VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
TRANSPORTO INŽINERIJOS FAKULTETAS
MOBILIŲJŲ MAŠINŲ IR GELEŽINKELIŲ TRANSPORTO KATEDRA

Jokūbas Valiukas

LOKOMOTYVO ENERGIJOS SĄNAUDŲ MAŽINIMO NAUDOJANT AUTOMATINĘ DYZELINIO VARIKLIO STABDYMO – PALEIDIMO SISTEMĄ TYRIMAS

STUDY ON REDUCTION OF LOCOMOTIVE ENERGY CONSUMPTION BY USING AUTOMATIC DIESEL ENGINE START – STOP SYSTEM

Baigiamasis magistro darbas

Transporto inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX058
Transporto priemonių inžinerijos specializacija
Transporto inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2025

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

TRANSPORTO INŽINERIJOS FAKULTETAS
MOBILIŲJŲ MAŠINŲ IR GELEŽINKELIŲ TRANSPORTO KATEDRA

Jokūbas Valiukas

LOKOMOTYVO ENERGIJOS SĄNAUDŲ MAŽINIMO NAUDOJANT AUTOMATINĘ DYZELINIO VARIKLIO STABDYMO – PALEIDIMO SISTEMĄ TYRIMAS

STUDY ON REDUCTION OF LOCOMOTIVE ENERGY CONSUMPTION BY USING AUTOMATIC DIESEL ENGINE START – STOP SYSTEM

Baigiamasis magistro darbas

Transporto inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX058

Transporto priemonių inžinerijos specializacija

Transporto inžinerijos studijų kryptis

Vadovas _____doc. dr. Stasys Steišūnas_____
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

Lietuvių kalbos konsultantė _____lekt. Angelika Petrėtienė _____
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

Vilnius, 2025

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
TRANSPORTO INŽINERIJOS FAKULTETAS
MOBILIŲJŲ MAŠINŲ IR GELEŽINKELIŲ TRANSPORTO KATEDRA

Studijų kryptis: Transporto inžinerija
Studijų programa: Transporto inžinerija , valstybinis kodas 6211EX058
Specializacija: Transporto priemonių inžinerija

TVIRTINU
Katedros vedėjas
Algimantas Danilevičius
2025-05-01

MAGISTRO BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS

Nr. TPIfm-23-9181

Vilnius

Studentas (-ė): Jokūbas Valiukas

Baigiamojo darbo tema: Lokomotyvo energijos sąnaudų mažinimo naudojant automatinę dyzelinio variklio stabdymo-paleidimo sistemą tyrimas

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas pagal numatytą studijų kalendorinį grafiką.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

Baigiamojo darbo užduotis:
Atlikti AB „LTG Cargo" geležinkelio traukos riedmenų parko apžvalgą bei išlaidų degalams analizę. Išnagrinėti energijos sąnaudas mažinančių sistemų pritaikymą geležinkelių transporte. Atlikti lokomotyvo ER20CF darbo rėžimų ir energijos sąnaudų tyrimą. Sukurti automatinės lokomotyvo dyzelinio variklio stabdymo – paleidimo sistemos valdymo algoritmą pagal AB ,,LTG Cargo" lokomotyvų ER20CF eksploatacijos sąlygas. Įvertinti teorinį šios sistemos efektyvumą remiantis eksperimentiniais duomenimis. Atlikti ekonominius skaičiavimus.

Vadovas docentas Stasys Steišūnas

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Transporto inžinerijos fakultetas
Mobiliųjų mašinų ir geležinkelių transporto katedra

ISBN | ISSN
Egz. sk. .....
Data .....-.....-.....

Antrosios pakopos studijų **Transporto inžinerijos** programos magistro baigiamasis darbas

Pavadinimas	**Lokomotyvo energijos sąnaudų mažinimo naudojant automatinę dyzelinio variklio stabdymo-paleidimo sistemą tyrimas**
Autorius	**Jokūbas Valiukas**
Vadovas	**Stasys Steišūnas**

Kalba: lietuvių

Anotacija

Baigiamojo magistro darbo tikslas – sumažinti lokomotyvų energijos sąnaudas pritaikant automatinę dyzelinio variklio stabdymo – paleidimo sistemą. Darbe atlikta AB „LTG Cargo" traukos riedmenų parko ir išlaidų apžvalga, išnagrinėtos energetinių išteklių sąnaudos bei energijos sąnaudų mažinimo technologijos geležinkelių transporte. Atliktas eksperimentinis tyrimas naudojant nuotolinės diagnostikos įrangą penkiuose ER20CF lokomotyvuose. Išanalizuotos lokomotyvų eksploatacinės sąlygos. Pagal eksploatacijos duomenis ir techninę dokumentaciją sukurtas automatinės dyzelinio variklio stabdymo – paleidimo sistemos valdymo algoritmas. Remiantis tyrimo duomenimis įvertintas jo efektyvumas, apskaičiuota ekonominė bei ekologinė nauda.

Darbą sudaro: įvadas, AB „LTG Cargo" traukos riedmenų parko bei išlaidų apžvalga, energijos sąnaudų mažinimo galimybių geležinkelių transporto sektoriuje analizė, lokomotyvo ER20CF darbo režimų ir enerijos sąnaudų tyrimas, automatinės dyzelinio variklio stabdymo – paleidimo sistemos modeliavimas, sumodeliuotos sistemos įvertinimas, išvados, literatūros sąrašas.

Darbo apimtis – 71 p. teksto be priedų, 40 iliustracijos, 6 lentelės, 32 bibliografiniai šaltiniai.

Prasminiai žodžiai: lokomotyvas, geležinkelių transportas, energijos sąnaudų mažinimas, ekologija, automatinė dyzelinio variklio stabdymo – paleidimo sistema

Vilnius Gediminas Technical University
Faculty of Transport Engineering
Department of Mobile Machinery and Railway Transport

ISBN | ISSN
Copies No. .....
Date .....-.....-.....

Master Degree Studies **Transport Engineering** study programme Master Graduation Thesis

Title	**Study on reduction of locomotive energy consumption by using automatic diesel engine start-stop system**
Author	**Jokūbas Valiukas**
Academic supervisor	**Stasys Steišūnas**

Thesis language: Lithuanian

Annotation

The aim of the final master thesis is to reduce the energy consumption of locomotives by adapting an automatic diesel engine start – stop system. The thesis provides an overview of the fleet and costs of traction rolling stock of ,,LTG Cargo" AB, analyses the energy resources costs and the technologies for reducing energy costs in railway transport. An experimental study using remote diagnostic equipment on five ER20CF locomotives was carried out. The operating conditions of the locomotives were analysed. On the basis of operational data and technical documentation, an algorithm for controlling the automatic diesel engine start – stop system was developed. Based on the experimental data, its efficiency was evaluated, economic and ecological benefits were calculated.

The thesis consists of: introduction, overview of the fleet and costs of AB "LTG Cargo", analysis of the possibilities of reducing energy consumption in railway transport, study of the ER20CF locomotive operating modes and energy consumption, modelling of the automatic diesel engine braking-starting system, evaluation of the modelled system, conclusions, list of references.

The volume of the thesis is 71 p. of text without appendices, 40 illustrations, 6 tables, 32 bibliographic sources.

Keywords: locomotive, rail transport, energy reduction, ecology, automatic diesel engine stop-start system

Kvalifikuotas elektroninis parašas
JOKŪBAS VALIUKAS
2025-05-26 20:15:56 EEST
Paskirtis: Parašas

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Jokūbas Valiukas, 20194204

(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)

Transporto inžinerijos fakultetas

(Fakultetas)

Transporto inžinerija, TPIfm-23

(Studijų programa, akademinė grupė)

BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO)
SĄŽININGUMO DEKLARACIJA

2025 m. gegužės 23 d.

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema „Lokomotyvo energijos sąnaudų mažinimo naudojant automatinę dyzelinio variklio stabdymo-paleidimo sistemą tyrimas“ yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Parenkant ir įvertinant medžiagą bei rengiant baigiamąjį darbą, mane konsultavo mokslininkai ir specialistai: Angelika Petrėtienė. Mano darbo vadovas docentas daktaras Stasys Steišūnas.

Kitų asmenų indėlio į parengtą baigiamąjį darbą nėra. Jokių įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs (-usi).

