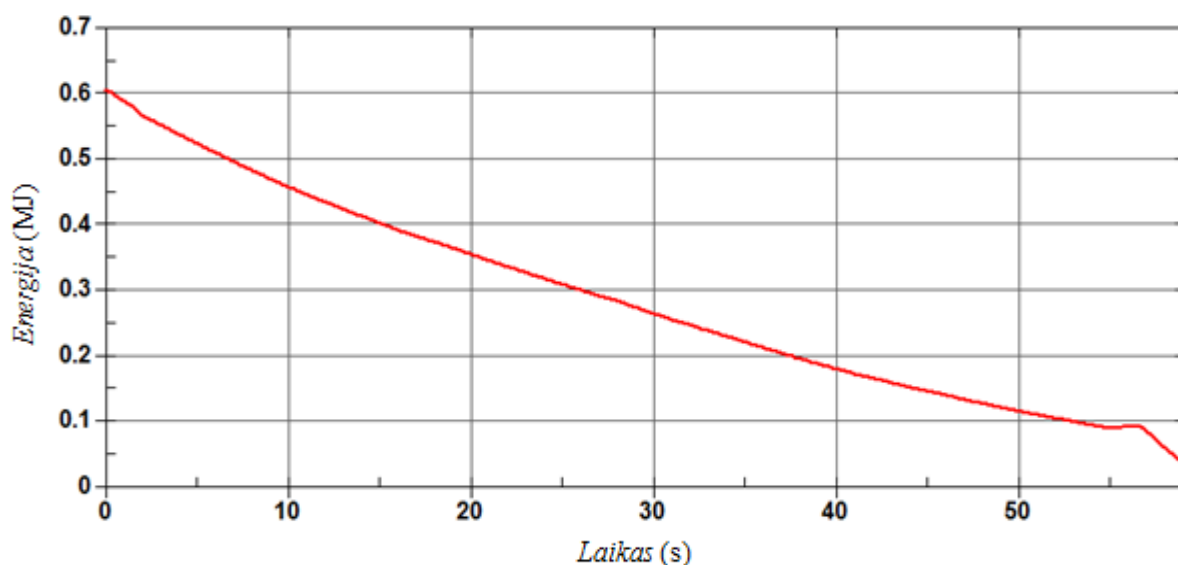
$$\Delta E_k = E_{k2} - E_{k1} = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2} = \frac{m}{2}(v_2^2 - v_1^2) \quad (2.11)$$

čia:

v_1 – automobilio greitis pradiniu laiko momentu, m/s;

v_2 – automobilio greitis galiniu laiko momentu, m/s.

Šios išraiškos skaičiavimams nenaudosime. Kinetinės energijos pokytį nustatome iš kinetinės energijos priklausomybės nuo laiko grafiko, kur ΔE_k lygus pradinės ir galinės kinetinės energijos skirtumui. Nagrinėjamo eksperimento D₂ atveju, hibridinio automobilio turimos kinetinės energijos priklausomybė nuo laiko pateikta 2.20 paveiksle.



2.20 pav. Kinetinės energijos kiekio priklausomybė nuo laiko (eksperimentas D₂).

Šio eksperimento kinetinė energija pradiniu laiko momentu lygi $E_{k1} = 0,608094$ MJ, o galiniame momente – $E_{k2} = 0,0382405$ MJ, tai kinetinės energijos pokytis $\Delta E_k = -0,5698854$ MJ. Pokytis su minuso reikšme parodo, kad turėtas automobilio kinetinės energijos pokytis sunaudojamas automobilio stabdymo proceso metu – pasipriešinimo jėgoms nugalėti ir regeneruoti energijai gauti.

Kai stabdymo proceso metu naudojamas stabdymas frikciniais stabdžiais – dalis kinetinės energijos pokyčio sunaudojama ir jam. Frikciniam stabdymui reikalingas energijos kiekis lygus skirtumui tarp kinetinės energijos pokyčio ir energijos kiekio, reikalingo pasipriešinimo jėgoms nugalėti ir regeneruoti į traukos bateriją, sumos. Suprantama, kad dalis kinetinės energijos pokyčio prarandama energijos nuostoliams transmisijoje, tačiau šiame darbe jų nepaisome. Šie energijos nuostoliai pridedami prie stabdymui reikalingo energijos kiekio.

3. REZULTATŲ ANALIZĖ

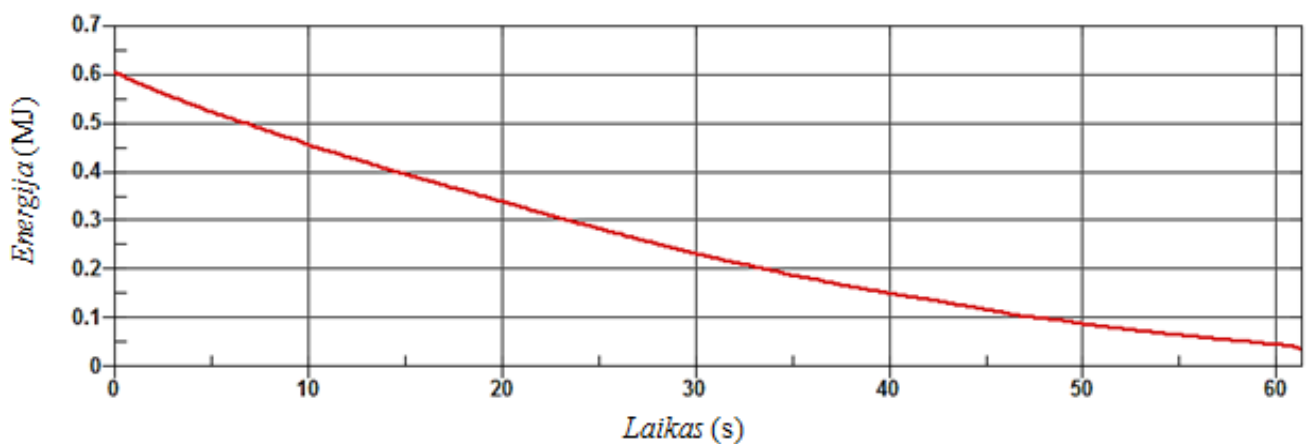
Šioje dalyje dalyje aptariami ir analizuojami gauti rezultatai, daromos atitinkamos išvados.

3.1 Stabdymo metu gauti energijos kiekio rezultatai

Nagrinėjami eksperimentų metu regeneruoti į traukos bateriją, pasipriešinimo jėgoms bei frikciniam stabdymui reikalingų energijos kiekių priklausomybės nuo laiko, esant skirtingo intensyvumo stabdymui. Stabdymo intensyvas apibūdinamas vidutiniu stabdymo pagreičiu – a_{vid} . Eksperimento pavadinimo reikšmės galima rasti 2.5 lentelėje (pvz., eksperimentas D₁ – stabdymas D pavara pavėjui).