Jokūbas Valiukas

(Parašas) (Vardas ir pavardė)

TURINYS

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS....9

LENTELIŲ SĄRAŠAS....11

SANTRUMPOS....12

ĮVADAS....13

1. AB „LTG Cargo“ TRAUKOS RIEDMENŲ PARKO APŽVALGA BEI IŠLAIDŲ ANALIZĖ....15

2. ENERGIJOS SĄNAUDŲ MAŽINIMO GALIMYBIŲ GELEŽINKELIŲ TRANSPORTO SEKTORIUJE ANALIZĖ....19

2.1 Vidaus degimo variklių tarša ir jos mažinimo svarba....19

2.2 Traukos riedmenų energijos sąnaudų mažinimo galimybių analizė....20

2.2.1 Traukos riedmenų ir eismo valdymo metodai....20

2.2.3 Vidaus degimo variklių cilindrų deaktyvavimo sistema....22

2.2.4 Automatinių vidaus degimo variklių stabdymo – paleidimo sistemų pritaikymas transporto priemonėse....24

2.3 Antrojo skyriaus išvados....34

3. LOKOMOTYVO ER20CF DARBO REŽIMŲ IR ENERGIJŲ SĄNAUDŲ TYRIMAS....36

3.1 Eksperimentiniam tyrimui naudojama įranga....36

3.2 Lokomotyvų eksploatacijos apžvalga ir energijos sąnaudų tyrimas....39

3.3 ER20CF darbo traukos režimu ir tuščiąja eiga analizė....43

3.4 Trečiojo skyriaus išvados....48

4. LOKOMOTYVO ER20CF AUTOMATINĖS DYZELINIO VARIKLIO STABDYMO-PALEIDIMO SISTEMOS MODELIAVIMAS....49

4.1 Traukos ir stabdžių parametrai....51

4.2 Diagnostikos klaidos kodų parametrai....54

4.3 Variklio paleidimo energijos sąnaudų įvertinimas....55

4.4 Starterio paleidimo kondensatoriaus ir akumuliatoriaus baterijų įkrovos lygis....56

4.5 Aušinimo skysčio temperatūros apribojimas....58

4.6 Ketvirtojo skyriaus išvados....59

5. SUMODELIUOTOS AUTOMATINĖS DYZELINIO VARIKLIO STABDYMO – PALEIDIMO SISTEMOS EFEKTYVUMO VERTINIMAS 60
5.1 Sumodeliuotos sistemos efektyvumo tikrinimas eksploatacinėmis sąlygomis 60
5.2 Sumodeliuotos sistemos ekonominis ir ekologinis vertinimas 63
5.3 Penktojo skyriaus išvados 67
IŠVADOS 68
LITERATŪROS SĄRAŠAS 69

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1 pav. Lokomotyvų klasifikacija 15

2 pav. LTG Cargo lokomotyvai tipą ir serijas 16

3 pav. „LTG Cargo“ 2023 m. išlaidos 17

4 pav. Principinė DAS algoritmo schema 21

5 pav. Cilindrų bendroji apkrova 23

6 pav. Degalų sąnaudos varikliui dirbant ištisai ir stabdant 25

7 pav. SPS valdymo modelis 25

8 pav. Atlikto bandymo matavimų ir skaičiavimų rezultatai 27

9 pav. Traktoriaus VDV apkrovos darbo metu pavyzdys 28

10 pav. VDV darbo tuščiąja eiga pasiskirstymai ir trukmės 29

11 pav. Traktoriaus papildomos įrangos apkrovimas varikliui 30

12 pav. Šilumvežio tuščiosios eigos pavyzdys 32

13 pav. Manevrinių ir magistralinių lokomotyvų darbo režimų pasiskirstymas 33

14 pav. Degalų ir elektros energijos sąnaudos VDV paleidimo metu 34

15 pav. Lokomotyvas „Siemens ER20CF“ 37

16 pav. Nuotolinės diagnostikos įrenginys „Railster“ 38

17 pav. „Railster“ montavimo vieta“ 39

18 pav. Lokomotyvų nuvažiuotas atstumas 40

19 pav. Lokomotyvų išdirbtos valandos 40

20 pav. Lokomotyvų degalų sąnaudos 41

21 pav. ER20CF galios priklausomybė nuo sūkių 41

22 pav. Momentinės degalų sąnaudos 42

23 pav. Santykinės degalų sąnaudos 42

24 pav. Lokomotyvų darbo laikas pirmuoju traukos režimu 43

25 pav. Lokomotyvų darbo laikas antruoju traukos režimu 44

26 pav. Lokomotyvų darbo laikas trečiuoju traukos režimu 44

27 pav. Lokomotyvų darbo laikas ketvirtuoju traukos režimu 45

28 pav. Lokomotyvų darbo laikas tuščiąja eiga 45
29 pav. Lokomotyvų darbo laikas tuščiąja eiga procentais 46
30 pav. Lokomotyvų darbo tuščiąja eiga pasikartojimai laiko intervaluose 47
31 pav. Lokomotyvų darbo tuščiąja eiga pasiskirstymas laiko intervaluose 47
32 pav. Lokomotyvo ER20CF SPS darbo algoritmas 49
33 pav. Stabdžių slėgio kitimas vamzdyne 53
34 pav. Stabdžių slėgio kritimas neatliekant stabdymo 53
35 pav. Degalų sąnaudos VDV paleidimo metu 56
36 pav. AKB įtampos kritimas 57
37 pav. Aušinimo skysčio temperatūros kritimas 58
38 pav. SPS veikimo laikas per eksperimentinio tyrimo laikotarpį 60
39 pav. VDV stabdymo pasikartojimai 61
40 pav. Naudingas SPS veikimo laikas 62

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1.1 lentelė. „LTG Cargo“ eksploatuojamų lokomotyvų kiekis pagal serijas 17

2.1 lentelė. Operatoriaus veiksmai VDV tuščiosios eigos metu (Molari et al., 2019) 31

3.1 lentelė. Lokomotyvo ER20CF techninės charakteristikos.....37

4.1 lentelė. Modeliuojamos SPS algoritmo įvesties parametrai 59

5.1 lentelė. SPS ekonominė nauda.....65

5.2 lentelė. Sumažinta tarša naudojant SPS.....67

SANTRUMPOS

AAR – Amerikos geležinkelių asociacija (angl. *Association of American Railroads*),

AKB – akumuliatoriaus baterija

DAS – mašinisto asistavimo sistema (angl. *driver advisory system*)

ECU – variklio valdymo blokas (angl. *engine control unit*)

EMU – variklio stebėsenos blokas (angl. *engine monitoring unit*)

EPA – Aplinkos apsaugos agentūra (angl. *Environmental Protection Agency*).

ETV – elektros traukos variklis

GPS – globali pozicionavimo sistema

KU – kibirkštinio uždegimo

LNA – silpnų bangų stiprintuvas (angl. *low noise amplifier*)

SPS – automatinė variklio stabdymo – paleidimo sistema

SU – slėginio uždegimo

TP – transporto priemonė

VDV – vidaus degimo variklis

ĮVADAS

Transporto sektorius išmeta ketvirtadalį visų Europos Sąjungos šiltnamio efektą sukeliančių dujų. Norėdama sumažinti aplinkos taršą, Europos Komisija pristatė energetikos, transporto ir mokesčių politikos pasiūlymų rinkinį, vadinamą Žaliuoju kursu. Šio plano tikslas yra iki 2030 metų sumažinti šiltnamio efektą sukeliančių dujų išmetimą bent 55 % lyginant su 1990 metais, o iki 2050 metų – net 90 % (Europos Komisija, 2019). 2021-ieji buvo paskelbti geležinkelių metais, siekiant skatinti keliavimą ir krovinių vežimą traukiniais. Šiuo metu 75 % viso sausumos transporto Europos Sąjungoje vyksta keliais (ES Taryba, 2020). Nors geležinkelių transportas yra viena efektyviausių transporto rūšių, energijos sąnaudas galima ir reikia sumažinti. Energijos sąnaudos yra tiesiogiai susijusios su išmetamųjų dujų kiekiu ir nors geležinkelių transporto išmetama tarša sudaro tik 0,4 % (Europos Komisija, 2020) visos transporto sektoriaus taršos, ją vis tiek būtina mažinti. Mažinant net ir sąlyginai mažą išmetamų teršalų kiekį geležinkelių transporto sektoriuje, galima dar labiau prisidėti prie bendrų Europos Sąjungos tikslų stiprinant geležinkelių, kaip tvaraus transporto būdo, įvaizdį ir padidinant jų konkurencingumą prieš kitas transporto rūšis. Tai gali būti pasiekta naudojant atsinaujinančius energijos šaltinius, diegiant pažangias technologijas ir efektyviau valdant logistiką. Taip pat svarbu mažinti energijos sąnaudas dėl įmonės finansinių išlaidų. 2023 metais įmonė „LTG Cargo“ išleido 260,5 mln. Eur („LTG Cargo“ 2023 metinės ataskaitos, 2024) vykdant savo veiklą. Iš visų įmonės sąnaudų 14 % sudaro išlaidos energetiniams ištekliams (degalams, elektros energijai), todėl sumažinti įmonės energijos sąnaudas bent maža dalimi būtų palanku ir finansiniu atžvilgiu. Pagrindiniai energijos vartotojai geležinkelių transporto sektoriuje yra traukos riedmenys, konkrečiau – lokomotyvai, kurių suvartojamos degalų sąnaudos sudaro daugiau nei pusę visų įmonės energijos sąnaudų, todėl yra svarbu didinti vidaus degimo variklių efektyvumą arba optimizuoti jų darbą.