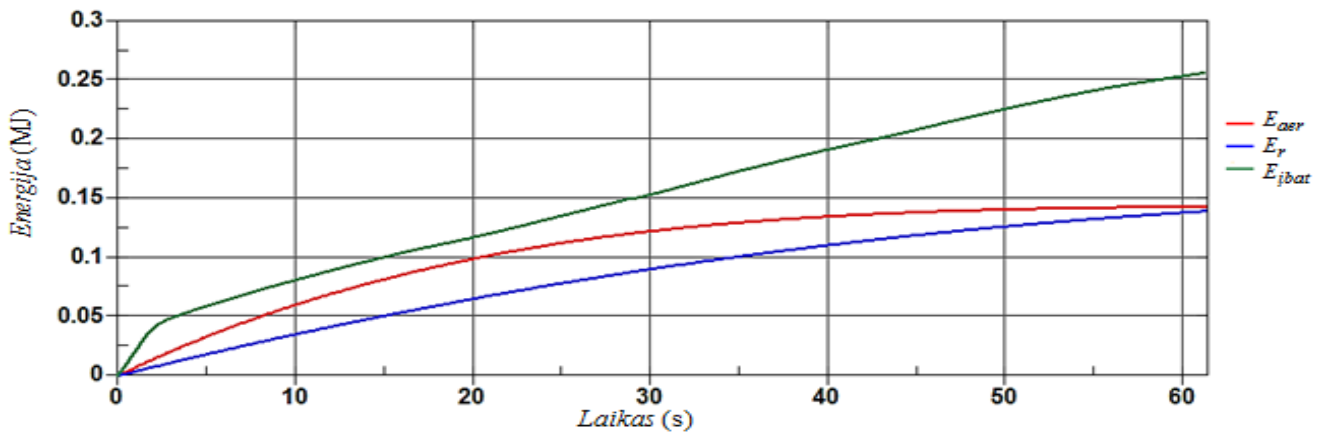
a) Energijos sąnaudos (eksperimentas D₁, $a_{vid} = 0,34091 \text{ m/s}^2$):

Šis stabdymo pagreitis gaunamas hibridinį automobilį stabdant tik įjungta D pavara, važiavimo pavėjui kryptimi. Bandymas atliekamas greičio atkarpoje nuo 100 iki 25 km/h, o trukmė 61,4 s. Tuo metu automobilio kinetinės energijos priklausomybė nuo laiko pateikta 3.1 paveiksle.



3.1 pav. Kinetinės energijos kiekio priklausomybė nuo laiko (eksperimentas D₁)

Šio eksperimento metu kinetinės energijos kiekio pokytis virsta el. energijos kiekiu, kuris regeneruojamas į bateriją ir energijos kiekiu, reikalingu nugalėti aerodinaminę F_{aer} ir ratų pasipriešinimo riedėjimui F_r jėgas. 3.2 paveiksle pateiktos energijos kiekio šių kinetinė energijos dedamųjų priklausomybės nuo laiko.

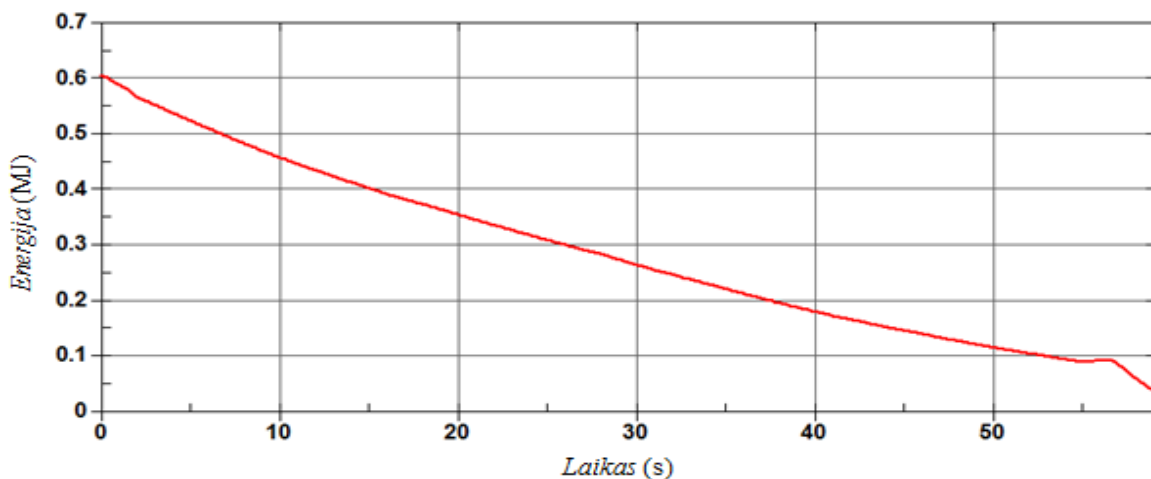


3.2 pav. Reikalingo aerodinaminei E_{aer} , ratų pasipriešinimo riedėjimui E_r jėgoms ir regeneruoto į bateriją energijos kiekio priklausomybės nuo laiko (eksperimentas D₁)

Iš 3.1 ir 3.2 grafikų galima teigti, kad kinetinės energijos pokytis panaudojamas nugalėti pasipriešinimo jėgas F_{aer} ir F_r bei regeneruoti energiją į traukos bateriją. Skirtumas tarp kinetinės energijos pokyčio ir šių dedamųjų gali atsirasti dėl matavimo paklaidų bei dėl neįvertintų energijos nuostolių transmisijoje.

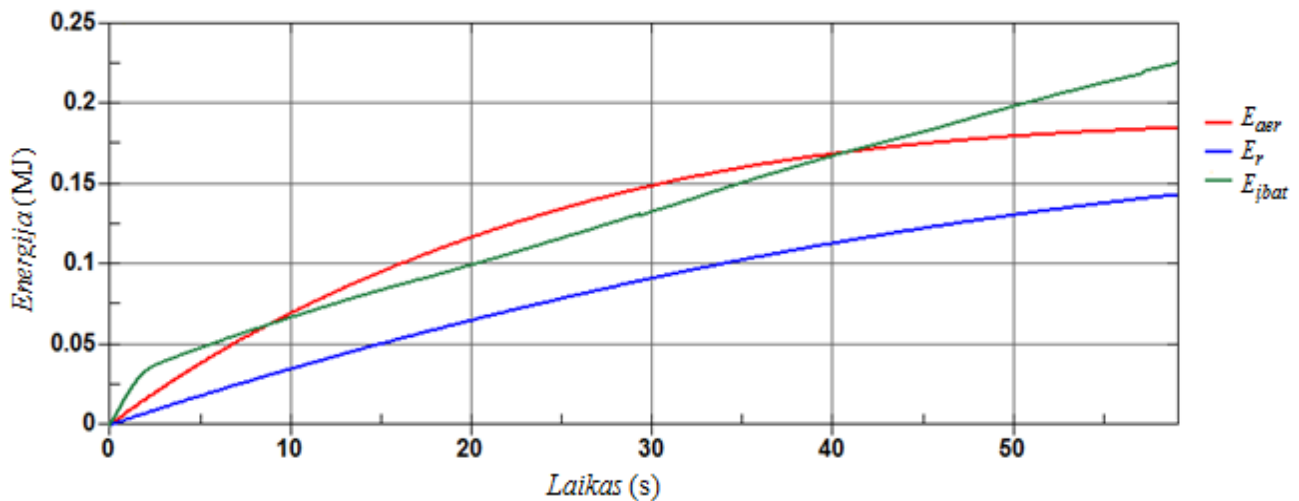
b) Energijos sąnaudos (eksperimentas D₂, $a_{vid} = 0,35469$ m/):

Šis stabdymo pagreitis gaunamas stabdant tik įjungta D pavara prieš vėjo kryptį. Eksperimentas atliekamas greičio atkarpoje nuo 100 iki 25 km/h, o trukmė – 59,1s. Eksperimento metu automobilio kinetinės energijos priklausomybė pateikta 3.3 paveiksle.



3.3 pav. Kinetinės energijos kiekio priklausomybė nuo laiko (eksperimentas D₂)

Eksperimento D₂ kinetinės energijos pokytis virsta el. energijos kiekiu, kuris regeneruojamas į bateriją ir reikalingu nugalėti aerodinaminę F_{aer} , pasipriešinimo riedėjimui F_r jėgas. 3.4 paveiksle pateikiamos šių dedamųjų energijos kiekio priklausomybės nuo laiko.

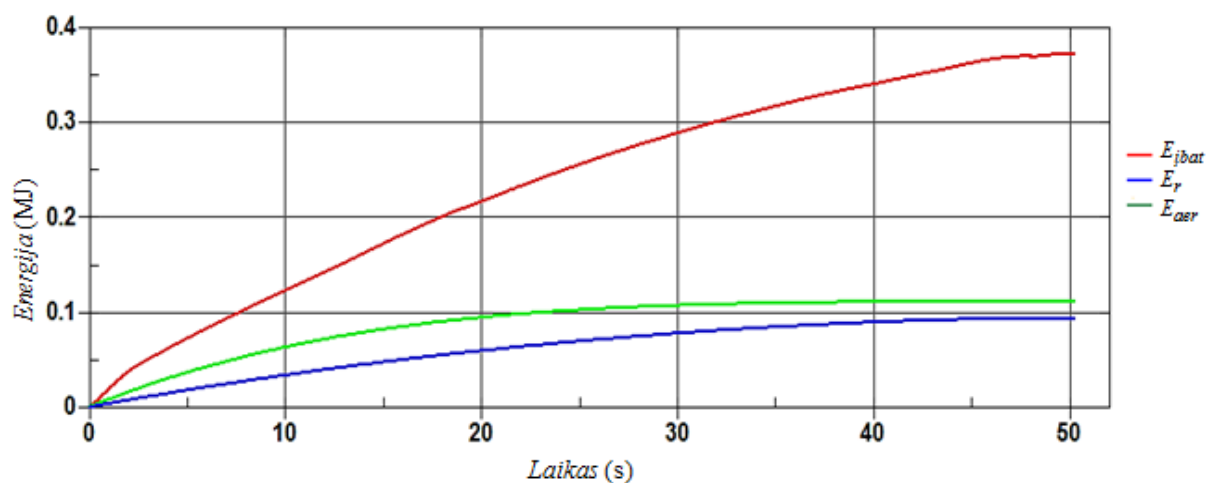


3.4 pav. Reikalingo aerodinaminei E_{aer} , pasipriešinimo riedėjimui E_r jėgoms ir regeneruoto į bateriją energijos kiekio priklausomybės nuo laiko (eksperimentas D₂)

Lyginant hibridinio automobilio stabdymą D pavara pavėjui bei prieš vėją galima teigti, kad prieš vėją reikalingas didesnis energijos kiekis nugalėti pasipriešinimo jėgas, o tuo pačiu lieka mažesnis regeneruojamos energijos kiekis tiriamoje greičio atkarpoje.

c) Energijos sąnaudos (eksperimentas 1S₁, $a_{vid} = 0,55188 \text{ m/s}^2$):

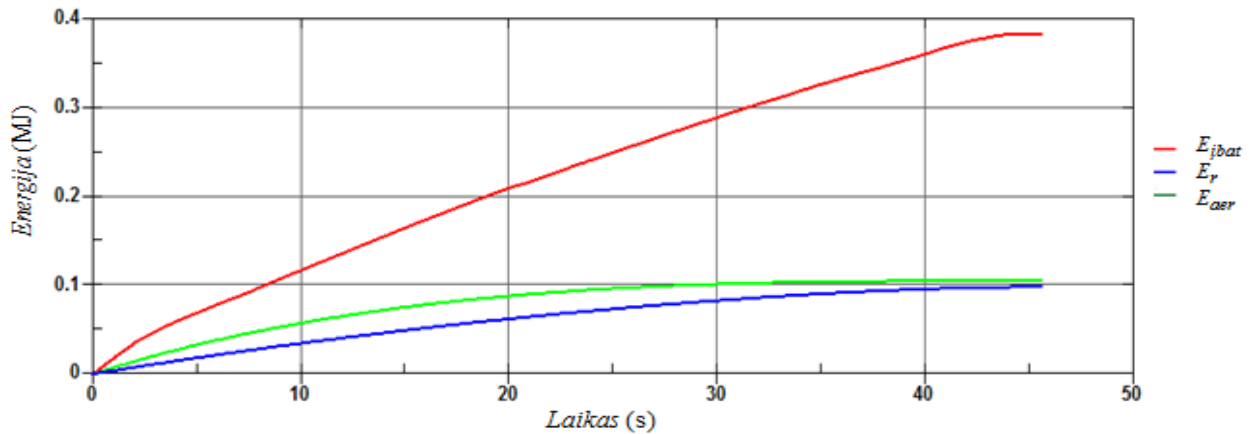
Atliekant neintensyvų hibridinio automobilio stabdymą, gaunamas didesnis regeneruojamos į bateriją energijos kiekis, kuris lygus 0,3729 MJ, tačiau eksperimento 1S₁ metu atsiranda nedideli 0,03316 MJ energijos nuostoliai frikciniam stabdymui. Eksperimento 1S₁ ir toliau nagrinėjamų metu kinetinės energijos pokytis sunaudojamas pasipriešinimo jėgoms nugalėti, įkrauti traukos bateriją ir frikciniam stabdymui. 3.5 paveiksle matomos pasipriešinimo jėgoms reikalingo ir regeneruoto į bateriją energijos kiekio priklausomybės nuo laiko.



3.5 pav. Reikalingo aerodinaminei E_{aer} , pasipriešinimo riedėjimui E_r jėgoms ir regeneruoto į bateriją energijos kiekio priklausomybės nuo laiko (eksperimentas 1S₁)

d) Energijos sąnaudos (eksperimentas 1S₂, $a_{vid} = 0,59902 \text{ m/s}^2$):

Didėjant stabdymo pagreičiui matome tendenciją, kad pasipriešinimo riedėjimui ir aerodinaminei jėgoms išnaudojamas energijos kiekis mažėja, taipogi kryptingai didėja regeneruotos į bateriją energijos kiekis. 3.6 paveiksle pateiktos pasipriešinimo jėgoms išnaudoto ir regeneruoto į bateriją energijos kiekio priklausomybės nuo laiko.

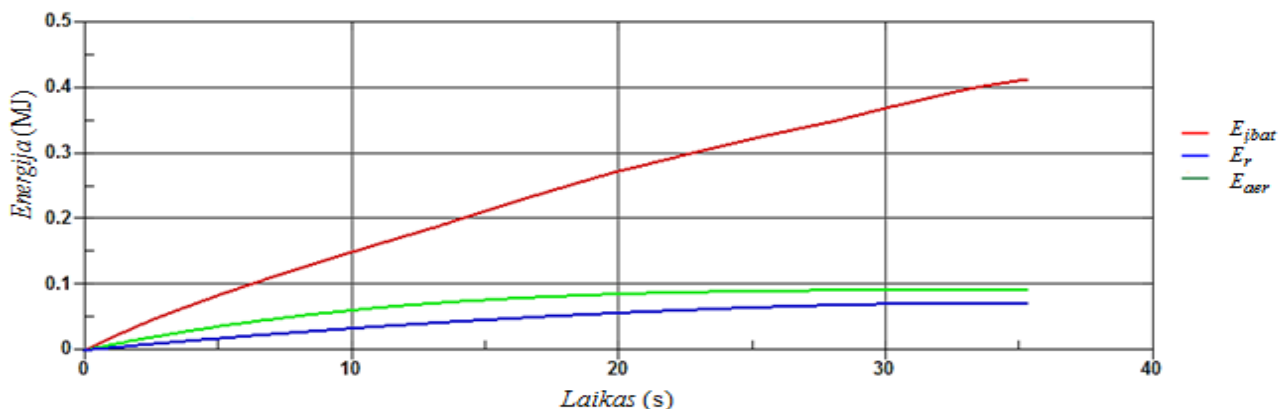


3.6 pav. Reikalingo aerodinaminei E_{aer} , pasipriešinimo riedėjimui E_r jėgoms ir regeneruoto į bateriją energijos kiekio priklausomybės nuo laiko (eksperimentas 1S₂)