Šiame darbe atlikta įmonės AB „LTG Cargo“ geležinkelio traukos riedmenų parko apžvalga bei išlaidų degalams analizė. Išnagrinėti įvairūs metodai ir sistemos, kurios padeda mažinti energijos sąnaudas geležinkelių ir kituose transporto sektoriuose. Naudojant modernią nuotolinės diagnostikos sistemą atliktas penkių ER20CF lokomotyvų darbo režimų ir energijos sąnaudų tyrimas. Pagal ER20CF gamintojo norminius techninius dokumentus ir eksploatacines sąlygas sukurtas automatinės dyzelinio variklio stabdymo – paleidimo sistemos valdymo algoritmas. Pritaikius šį algoritmą tyrimo duomenims, įvertintas galimas sistemos efektyvumas, ekonominė ir ekologinė nauda.

Darbo objektas – lokomotyvo energijos sąnaudų mažinimas naudojant automatinę dyzelinio variklio stabdymo – paleidimo sistemą.

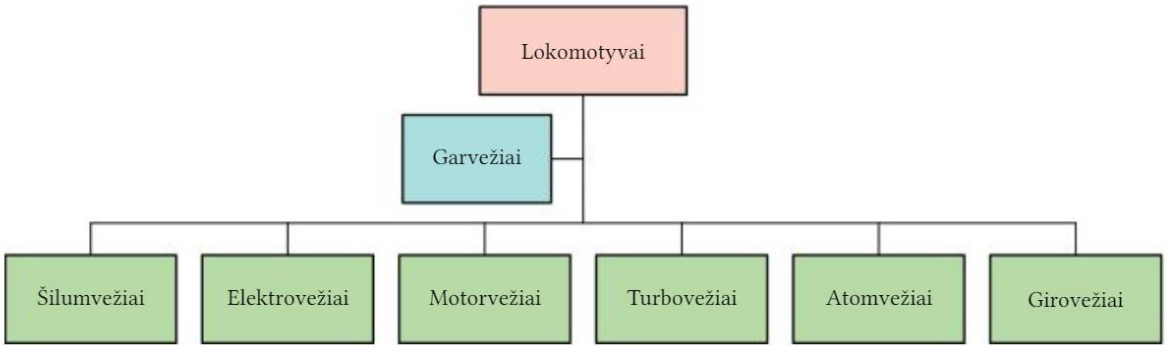
Darbo tikslas – sukurti automatinę dyzelinio variklio stabdymo – paleidimo sistemą ER20CF lokomotyvui ir patikrinti šios sistemos efektyvumą.

Darbo uždaviniai:

1. Atlikti AB „LTG Cargo“ geležinkelio traukos riedmenų parko apžvalgą bei išlaidų degalams analizę.
2. Išnagrinėti energijos sąnaudas mažinančių sistemų pritaikymą geležinkelių transporto sektoriuje.
3. Atlikti lokomotyvo ER20CF darbo režimų ir energijos sąnaudų tyrimą.
4. Sukurti automatinės lokomotyvo dyzelinio variklio stabdymo – paleidimo sistemos valdymo algoritmą pagal AB „LTG Cargo“ lokomotyvų ER20CF eksploatacijos sąlygas.
5. Įvertinti teorinį šios sistemos efektyvumą remiantis eksperimentiniais duomenimis.
6. Atlikti ekonominius skaičiavimus.

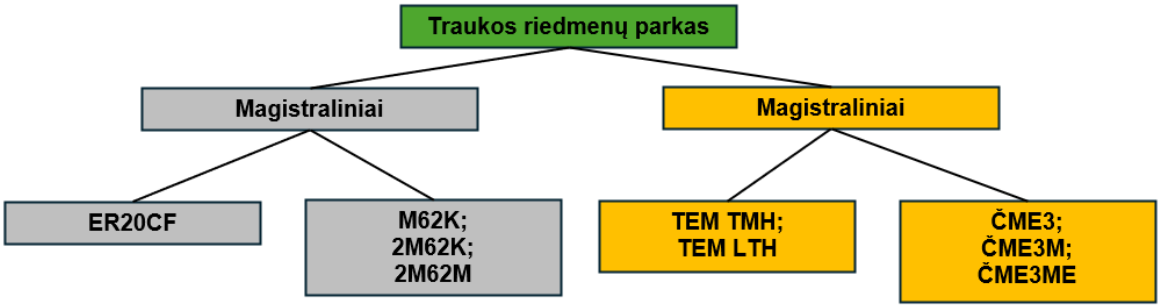
1. AB „LTG Cargo“ TRAUKOS RIEDMENŲ PARKO APŽVALGA BEI IŠLAIDŲ ANALIZĖ

Geležinkeliuose naudojami riedmenys yra skirti kroviniams ir keleiviams vežti arba atlikti specialias funkcijas (valyti kelius ir atlikti techninę priežiūrą keliams). Riedmenys gali būti skirstomi į – traukos riedmenis ir vagonus. Traukos riedmenys naudojami būtinai traukai, kuri yra reikalinga vagonams traukti, tuo tarpu vagonai yra skirti keleiviams arba kroviniams vežti. Traukos riedmenys yra skirstomi į dvi pagrindines grupes – lokomotyvus ir savaeigius sąstatus. Lokomotyvas – tai galinga autonominė transporto traukos mašina vagonams arba jų sąstatams geležinkelio bėgiais vežti. Savaeigiai sąstatai – atskiras riedmuo arba riedmenų junginys, į kurio sudėtį įeina traukos riedmenys ir vagonai. Šios grupės skiriasi pagal struktūrinius požymius (Vaičiūnas et al., 2015). Lokomotyvai yra skirstomi į pagrindines grupes pagal konstrukcijos ypatumus. Dažniausiai tai yra daroma pagal jų energijos šaltinį. Lokomotyvų klasifikacija yra pavaizduota 1 pav.



1 pav. Lokomotyvų klasifikacija (Vaičiūnas et al., 2015)

Pasaulyje labiausiai paplitusios dvi lokomotyvų klasės – šilumvežiai ir elektrovežiai. Lietuvoje kroviniams pervežti, kol kas, yra naudojami tik šilumvežiai, bet sparčiai elektrifikuojant geležinkelių infrastruktūrą, elektrovežiai – netolima ateitis. Šilumvežiai taip pat gali būti išskiriami pagal savo paskirtį – manevriniai ir magistraliniai. Manevriniai lokomotyvai yra konstrukciškai pritaikyti atlikti krovinių pervežimus trumpais atstumais – manevruoti stotyse, formuoti vagonų sąstatus. Magistraliniai arba prekiniai lokomotyvai yra labiau pritaikyti tempti sunkius sąstatus ilgesnį laiką didesniais greičiais. Pagrindiniai šių lokomotyvų tipų skirtumai yra svoris ir galia. Nors tiek manevriniai, tiek magistraliniai lokomotyvai gali atlikti visavertę trauką ir manevruojant, ir važiuojant ilgais atstumais, jų naudojimas tampa nebe toks efektyvus. „LTG Cargo“ eksploatuojamų šilumvežių pasiskirstymas pagal paskirtį ir serijas yra pavaizduotas 2 pav.