Stabdymo metu (eksperimentuose, kurie žymimi su S raide) sunaudojama kinetinė energija svyruoja apie 0,61 MJ. Šios reikšmės svyravimai atsiranda dėl to, kad atskaitomas automobilio greitis beveik visad imamas skirtingas – $100 \pm 0,01 \text{ km/h}$ ribose. Frikciniam stabdymui reikalingas 0,02183 MJ energijos kiekis.

e) Energijos sąnaudos (eksperimentas 2S₁, $a_{vid} = 0,78409 \text{ m/s}^2$):

Eksperimento 2S₁ didžiausias regeneruojamos energijos kiekis lygus 0,41284 MJ. Šio eksperimento pasipriešinimo jėgoms išnaudoto ir regeneruoto į bateriją energijos kiekio priklausomybės nuo laiko pateiktos 3.7 paveiksle.

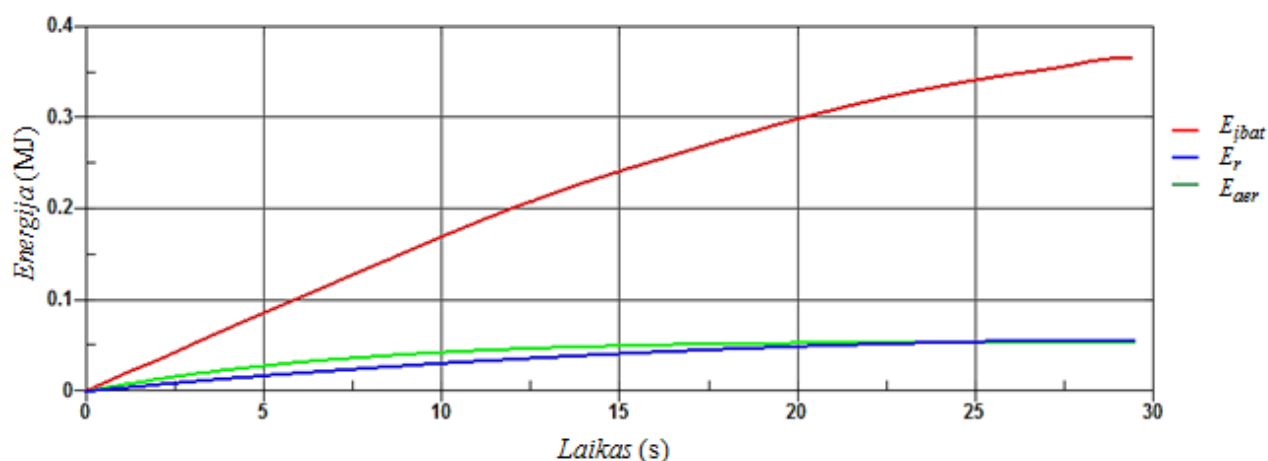


3.7 pav. Reikalingo aerodinaminei E_{aer} , pasipriešinimo riedėjimui E_r jėgoms ir regeneruoto į bateriją energijos kiekio priklausomybės nuo laiko (eksperimentas 2S₁)

Frikciniam stabdymui reikalingas energijos kiekis – 0,03378MJ.

f) Energijos sąnaudos (eksperimentas 2S₂, $a_{vid} = 0,93267 \text{ m/s}^2$):

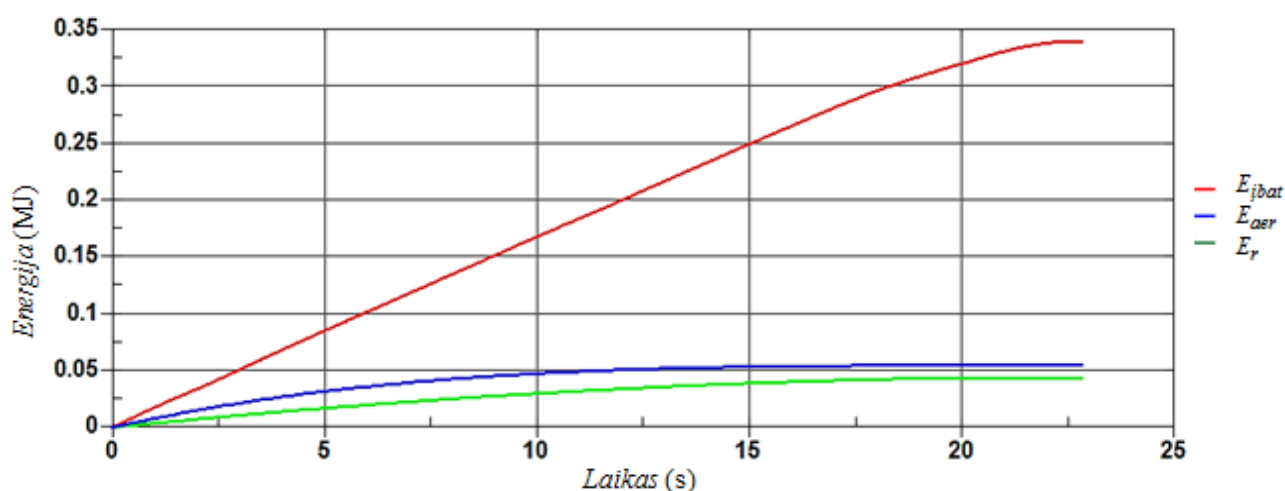
Esant vidutinei stabdymo pagreičiui 0,93267, iš pateikto 3.8 paveikslo matoma, kad regeneruotas energijos kiekis sumažėjo lyginant su eksperimentu 2S₁. Dar negalima teigti, kad eksperimento 2S₁ gauta vidutinė stabdymo pagreičio reikšmė yra optimali, siekiant maksimalaus regeneruoto energijos kiekio, tačiau galima teigti, kad stabdymas ekonomiškąs.



3.8 pav. Reikalingo aerodinaminei E_{aer} , pasipriešinimo riedėjimui E_r jėgoms ir regeneruoto į bateriją energijos kiekio priklausomybės nuo laiko (eksperimentas 2S₂)

Nustatyta, kad eksperimento 2S₂ metu frikciniam stabdymui reikalingas 0,13318 MJ energijos kiekis. Taip pat iš šios diagnozės galima spręsti, kad tendencingai didinant vidutinį stabdymo pagreitį, didės ir frikciniam stabdymui reikalingas energijos kiekis.

g) Energijos sąnaudos (eksperimentas 3S₁, $a_{vid} = 1,21289 \text{ m/s}^2$):



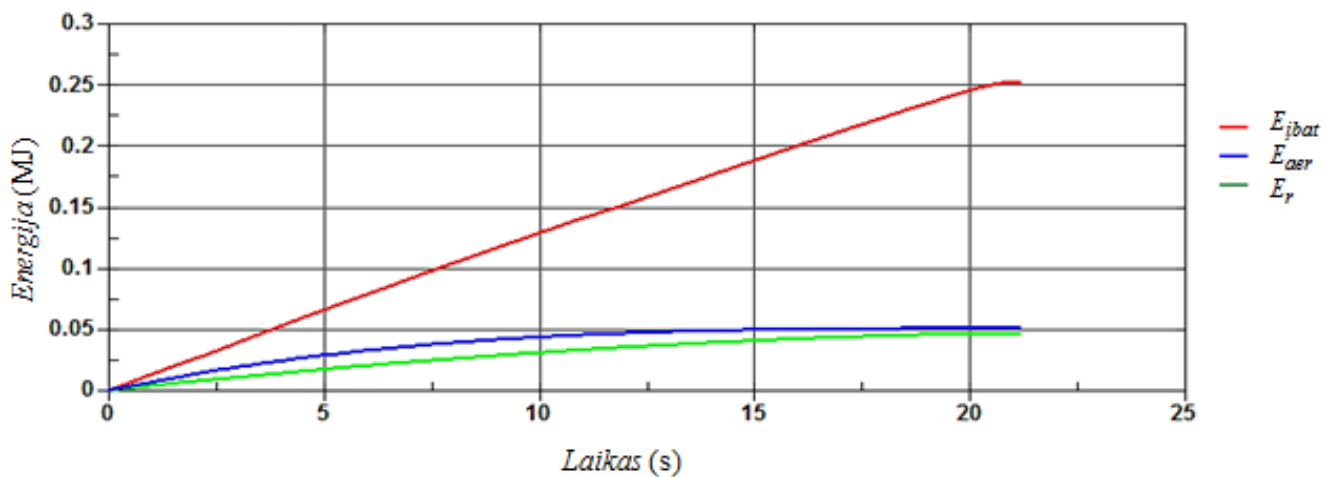
3.9 pav. Reikalingo aerodinaminei E_{aer} , pasipriešinimo riedėjimui E_r jėgoms ir regeneruoto į bateriją energijos kiekio priklausomybės nuo laiko (eksperimentas 3S₁)

3.9 paveiksle pateikiamos išnaudoto pasipriešinimo jėgoms ir regeneruoto į bateriją energijos kiekio priklausomybės nuo laiko. Lyginant su eksperimentu 2S₂ matoma, kad regeneruojamos energijos kiekis mažėja.

Frikiniam stabdymui reikalingas vis didesnis energijos kiekis, kuris lygus 0,17115 MJ, kai eksperimento 2S₂ metu – 0,13318 MJ.

h) Energijos sąnaudos (eksperimentas 3S₂, $a_{vid} = 1,30694 \text{ m/s}^2$):

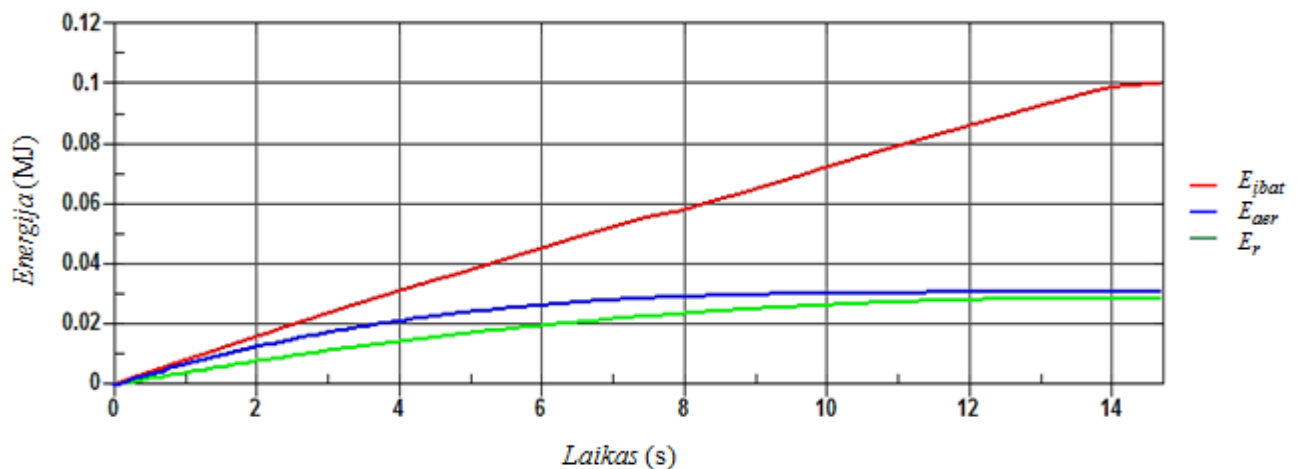
3.10 paveiksle pateikiamos reikalingo pasipriešinimo jėgoms ir regeneruoto į bateriją energijos kiekio priklausomybės nuo laiko, stabdant hibridinį automobilį vidutiniu $1,30694 \text{ m/s}^2$ pagreičiu.



3.10 pav. Reikalingo aerodinaminei E_{aer} , pasipriešinimo riedėjimui E_r jėgoms ir regeneruoto į bateriją energijos kiekio priklausomybės nuo laiko (eksperimentas 3S₂)

Frikiniam stabdymui reikalingas energijos kiekis dar padidėjo ir lygus 0,25933 MJ, kai eksperimento 3S₁ metu buvo 0,17115 MJ.

i) Energijos sąnaudos (eksperimentas 4S₁, $a_{vid} = 1,88323 \text{ m/s}^2$):



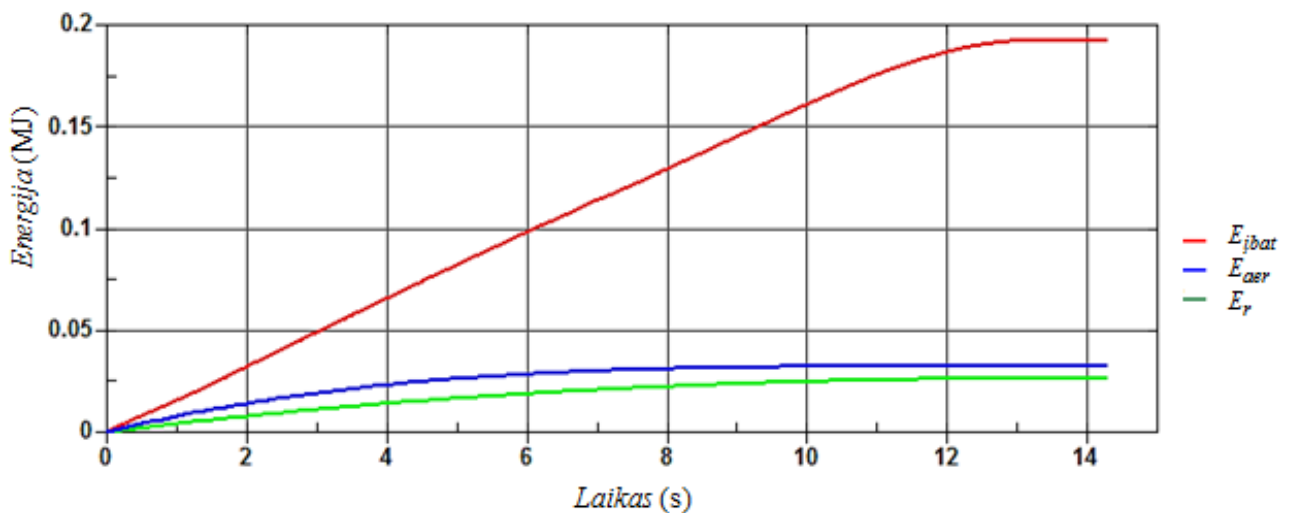
3.11 pav. Reikalingo aerodinaminei E_{aer} , pasipriešinimo riedėjimui E_r jėgoms ir regeneruoto į bateriją energijos kiekio priklausomybės nuo laiko (eksperimentas 4S₁)

3.11 paveiksle pateikiamos išnaudoto pasipriešinimo jėgoms ir regeneruoto į bateriją energijos kiekio priklausomybės nuo laiko, stabdant automobilį vidutiniu $1,88323 \text{ m/s}^2$ pagreičiu.