2 pav. LTG Cargo lokomotyvai tipą ir serijas

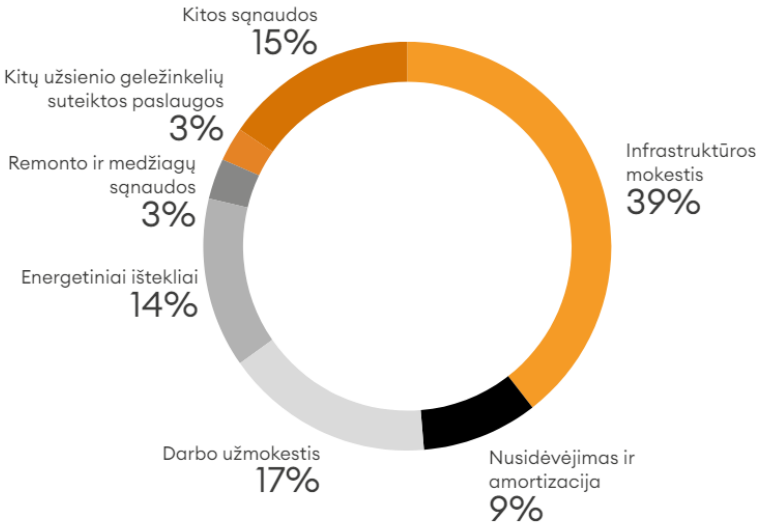
Visų 2 pav. pateiktų lokomotyvų žymėjimas turi savo reikšmę. ER20CF yra pats galingiausias ir pažangiausias „LTG Cargo“ turimas šilumvežis. Šio, Vokietijos gamintojo „Siemens“, lokomotyvo žymėjimas reiškia – Eurorunner. Skaičius 20 nurodo vidaus degimo variklio (toliau – VDV) galią – 2000 kW. C raidė nurodo, kad šilumvežio vėžimėlis turi 3 aširačius, o F, kad lokomotyvas yra prekinis (angl. *freight*). ČME3 lokomotyvai yra vieni seniausių lokomotyvų visame traukos riedmenų parke, tačiau jų yra nedaug. Šio modelio žymėjime esanti raidė Č nurodo jo pagaminimo šalį (Čekoslovakija). M reiškia manevrinis, o E, jog lokomotyvas yra su elektrine traukos pavara. Skaičius 3 parodo, jog tai yra ČME serijos lokomotyvų trečiosios kartos modelis. Šie lokomotyvai nėra efektyvūs. Mažas jų galingumas ir prastas patvarumas padidina jų eksploatacijos kaštus, todėl „LTG Cargo“ juos modernizavo ir padarė efektyvesnius bei patvaresnius. Modernizavimas yra pažymimas M raide, o raidė E nurodo, jog šilumvežio VDV yra aprūpintas įranga, kuri užtikrina ekologiją. Patys populiariausi ir dažniausiai sutinkami manevriniai lokomotyvai yra TEM TMH. Jų šifravimas : T – šilumvežis (rus. тепловоз), E – turintis elektrinę pavarą ir M – manevrinis. TMH nurodo, jog jų gamybos patentai priklauso „Transmashholding“ įmonei, nors šie lokomotyvai buvo gaminami Lietuvoje. TEM LTH yra TEM TMH mažesnė ir modernesnė versija. Šis lokomotyvas buvo pagamintas tik vienas ir pagal „UAB Vilniaus Lokomotyvų Remonto Depo“ (VLRD) projektą. M62K serijos lokomotyvams pirmoji raidė M nurodo, jog lokomotyvas yra magistralinis, o K, jog jo VDV buvo pakeistas į modernesnį, pagamintą Kolomnos gamykloje. Skaičius 2 nurodo, jog šie lokomotyvai yra dvigubos traukos. Tai reiškia, kad du M62 serijos lokomotyvai buvo pagaminti kaip vienas. Patys seniausi ir mažiausiai ekologiški lokomotyvai yra ČME3 ir M62K. Šiuose lokomotyvuose yra sumontuoti seni sovietiniai varikliai. Jų momentinės degalų sąnaudos gali atrodyti šiek tiek mažesnės lyginant su kitais lokomotyvais, tačiau taip yra dėl to, jog jie yra silpnesni ir gali traukti mažesnį svorį. Dėl šių priežasčių šie lokomotyvai ir buvo modernizuoti arba išimti iš eksploatacijos. „LTG Cargo“ eksploatuojamų lokomotyvų kiekis pagal serijas yra pavaizduotas 1.1 lentelėje.

1.1 lentelė. „LTG Cargo“ eksploatuojamų lokomotyvų kiekis pagal serijas

Tipas	Serija	Kiekis
Magistraliniai	ER20CF	44
	M62K	4
	2M62K	6
	2M62M	19
Manevriniai	TEM TMH	61
	TEM LTH	1
	ČME3	8
	ČME3M	5
	ČME3ME	17
Iš viso	-	165

Šiuo metu įmonė „LTG Cargo“ turi 165 eksploatuojamus šilumvežius. Keliuose galima sutikti apie 150, nes likusi dalis yra remontuojama arba laukia remonto. Beveik visi lokomotyvai yra pritaikyti važiuoti ant 1520 mm pločio vėžės, tačiau įmonė turi tris ČME3ME ir du M62K lokomotyvus pritaikytus 1435 mm vėžei. Didžioji dalis lokomotyvų yra manevriniai, nes poreikis pervežti stambius krovinius ilgais atstumais yra sumažėjęs. Plačiausiai naudojami manevriniai lokomotyvai – TEM TMH. Magistralinių lokomotyvų tarpe plačiausiai naudojami ER20CF serijos lokomotyvai, kurie buvo specialiai projektuojami ir gaminami Lietuvos rinkai.

Šilumvežių degalų sąnaudos traukos režimu yra vertinamos išraiška – g/kWh. Ši išraiška parodo koks degalų kiekis reikalingas vieno kilovato galiai pasiekti per vieną valandą. Siekiant įvertinti transporto priemonės (toliau – TP) efektyvumą yra naudojamas kiek kitoks matavimo vienetas – kg/tkm. Šis vienetas yra lyginamąsios degalų sąnaudos, kurios nurodo kiek kilogramų degalų sunaudojama pervežant tam tikrą krovinio masę per tam tikrą atstumą. Įmonės „LTG Cargo“ išlaidos per 2023 metus siekė 260,5 mln. Eur. Šios išlaidos yra pavaizduotos 3 pav.



3 pav. „LTG Cargo“ 2023 m. išlaidos („LTG Cargo“ 2023 metinės ataskaitos, 2024)

„LTG Cargo“ per 2023 metus pervežė 27,2 mln. t krovinių. Bendra krovinių vežimo apyvarta – 6,3 mlrd. tonkilometrių. Tam padaryti įmonė sunaudojo nemažai energijos išteklių. Energetiniai ištekliai, kurie susidaro iš įmonės išlaidų degalams bei elektros energijai sudarė 14 % visų metinių išlaidų (36,47 mln. Eur). Išlaidos degalams sudaro 94 % visų energetikos išteklių sąnaudų (34,3 mln. Eur). Sąnaudos degalams sumažėjo 8,7 % lyginant su 2022 metais. Sąnaudų sumažėjimui įtaką padarė traukinių darbo apimčių sumažėjimas 14 %, tačiau sąnaudų sumažėjimą pristabdė vidutiniškai 2 % pakilusi dyzelino kaina. Atsižvelgiant į infliaciją, politinę padėtį pasaulyje ir senkančias iškastinio kuro atsargas, galima nuspėti, jog degalų kainos tik kils ar bent jau nemažės. Vidutinė dyzelino kaina Lietuvoje 2023 metais buvo 1,42 Eur/l. Tai įvertinus galima pateikti faktą, jog „LTG Cargo“ per 2023 metus sunaudojo virš 24 mln. t dyzelino. Eksploatacinės išlaidos yra prie neįvardijamų ir jos sudaro 15 % visų metinių išlaidų (39,1 mln. Eur).

Daugiausiai degalų iš viso traukos riedmenų parko suvartojo lokomotyvas ER20CF. Per 2023 metus šios serijos lokomotyvai sunaudojo 57 % viso „LTG Cargo“ suvartotų degalų (13,78 mln. t), todėl sumažinus šio lokomotyvo sąnaudas bent maža dalimi, įmonė patirtų didelę finansinę naudą, o aplinka mažesnį užterštumą.

2. ENERGIJOS SĄNAUDŲ MAŽINIMO GALIMYBIŲ GELEŽINKELIŲ TRANSPORTO SEKTORIUJE ANALIZĖ

2.1 Vidaus degimo variklių tarša ir jos mažinimo svarba

Augant pasaulio gyventojų skaičiui ir nuolat didėjant pramonės apimtims, šiuolaikinė ekonomika patiria vis didesnį energijos poreikį. Neatsinaujinančiųjų kuro šaltinių išsekimas, didėjančios energijos kainos ir tarša, kuri išsiskiria vartojant energiją, verčia mokslininkus sparčiau domėtis technologijomis, kurios galėtų sumažinti arba pakeisti neatsinaujinančių kuro šaltinių panaudojimą (Gupta ir Verma, 2014). VDV yra plačiai naudojami įvairiose TP, nuo motociklų ir lengvųjų automobilių iki sunkvežimių, žemės ūkio technikos, laivų ar lokomotyvų. VDV paskirtis yra paversti cheminę energiją į mechaninę energiją, pirminei TP energijai sukurti. Nors šiuolaikiniai VDV yra efektyvūs ir aprūpinti pažangiausiomis taršą mažinančiomis technologijomis, jie vis tiek yra pagrindiniai degalų vartotojai ir oro taršos šaltiniai. Pagrindinės VDV išmetamų teršalų rūšys:

- anglies dioksidas (CO_2) – pagrindinės šiltnamio efektą sukeliančios dujos;
- anglies monoksidas (CO) – nuodingos dujos, sukeliančios sveikatos problemas žmonėms ir gyvūnams;
- azoto oksidai (NO_x) – junginiai, skatinantys rūgštinio lietaus susidarymą ir sukeliantys kvėpavimo takų ligas;
- kietosios dalelės (PM) – smulkios dalelės, sukeliančios kvėpavimo takų ir širdies ligas;
- angliavandeniliai (HC) – skatina kancerogeninių dalelių atsiradimą.