Frikiniam stabdymui reikalingas energijos kiekis dar labiau išaugo ir atitinkamai lygus $0,45098 \text{ MJ}$, kai eksperimento $3S_2$ metu gaunamas apie 2,5 karto mažesnį energijos kiekį. Galima teigti, kad toliau didėjant vidutinio stabdymo pagreičio reikšmei regeneruojamos energijos kiekis tendencingai mažės.

j) Energijos sąnaudos (eksperimentas $4S_2$, $a_{vid} = 1,9494 \text{ m/s}^2$):

Eksperimento $4S_2$ metu regeneruoto energijos kiekio skaitinė vertė beveik dvigubai didesnė už eksperimento $4S_1$ ir lygi $0,19334 \text{ MJ}$. Energijos kiekio skirtumas galėjo susidaryti dėl skirtingų stabdymo pagreičio skaitinių verčių, kintant automobilio greičiui. Pavyzdžiui, automobilis intensyviai stabdomas didelio greičio ruože (apie $1,7 \text{ m/s}^2$ pagreičiu), o ne taip intensyviai stabdomas mažame greityje. Stabdant intensyviai regeneruojamas maksimalus el. srovės stipris 100 A ir žinome, kad baterija palaiko $201,6 \text{ V}$ įtampą, tai per 1 s maksimalus regeneruojamas energijos kiekis lygus $0,02016 \text{ MJ}$. Eksperimento $4S_2$ metu vidutiniškai per 1 sekundę regeneruojamas energijos lygus $0,01352 \text{ MJ}$. Ankstesniais eksperimentais tokių rezultatų nebuvo pasiekta. Neužmirštant šio eksperimento, 3.12 paveiksle pateikiamos reikalingo pasipriešinimo jėgoms ir regeneruoto į bateriją energijos kiekio priklausomybės nuo laiko, stabdant hibridinį automobilį vidutiniu $1,9494 \text{ m/s}^2$ pagreičiu.



3.12 pav. Reikalingo aerodinaminei E_{aer} , pasipriešinimo riedėjimui E_r jėgoms ir regeneruoto į bateriją energijos kiekio priklausomybės nuo laiko (eksperimentas $4S_2$)

Eksperimento metu frikiniam stabdymui reikalingas $0,35326 \text{ MJ}$ energijos kiekis. Eksperimento $4S_2$ trukmė – $14,3 \text{ s}$

Eksperimentų rezultatų apibendrinimui sudaroma 3.1 lentelė, kurioje pateikiamos eksperimentų metu gautos kinetinės energijos pokyčio – ΔE_k , reikalingo aerodinaminei – E_{aer} , ratų pasipriešinimo

riedėjimui – E_r jėgoms, frikciniam stabdymui – E_{stab} ir regeneruoto į traukos bateriją – E_{ibat} energijos kiekio vertės. Lentėje pateiktas – a_{st} reiškia vidutinį stabdymo pagreitį, eksperimento metu.

3.1 lentelė

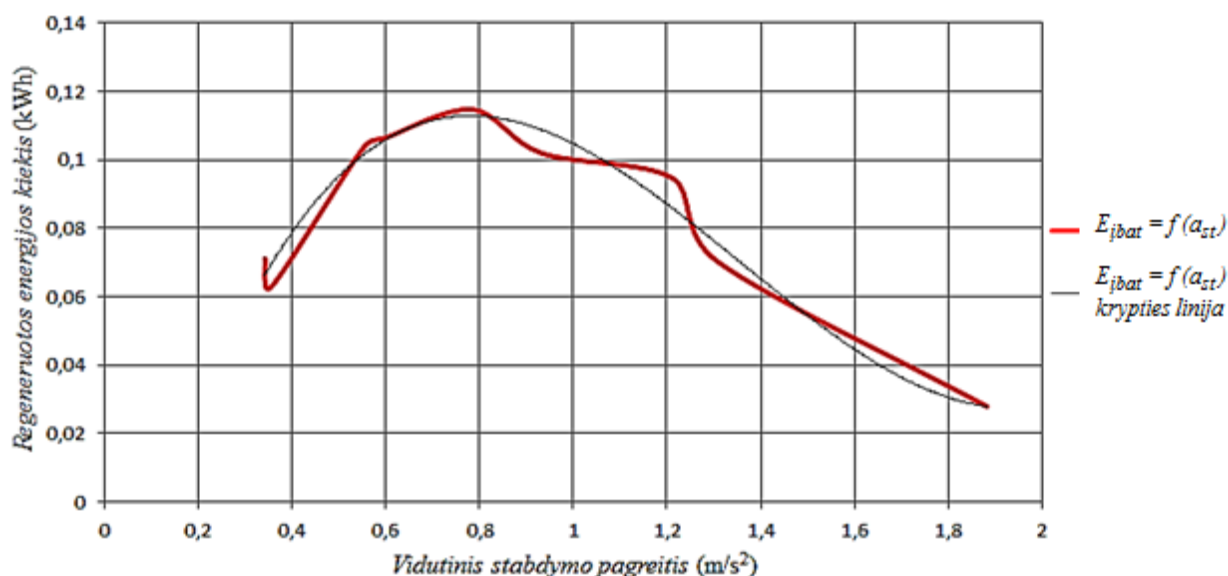
Ekspirimentų rezultatų apžvalga

Eil. Nr.	Eksp. pav.	a_{st} (m/s ²)	ΔE_k (MJ)	E_{ibat} (MJ)	E_{aer} (MJ)	E_r (MJ)	E_{stab} (MJ)
1.	D ₁	0,34091	0,57178	0,25645	0,14334	0,13949	-
2.	D ₂	0,35469	0,56989	0,22618	0,18521	0,14549	-
3.	1S ₁	0,55188	0,61104	0,37290	0,11154	0,09345	0,03316
4.	1S ₂	0,59902	0,60791	0,38312	0,10491	0,09805	0,02183
5.	2S ₁	0,78409	0,61016	0,41284	0,09171	0,07183	0,03316
6.	2S ₂	0,93267	0,60987	0,36669	0,05391	0,05609	0,13318
7.	3S ₁	1,21289	0,60954	0,34021	0,05447	0,04373	0,17145
8.	3S ₂	1,30694	0,60985	0,25317	0,05075	0,04660	0,25933
9.	4S ₁	1,88323	0,61295	0,10041	0,03094	0,02911	0,45098
10.	4S ₂	1,94940	0,61145	0,19334	0,03242	0,02656	0,36063

Pagal 3.1 lentelės duomenis galima teigti, kad regeneruojamos energijos kiekio atžvilgiu optimalus vidutinis stabdymo pagreitis lygus 0,78409 m/s².

3.2 Optimalaus pagreičio ir $E_{ibat} / \Delta E_k$ santykio nustatymas

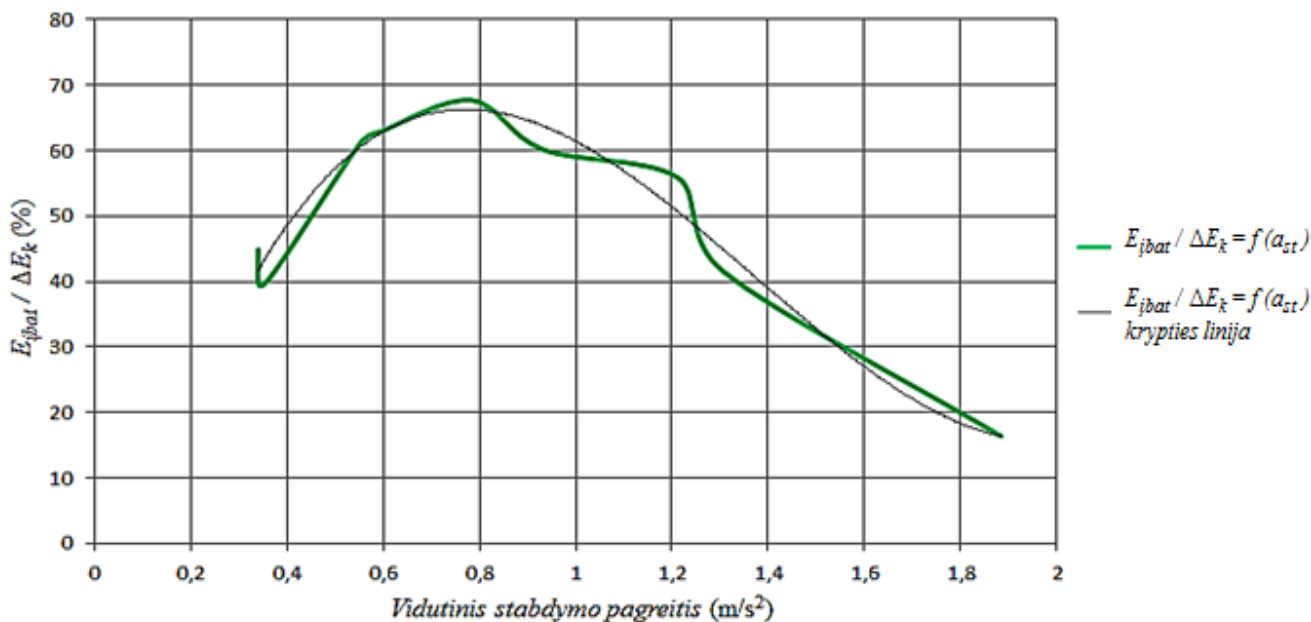
Siekdami surasti optimalų stabdymo pagreitį, kurio metu regeneruojamos energijos kiekis būtų didžiausias, braižoma energijos kiekio E_{ibat} priklausomybė nuo vidutinio stabdymo pagreičio a_{st} $E_{ibat} = f(a_{st})$. Ši priklausomybė pateikiama 3.13 paveiksle.



3.13 pav. Regeneruoto į traukos bateriją energijos kiekio E_{ibat} priklausomybė nuo vidutinio stabdymo pagreičio a_{st}

Priklausomybės $E_{ibat} = f(a_{st})$ grafiniam vaizdavimui, energijos kiekio ir vidutinio stabdymo pagreičio reikšmės naudojamos iš 3.1 lentelės. Grafike pateikiama ir krypties linija, kuri naudojama siekiant eliminuoti rezultatų išsikraipymo problemą. Pasirenkama 3 laipsnio polinomo tipo krypties linija, nes R^2 reikšmė arčiausia vienetui, t.y lygi 0,9632. Kaip žinoma R^2 reikšmė apibrėžia krypties linijos tikslumą, o tikliausia esant vienetui. 3 laipsnio polinominė krypties linija tiksliausia priklausomybei analizuoti $E_{ibat}=f(a_{st})$. Krypties linija aprašoma lygtimi: $y = 0,1116x^3 - 0,4539x^2 + 0,5044x - 0,0574$.

Taip pat iškyla aktualus klausimas – kokia procentinė energijos kiekio dalis regeneruojama į traukos bateriją iš kinetinės energijos pokyčio. Šį klausimą geriausiai apibūdina $E_{ibat} / \Delta E_k = f(a_{st})$ priklausomybės grafikas, kuris pateikiamas 3.14 paveiksle. Grafike pateikiama šios priklausomybės krypties linija, kuri naudojama siekiant eliminuoti rezultatų išsikraipymo problemą. Krypties linija aprašoma lygtimi: $y = 59,455x^3 - 244,18x^2 + 270,69x - 24,559$, o $R^2 = 0,9628$.



3.14 pav. Regeneruoto energijos kiekio su išnaudota kinetine energija santykio $E_{ibat} / \Delta E_k$ priklausomybė nuo vidutinio stabdymo pagreičio a_{st}

Pagal gautas priklausomybes galima teigti, kad hibridinis automobilis regeneruoja didžiausią energijos kiekį į traukos bateriją (apie 0,11kWh) stabdant vidutiniu 0,8 m/s² lėtėjimo pagreičiu. Stabdant šiuo pagreičiu į traukos bateriją grąžinama apie 66 % stabdymo procesui reikalingo energijos kiekio. Apibendrinant tyrimo rezultatus darome išvadą, kad siekiant hibridinio automobilio didžiausio efektyvumo naudingiausia stabdyti 0,6 – 1,0 m/s² pagreičiu.

3.3 Gautų rezultatų patikimumas

Eksperimentų metu matuojami fizikiniai dydžiai (regeneruojamos srovės stipris I ir automobilio greitis v). Matavimas yra procesas, kurio metu matavimo priemone nustatomos fizikinio dydžio vertės. Matavimai gali būti tiesioginiai arba netiesioginiai. Tiesioginiu vadinamas toks matavimas, kurio dominančio dydžio vertė nustatoma tiesiogiai iš prietaiso rodmenų. Netiesioginiu vadinamas toks matavimas, kuriuo fizikinio dydžio vertė randama kaip kito dydžio funkcija. Pavyzdžiui, kūno tankis nustatomas žinant jo masę ir tūrį [5].

Kiekvieną kartą matuojant atsiranda netikslumų. Matavimo prietaisai nerodo tikrosios matuojamo dydžio vertės. Nuokrypiai nuo tikrosios vertės vadinami sistemingomis paklaidomis. Sistemingosios paklaidos mažinamos tikrinant prietaisus, tobulinant eksperimento atlikimo metodiką bei lyginant to paties dydžio matavimus skirtingais metodais. Sistemingoji paklaida, kurios kilmė yra žinoma, o jos ženklas ir didumas gana tiksliai nustatomi, vadinama pataisa [5].

Yra dar atsitiktinės paklaidos, kurių priežastys yra atsitiktiniai ir eksperimento metu nekontroliuojami trikdžiai, kurių įtakos matavimo rezultatui tiesiogiai įvertinti negalima dėl to, kad trikdžių yra daug, jų prigimtis įvairi ir poveikis skirtingas [5].

Eksperimentų metu matuojami netiesioginiai dydžiai. Skaičiuojant regeneruotos energijos kiekį, kuris lygus galios (srovės stiprio I ir įtampos U sandaugai) integralui reikia įvertinti srovės replių ir oscilografo paklaidas. Srovės replių paklaida (2.4 lentelė) lygi prie 2 % skalės vertės oscilografo lange pridedant papildomai 2 A. Oscilografas turi paklaidą, kuri lygi 1 procentui nuo maksimalios skalės vertės (± 200 A). Žinant tai, kad maksimali srovės stiprio vertė lygi $100 \pm 6A$, tai regeneruoto energijos kiekio paklaida lygi 6 %.