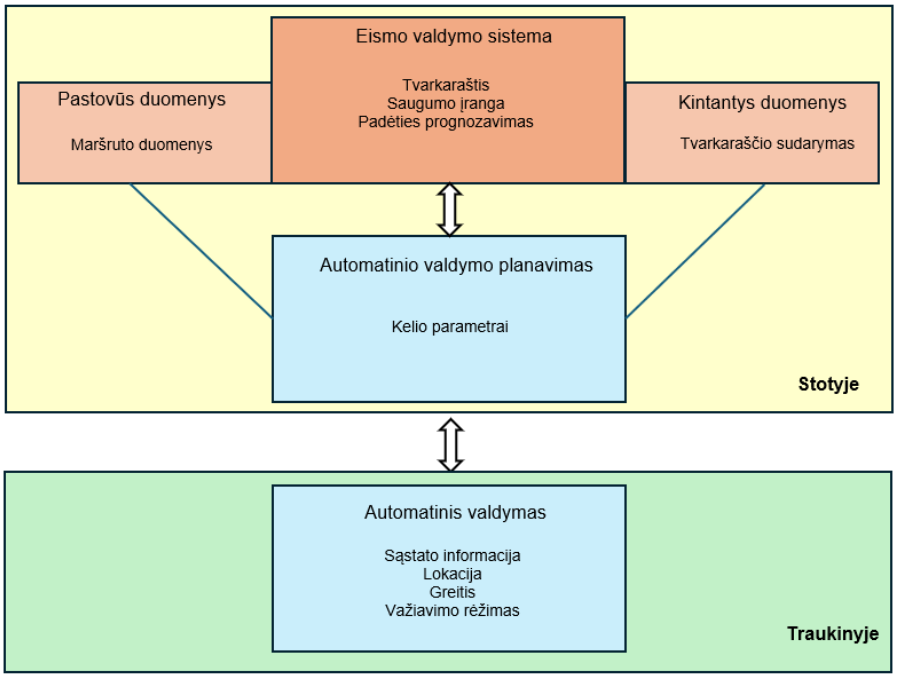
Pasaulyje yra žinomi du pagrindiniai VDV tipai pagal jų vartojamus degalus: slėginio uždegimo (toliau – SU) ir kibirkštinio uždegimo (toliau – KU). SU varikliai yra žinomi dėl geresnės degalų ekonomijos, ilgesnio eksploatacijos laiko ir didesnio sukimo momento. Dėl šių priežasčių jie yra populiarūs Europos šalyse, daugiausia sunkiasvorėse transporto priemonėse, tačiau pastaruoju metu susidomėjimas dyzeliniais varikliais mažėja dėl jų didesnės oro taršos ir sveikatos poveikio, o daugiau dėmesio skiriama alternatyvioms variklių technologijoms, tokioms kaip elektriniai ir hibridiniai varikliai, siekiant mažinti TP sukeliamą neigamą poveikį aplinkai (Urbancic et al., 2017). Pagal Europos automobilių gamintojų asociaciją (ACEA), vidutinis TP amžius Europoje svyruoja nuo 14 iki 17 metų. Tai reiškia, kad didžioji dalis TP buvo pagamintos pagal „Euro 4“, „Euro 5“ standartus, o SU transporto priemonės su šiais standartais pasižymi didele skleidžiama tarša. Nors SU variklius turinčios TP išmeta mažiau anglies dioksido, kyla rimtas susirūpinimas dėl jų išmetamų kietųjų dalelių poveikio visuomenės sveikatai.

2.2 Traukos riedmenų energijos sąnaudų mažinimo galimybių analizė

VDV efektyvumo didinimas ir energijos sąnaudų mažinimas yra esminiai tikslai siekiant sumažinti TP eksploatacines išlaidas ir aplinkos taršą. Siekiant šių tikslų, buvo sukurtos pažangios technologijos, kurios prisideda prie VDV efektyvumo didinimo ir degalų sąnaudų mažinimo. Viena iš šių technologijų yra cilindrų deaktyvavimas, kuri leidžia išjungti dalį VDV cilindrų, kai nereikia visos galios, taip taupant energiją. Automatinės VDV stabdymo – paleidimo sistemos (toliau – SPS) automatiškai sustabdo VDV, kai TP sustoja, ir vėl paleidžia, kai reikia važiuoti, kas padeda mažinti degalų sąnaudas ir išmetamųjų teršalų kiekį. Valdymo asistavimo sistemos padeda operatoriams efektyviau valdyti TP, optimizuojant degalų naudojimą ir vairavimo stilių. Šių technologijų integravimas į TP eksploataciją leidžia pasiekti aukštą efektyvumo lygį, sumažinti eksploatacines išlaidas ir prisidėti prie tvaresnio transporto vystymo.

2.2.1 Traukos riedmenų ir eismo valdymo metodai

Gerai suplanuotas, eismo grafikas gali sutrumpinti kelionės trukmę, nes didžiausia energijos sąnaudų dalis tenka greitėjimui, sumažinus sustojimų skaičių, galima sumažinti didelę jos dalį. Grafikas planuojamas ieškant optimalaus sustojimų skirtingose stotyse skaičiaus atsižvelgiant į keleivių srautus ir efektyviai išnaudojant atsargos laiką stotyse, skirtą grafiko pasivijimui. Yra žinoma, jog geležinkelio eismo pirmenybė tenka keleiviniams traukiniams, todėl prekiniai traukiniai turi derintis pagal keleivinius, nepaisant ženkliai didesnės masės ir didesnių energijos sąnaudų dėl grafiko nepastovumo. Galimybė mažinti energijos nuostolius yra kuo glausčiau suderinant prekinių ir keleivinių traukinių grafikus, taip sumažinant poreikį stabdyti, stovėti ir greitėti. (Formato et al., 2023) pateikia pavyzdžius, kaip mašinisto asistavimo sistemos (angl. DAS – *Driver Advisory Systems*), gali optimizuoti traukinių grafikus ir pagerinti energijos efektyvumą. Šios sistemos padeda mašinistams priimti tinkamus sprendimus, pateikdamos laiko ir greičio rekomendacijas, kad traukiniai galėtų sklandžiai įsilieti į keleivinių traukinių srautą. Principinė mašinisto asistavimo sistemos (toliau – DAS) algoritmo schema yra pavaizduota 4 pav.



4 pav. Principinė DAS algoritmo schema

Pateiktame 4 paveiksle nurodomos sistemos, reikalingos DAS profiliui atnaujinti ir optimizuoti. Duomenų įvestys yra atskirtos į pastovius ir kintančius dydžius. Pastovūs dydžiai nurodo nekintančias kelio vertes – kreives ir profilius, o kintantys dydžiai yra nuolat atnaujinami ryšiu iš eismo valdymo centro. Sistema, gavusi atgalinį ryšį iš traukinio, kuriame nurodyti jo važiavimo parametrai, pateikia pasiūlymus realiuoju laiku, kaip vertėtų važiuoti toliau. Naudojant šią sistemą, pagrindinis energijos sąnaudų sumažėjimas yra gaunamas mažinant vidutinį traukinio greitį. Svarbu paminėti, jog greičio mažinimas galimas tik gerai žinant kelio kreives ir profilį, nes papildomas greitėjimas vien kreivės ar profilio įveikimo yra neefektyvus energijos vartojimas. Pagal Valicką (2024), energijos sąnaudas mažinti sudarius automatinį valdymo planą yra efektyviausia, kai traukinys išnaudoja savo inerciją ir juda laisvąja eiga.