„DL1 Data Logger“ matavimo paklaida 4 procentai. Reikalingo aerodinaminei jėgai energijos kiekio paklaida lygi 8 %, nes aerodinaminė jėga priklauso nuo greičio kvadrato, o kaip žinoma laipsninės funkcijos paklaidos sumuojasi.

IŠVADOS IR REKOMENDACIJOS

1. Atlikti natūriniai hibridinio automobilio Toyota Prius (XW30) stabdymo eksperimentai, kurių metu matuojama į bateriją regeneruojama galia ir automobilio dinaminiai parametrai. Eksperimentai atliekami įvairaus intensyvumo stabdymo režimais (prieš ir pagal vėjo kryptį).

2. Eksperimentų N_1 ir N_2 metu nustatoma vėjo įtaka ir pradinė ratų pasipriešinimo riedėjimui koeficiento f_0 skaitinė reikšmė. Ištyrus šių eksperimentų rezultatus nustatytas vėjo greitis lygus 0,599 m/s, tačiau dėl pasitaikančio gūsingesnio vėjo skaičiavimams ši reikšmė didinama iki 1 m/s. Šių eksperimentų metu nustatytas pradinis ratų pasipriešinimo riedėjimui koeficientas lygus 0,008195.

3. Apskaičiuoti natūrinių eksperimentų regeneruoti energijos kiekiai, gautos jų vertės 0,1 – 0,41 MJ (0,028 – 0,114 kWh) intervale, stabdant hibridinį automobilį nuo 100 km/h iki visiško sustojimo. Stabdant D pavara gauti energijos kiekiai: prieš vėją – 0,22618 MJ, pavėjui – 0,25645 MJ (100 – 25 km/h).

4. Nustatyta, kad eksperimento $2S_1$ (vidutinio intensyvumo stabdymas prieš vėją) metu į traukos bateriją regeneruojamas didžiausias energijos kiekis, kuris lygus 0,114 kWh. Šiuo eksperimento metu vidutinis stabdymo pagreitis lygus $0,78409 \text{ m/s}^2$. $2S_1$ eksperimento metu regeneruojama 67,66 % automobilio turėtos kinetinės energijos.

Rekomendacijos: stabdymo metu, siekiant regeneruoti daugiausiai energijos, Toyota Prius automobiliu rekomenduojama lėtėti $0,6 - 1 \text{ m/s}^2$ pagreičiu.

INFORMACINIŲ ŠALTINIŲ SĄRAŠAS

1. Adomavičius V. Elektromobiliai ir jų plėtros perspektyvos // LTMA mokslo darbai / Klaipėdos universitetas. 2011, nr. 7. – p. 105-120
2. German. M.J., Hybrid gasoline – electric vehicle development. ISBN of 978-0-7680-1500-3. 2006. P. 39–81
3. Energy Saving Trust. Švaresnis kuras ir transporto priemonės. Londonas, 2010. 8 –10 p.
4. Juodvalkis D., Lendraitis V., Makaras R. Inžinerinės ir edukacinės technologijos: Hibridinių automobilių analizė. Kauno technikos kolegija. ISSN 2029-9303. 2012. p. 27–32
5. Martinėnas B., Eksperimento duomenų statistinė analizė. Vilnius: Technika, 2004. p. 5–49
6. Pečeliūnas R., Sokolovskij E. Automobilių dinamika:mokomoji knyga. Vilnius: Technika, 2012. p. 15–132
7. Pistoia G., Electric and hybrid vehicles. Italy: Elsevier. ISBN: 978-0-444-53565-8. 2012
8. Brahmachari R. Hibridiniai automobiliai: [žiūrėta 2015-05-20] Prieiga per internetą: <http://www.leb.eei.uni-erlangen.de/winterakademie/2010/report/content/course04/pdf/0308.pdf>
9. Ert L. Hibridinio automobilio akumulatorius: [žiūrėta 2015-05-20] Prieiga per internetą: http://www.toyotaclub.lt/readarticle.php?article_id=52
10. Lung-Wen Tsai. Lygiagretaus veikimo hibridinio automobilio transmisija: [žiūrėta 2015-05-20] Prieiga per internetą: <http://www.google.com/patents/US6592484>
11. Marchang. J.G., Hybrid vehicle basics. [žiūrėta 2015-05-20] Prieiga per internetą: <http://onlinelibrary.wiley.com/book/10.1002/97811184072400>
12. Prof. Rahman A. M. Hibridinių automobilių apžvalga. [žiūrėta 2015-05-20] Prieiga per internetą: <http://www.ieee-pes.org/presentations/gm2014/PESGM2014P-002604.pdf>
13. Pukalskas P. Hibridinė technologija. [žiūrėta 2015-05-20] Prieiga per internetą: http://docs.google.com/viewerng/viewer?url=http://stud.vgtu.lt/users/files/dest/2262/5+hibridine+technologija_new.pdf
14. Elektromobiliai ir jų perspektyvos. [žiūrėta 2015-05-20] Prieiga per internetą: http://www.sumin.lt/lt/veikla/veiklos_sritys/kita_veikla/pletra_ir_inovacijos/ev?print=true
15. Atkinsono ciklas: [žiūrėta 2015-05-20] Prieiga per internetą: <http://www.taikakeliuose.lt/lit.php/99471>
16. Energijos dalijimo įtaisai: [žiūrėta 2015-05-20] Prieiga per internetą: <http://auto.howstuffworks.com/hybrid-car7.htm>
17. Hibridinių, elektrinių automobilių patikra: [žiūrėta 2015-05-20] Prieiga per internetą: <http://automobiliusignalizacijos.lt/hev.html>

18. Hibridinių automobilių tipai: [žiūrėta 2015-05-20] Prieiga per internetą:
<http://www.hybridcars.com/the-three-main-types-of-hybrids-explained/>
19. Hibridinio automobilio baterijos: [žiūrėta 2015-05-20] Prieiga per internetą:
<http://www.hybridcars.com/hybrid-car-battery/>
20. Hibridinio automobilio baterijų krovimas: [žiūrėta 2015-05-20] Prieiga per internetą:
<http://www.import-car.com/volts-voltage-how-will-hybrids-change/>
21. Hibridinis automobilis (statistiniai duomenys): [žiūrėta 2015-05-20] Prieiga per internetą:
http://en.wikipedia.org/wiki/Hybrid_electric_vehicle
22. Hibridinis automobilis Lexus-RX-400h: [žiūrėta 2015-05-20] Prieiga per internetą:
<http://www.conceptcarz.com/vehicle/z14610/Lexus-RX-400h.aspx>
23. Oscilografo „Picoscope 3423“ charakteristikos: [žiūrėta 2015-05-20] Prieiga per internetą:
<https://www.picotech.com/download/manuals/ps3000a044-2.pdf>
24. Regeneracinis stabdymas: [žiūrėta 2015-05-20] Prieiga per internetą:
<http://sjam4uphysics.pbworks.com/w/page/38936885/Regenerative%20Braking>
25. Regeneracinis stabdymas: [žiūrėta 2015-05-20] Prieiga per internetą:
<http://auto.howstuffworks.com/auto-parts/brakes/brake-types/regenerative-braking.htm>
26. Toyota Prius baterijos charakteristikos: [žiūrėta 2015-05-20] Prieiga per internetą:
<http://www.toyotapriusbattery.com/>
27. Toyota Prius charakteristikos: [žiūrėta 2015-05-20] Prieiga per internetą:
<http://www.edmunds.com/toyota/prius/2013/features-specs/>
28. Toyota Prius charakteristikos: [žiūrėta 2015-05-20] Prieiga per internetą:
<http://www.priups.com/misc/prius-specs.htm>