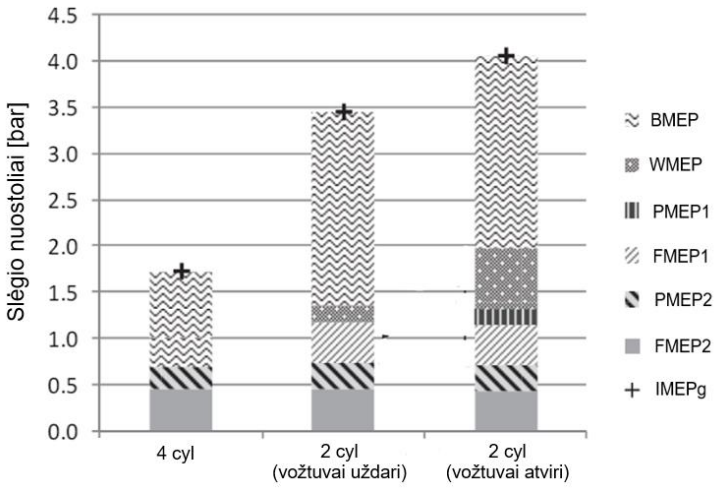
Automatinis traukinio variklio valdymas naudojantis DAS pagrindu nėra visiška naujovė geležinkelių transporto sektoriuje. Dauguma metro ir miestinių traukinių jau yra visiškai autonominiai. Mokslinėje literatūroje mokslininkai svarsto galimybes DAS leisti pilnai valdyti traukinį, nes autonominis valdymas, efektyvumo atžvilgiu yra pranašesnis už žmogaus valdomą traukinį. Automatinės valdymo sistemos gali greičiau ir tiksliau reaguoti į kintančias vairavimo sąlygas, atsižvelgiant į momentinius VDV parametrus. Tai leidžia greitai pritaikyti VDV valdymą pagal kintamas apkrovas, kelio sąlygas ar oro pokyčius. Nors DAS pritaikymas visiškam autonominiam važiavimui būtų efektyvus sprendimas, nevisiškai išvystytose infrastruktūrose, kuriose prekiniai ir keleiviniai traukiniai dalinasi tais pačiais bėgiais, padidintų pavojų ir avarijų tikimybę.

Geležinkelyje sąstatų masė gali svyruoti nuo kelių šimtų iki kelių tūkstančių tonų, todėl galima teigti, jog traukiniai yra labai inertiški. Inertiškumas pasireiškia tiek sąstatui pajudant iš vietos, tiek stabdant. Stabdant lokomotyvą su elektrine pavara, veikia didžiulė inercinė jėga, todėl aširatis per pavaros krumpliaratį, suka elektros traukos variklį (toliau – ETV), kurio rotorius generuoja elektros energiją. Šią energiją prisiima reostatas, todėl toks stabdymo būdas vadinamas dinaminiu stabdymu. Elektriniai traukiniai ar elektrovežiai stabdydami dinaminiu stabdymu, sukauptą energiją energiją gali atiduoti atgal į tinklą, sutaupydami apie 13 % sunaudotos energijos (Yi, 2018). Tačiau didelė dalis traukos riedmenų yra šilumvežiai, kurie neturi galimybių akumuliuoti tiek daug elektros energijos. Zhao et al. (2021) vienintelis sprendimas traukos riedmenims akumuliuoti didesnę elektros energiją nedidinant naudojamo ploto poreikio ir neturint galimybės jos grąžinti į tinklą, yra naudoti hibridines energijos akumuliacijos sistemas. Sukauptą energiją lokomotyvai galėtų panaudoti VDV paleidimui, papildomos įrangos maitinimui, kai VDV yra sustabdytas, kintamųjų traukos režimų metu sušvelninant apkrovos pokytį ir net pajudėjimui iš vietos energiją perduodant tiesiogiai į ETV, taip sumažinant staigų variklio apkrovimą. Lebedevas et al. (2014) išanalizavęs lokomotyvų degalų sąnaudas pereinamaisiai režimais, matematiniais skaičiavimais įrodė, jog net ir naujesnės gamybos varikliai nėra tinkamai pritaikyti staigioms apkrovoms. Pereinamųjų režimų metu degalų sąnaudos padidėja iki 3%. Nors šis skaičius neatrodo didelis, sušvelninant pereinamųjų darbo režimų apkrovas galima ženkliai prailginti VDV eksploatacijos laikotarpį.

2.2.3 Vidaus degimo variklių cilindrų deaktyvavimo sistema

VDV yra efektyviausi, kai atlieka maksimalų darbą patirdami maksimalią apkrovą, tačiau dažniausiu atveju jie yra pritaikyti įrenginiams, kurių darbo režimai kinta, todėl VDV skirtingais režimais veikia skirtingu efektyvumu, o tai daro įtaką netikslingam energijos sąnaudų suvartojimui. VDV transporto priemonėse dažnai dirba tuščiąja eiga, o tai reiškia, jog jų darbas tuo metu tampa nuostolingu. Norint optimizuoti VDV darbą nepilnos apkrovos režimu reikia gerai įvertinti kada jo darbas yra reikalingas, o kada ne. TP neefektyvus energijos sunaudojimas išauga, kai jos VDV dirba tuščiąja eiga arba daline apkrova. Dažnu atveju tai reiškia, jog TP yra veikiančiu VDV, tačiau neatlieka jokio naudingo darbo arba nepatiria didesnės apkrovos. Cilindrų deaktyvavimo sistema yra skirta išjungti kai kuriuos cilindrus esant mažai apkrovai, pavyzdžiui, dirbant tuščiąja eiga arba važiuojant pastoviu greičiu patiriant tik dalinę apkrovą. Cilindrų išjungimas yra vis dažniau sutinkamas didelio vidinio tūrio KU varikliuose be papildomo oro pripūtimo, nes šios sistemos pritaikymas yra žymiai paprastesnis. KU varikliuose degimo procesą pradeda kibirkšties uždegimas. Šį procesą valdyti galima atjungiant uždegimo žvakes reikiamu metu ir uždarant įsiurbimo bei išmetimo vožtuvus. SU varikliai yra jautresni temperatūrų kaitoms degimo metu, dirba be droselinės sklendės, naudoja oro pripūtimo sistemas (turbokompresorius)

ir uždegimas vyksta slėginiu būdu, todėl šių variklių degimo procesą išjungiant cilindrus kontroliuoti yra sudėtingiau. Zammit et al. (2013) atliko tyrimą bandant išnagrinėti dyzelinio variklio cilindrų išjungimo efektyvumą. Autorius eksperimentinio tyrimo metu bandė atjungti SU variklio cilindrus nutraukiant degalų įpurškimą į cilindrus valdant purkštuvus ir uždarant dujų paskirstymo vožtuvus. Atlikto bandymo metu gauta cilindrų apkrova yra pavaizduota 5 pav.



5 pav. Cilindrų bendroji apkrova (Zammit et al., 2013)

Paveiksle: BMEP – vidutinis efektyvusis slėgis, WMEP – darbo ciklo efektyvusis slėgis, PMEP1 – oro įsiurbimo ir išmetimo vidutinis slėgis veikiančiuose cilindruose, FMEP1 – trinties vidutinis efektyvusis slėgis veikiančiuose cilindruose, PMEP2 – bendras oro įsiurbimo ir išmetimo vidutinis slėgis, FMEP2 – bendras trinties vidutinis efektyvusis slėgis, IMEPg – indikatorinis vidutinis efektyvusis slėgis. Iš pateikto paveikslo matoma, jog efektyvesnis būdas atjungti cilindrus yra uždarant vožtuvus, nes neuždarant vožtuvų, įsiurbiamas mišinys susimaišo tarp cilindrų, o tai sumažina likusių cilindrų darbo efektyvumą. Nors ši sistema degalų sąnaudų mažinimo atžvilgiu yra efektyvi, tačiau tik vienintelis autoriaus išskirtas VDV darbo režimas išjungtais cilindrais gali sumažinti išmetamų teršalų kiekį. SU varikliuose su oro pripūtimu tai pasiekti galima VDV dirbant tik labai mažomis apkrovomis, nes patiriant didesnes apkrovas degalų kiekis patenkantis į likusius dirbančius cilindrus nebesudega taip efektyviai, todėl ženkliai padidėja PM, HC ir CO. Fridrichova et al. (2021) pateikė pagrindinius veiksnius, kurių reiktų imtis norint padidinti cilindrų deaktyvavimo sistemą SU varikliuose:

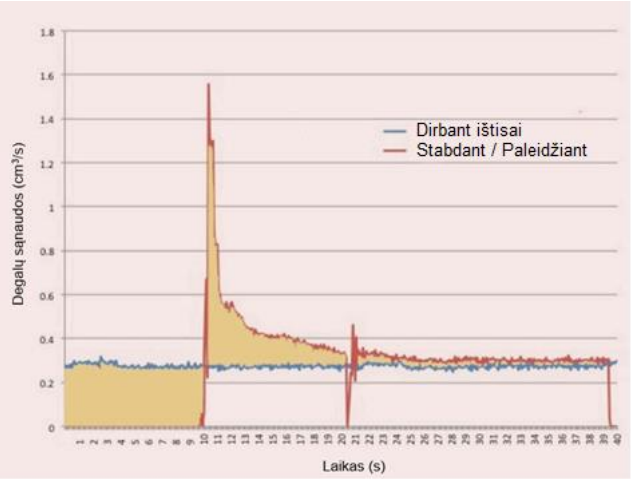
- elektromagnetinių vožtuvų panaudojimas, kuris patiriant mažus mechaninius nuostolius galėtų keisti vožtuvų padėtį;
- kintančios įpurškimo kampo sistemos įdiegimas, kuris galėtų paankstinti degalų įpurškimą cilindrų išjungimo metu;
- oro pripūtimo slėgio padidinimas, kuris leistų išjungti cilindrus šiek tiek platesniame galios poreikio diapazone.

2.2.4 Automatinių vidaus degimo variklių stabdymo – paleidimo sistemų pritaikymas transporto priemonėse

SPS yra pažangi technologija, skirta įrenginiams su VDV ir jos pagrindinis tikslas yra sumažinti degalų sąnaudas ir išmetamų teršalų kiekį, automatiškai sustabdant ir paleidžiant VDV, kai TP netenka apkrovos ir ją įgauna arba sustoja ir pradeda judėti. Ši technologija tapo ypač svarbi pastaraisiais dešimtmečiais, kai vis daugiau dėmesio skiriama aplinkos apsaugai ir degalų suvartojimo mažinimui. SPS yra plačiai naudojamos įvairiuose transporto srityse – nuo mažų miesto automobilių iki sunkvežimių, traktorių, laivų ir lokomotyvų. SPS sistemą sudaro:

- variklio valdymo blokas (angl. ECU – *Engine Control Unit*). Šis blokas yra atsakingas už pačios SPS sistemos veikimą. Jis nuolat stebi įvairius TP parametrus ir nusprendžia, kada suatbdyti ar paleisti variklį pagal specialiai pritaikytą algoritmą;
- sustiprinta akumuliatoriaus baterija (toliau – AKB). Dėl galimo dažno VDV paleidimo ir tam tikrų agregatų energijos aprūpinimo, kai VDV yra sustabdytas, sistemai yra reikalinga padidintos talpos AKB;
- sustiprintas starteris arba starteris – generatorius. Standartiniai starteriai nėra pajėgūs atlaikyti nuolatinius paleidimo ciklus, todėl SPS yra reikalingi sustiprinti arba specializuoti starteriai;
- įvairūs jutikliai, kurie siunčia signalus į valdymo bloką.

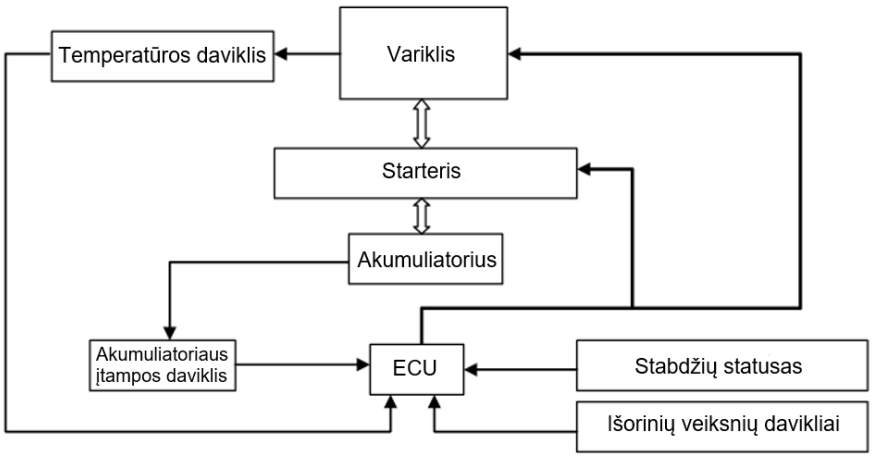
Dažniausiai siekiant įrodyti SPS efektyvumą yra atliekami bandymai. Mokslinėje literatūroje pagrindiniai sutinkami būdai yra: važiavimo ciklo degalų sąnaudų analizė su ir be SPS bei VDV darbo tuščiąja eiga energijos sąnaudų analizė. Paprastą tyrimą analizuojant VDV darbo tuščiąja eiga sąnaudas atliko Gaines (2013). Autorės tyrimas parodė, jog vidutinio dydžio automobilio, su 2,5 litro vidinio tūrio SU varikliu paleidimui ir stabilizavimuisi reikalingas toks pat degalų kiekis, kaip ir VDV dirbant tuščiąja eiga 10 s. Tokiu būdu yra ne tik taupomi degalai, bet ir mažinamas išmetamų teršalų į aplinką kiekis. Šiame tyrime gauto rezultato atvaizdavimas yra pateikiamas 6 pav.



6 pav. Degalų sąnaudos varikliui dirbant ištisai ir stabdant (Gaines, 2013)

Šiuo atveju, atliktas tyrimas parodo, jog degalų sąnaudos reikalingos VDV paleidimui yra daugiau nei 5 kartus didesnės nei dirbant tuščiąja eiga. Taip yra todėl, kad paleidžiant VDV iš naujo, įpurškiama daugiau degalų. Taip pat, VDV tenka papildoma apkrova iš generatoriaus, kuris bando atstatyti AKB energiją sunaudotą paleidimo metu. Nors šis tyrimas parodo aiškią automobilio variklio stabdymo naudą mažinant degalų sąnaudas, jame nebuvo galima įvertinti papildomų energijos sąnaudų, kurias sudaro transporto priemonės įranga: apšvietimas, šildymas ar vėdinimas, komforto sistemos įrenginiai, transporto priemonės valdymo blokas. Grafike galima matyti, jog TP variklis buvo sustabdytas ne ilgiau kaip dvi s, todėl elektros energijos sąnaudos buvo minimalios ir generatoriaus apkrova varikliui ženkliai nepadidėjo.

Norint, jog SPS būtų efektyvi yra labai svarbu suprojektuoti tinkamą jos valdymo algoritmą. Cieslik et al. (2015) atliko tyrimą bandant SPS efektyvumą atliekant važiavimo ciklus KU variklį turinčiu automobiliu „Mercedes-Benz C200“. Straipsnyje išanalizuotas ir pateiktas SPS modelio valdymo algoritmas, kuris užtikrina, jog TP variklis būtų stabdomas tik nereikalingu tuščiosios eigos darbo metu. Šio modelio schema yra pavaizduota 7 pav.



7 pav. SPS valdymo modelis (Cieslik et al., 2015)

Šios sistemos veikimui, tam tikros sąlygos turi atitikti valdymo modelio keliamus reikalavimus:

- tinkamas akumuliatoriaus įkrovos lygis;
- aušinimo skysčio temperatūra nuo 40 °C iki 100 °C;
- TP visiškai sustojusi (jei transporto priemonė su mechanine pavarų dėže – įjungta laisva pavara);
- uždarytos visos durys bei variklio dangtis;
- lauko temperatūra ne žemesnė nei -10 °C.

Bandymai buvo atliekami miesto eismo sąlygomis. Maršruto ilgis – 3 km. Eksperimento metu buvo atliekamas vienas važiavimas su išjungta ir trys važiavimai su įjungta SPS. Dėl skirtingų eismo sąlygų vieno bandomojo važiavimo trukmė svyravo nuo 425 s iki 539 s, todėl išmatuotos stovėjimo sustabdytu varikliu trukmės taip pat skyrėsi: 67 s, 88 s ir 135 s. Variklio išmetamas CO_2 kiekis VDV dirbant tuščiąja eiga – 0,76 g/s. Žinant stovėjimo laiką ir VDV sūkius dirbant tuščiąja eiga (650 aps./min), autorius išskyrė sumažintų VDV darbo ciklų skaičių. Taip pat, žinant faktą, kad sudeginant 1 kg benzino išsiskiria 3,1 kg CO_2 arba 1 kg CO_2išskirti reikia sudeginti 0,322 kg benzino, sutaupytą degalų kiekį naudojant SPS galima sužinoti naudojant formules:

$$I_{CO_2} \cdot F_{gas/CO_2} = I_{gas} \qquad (1.1)$$

čia: I_{CO_2} – CO_2 emisijos intensyvumas, g/s;

F_{gas/CO_2} – sudeginto benzino kiekis, reikalingas išmesti 1 g CO_2, $g_{benzino}/g_{CO_2}$;

I_{gas} – benzino degimo intensyvumas, g/s.

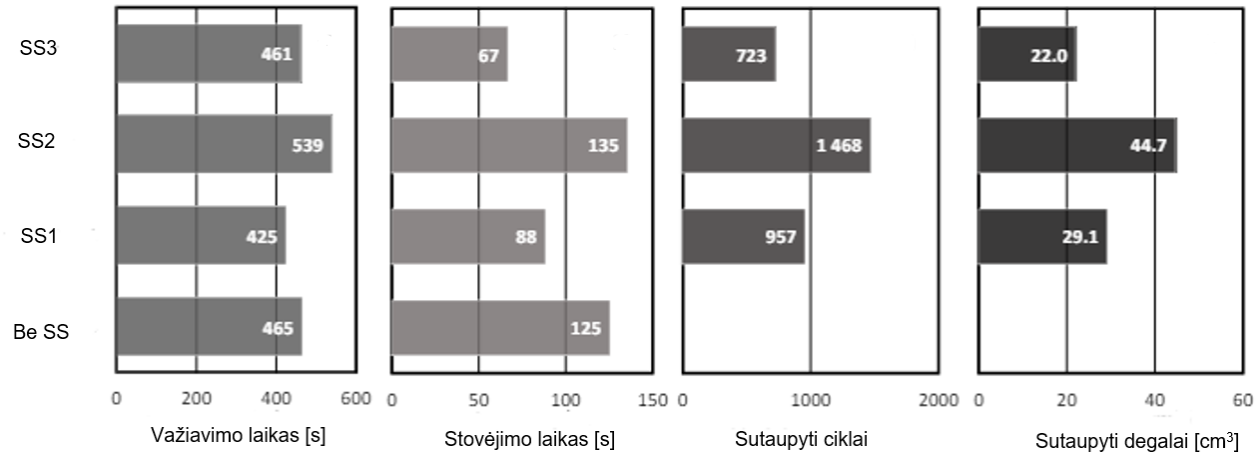
Įvertinus benzino tankį toliau apskaičiuojamas benzino suvartojimo intensyvumas:

$$\frac{I_{CO_2} \cdot F_{gas/CO_2}}{\rho_{gas}} = V_{gas} \qquad (1.2)$$

čia: ρ_{gas} – benzino tankis, g/cm^3;

V_{gas} – tūrinis benzino sunaudojimo intensyvumas, cm^3/s.

Atlikto bandymo matavimų ir skaičiavimų rezultatai yra pateikiami 8 pav.



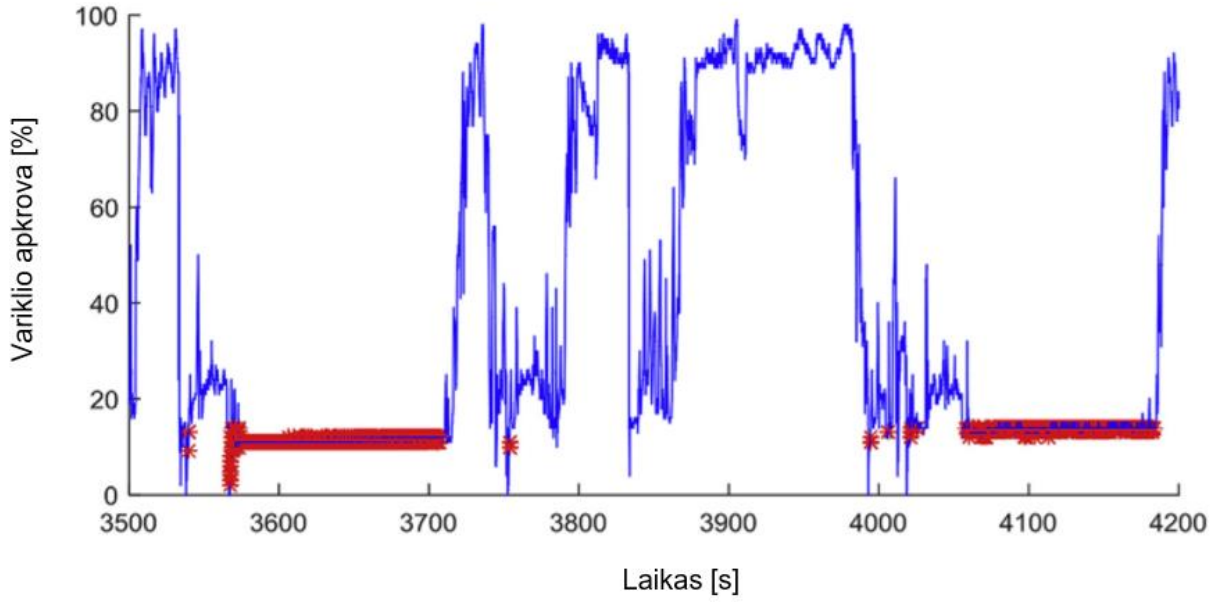
8 pav. Atlikto bandymo matavimų ir skaičiavimų rezultatai (Cieslik et al., 2015)

Kiekvienu atveju, kai SPS yra įjungta, ji sutrumpina VDV veikimo laiką atitinkamai 21 %, 25 % ir 15 %. Tai reiškia, kad VDV darbas tuščiąja eiga vidutiniškai sutrumpėja maždaug 20 %. Sutaupyti degalai važiuojant visais ciklais su įjungta SPS yra atitinkamai 22 cm^3, 44,7 cm^3 ir 29,1 cm^3 reiškia, jog išmetamo CO_2 kiekis taip pat sumažėja atitinkamai 66 g, 102 g ir 51 g, o tai yra pasiekiama vos per 3 km su sąlyginai nedidelio galingumo varikliu.

Tokį pat metodą savo tyrime taikė ir Fonseca et al. (2011). Šiame straipsnyje autorė aprašo SPS sistemos efektyvumą taršos atžvilgiu važiuojant mieste su keturiais ratais varomais SU variklius turinčiais automobiliais. Automobilių parametrai buvo stebimi per įmontuotą išmetamųjų dujų emisijos matavimo sistemą. Abi TP turėjo identiškus techninius parametrus, atitinkančius „Euro 4“ standartą, tačiau vienas iš jų turėjo aktyvią SPS. Nepriklausomai nuo vairavimo stiliaus skirtumų, kelio profilio ir tipo, eismo spūsčių ir variklio darbinės temperatūros, automobilio su aktyvia SPS išmetamas CO_2 kiekis buvo mažesnis daugiau nei 20 % lyginant su automobiliu, kuriame nebuvo SPS sistemos.

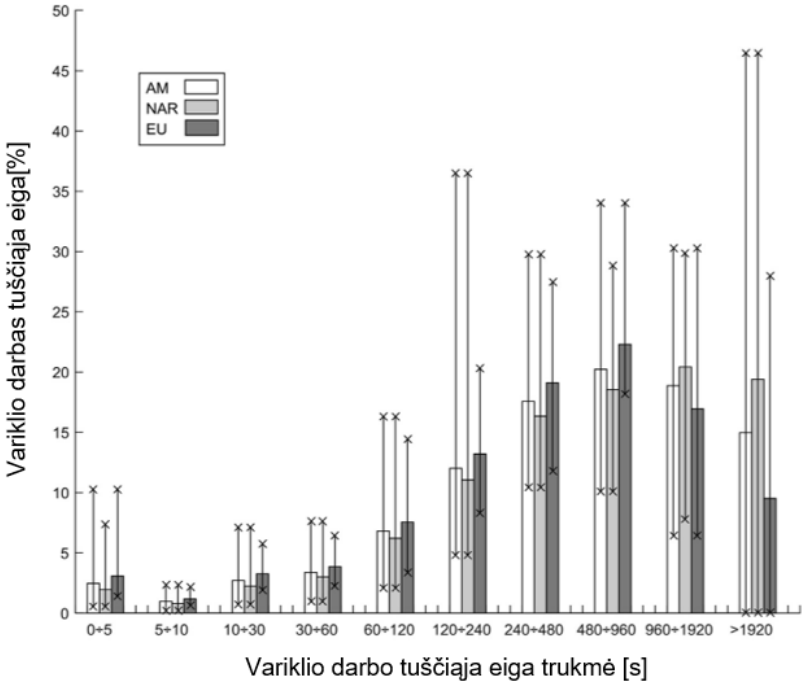
Tam tikrais atvejais, VDV darbas tuščiąja eiga gali būti pateisinamas, tačiau dažniau tuščioji eiga yra betikslė. Pagal Brodrick et al. (2002), TP darbą tuščiąja eiga galima suskirstyti į dvi pagrindines kategorijas: būtinas ir nereikalingas. Būtinas darbas tuščiąja eiga nėra svarstomas kaip energijos švaistymas, nes jis yra reikalingas TP sklandžiam veikimui. Tai apima variklio pašildymą po užvedimo, elektros energijos kaupimą AKB, kuris yra reikalingas kitam VDV paleidimui. Nereikalingas darbas tuščiąja eiga yra laikomas energijos švaistymu, kai VDV nėra stabdomas dėl operatoriaus komforto ar neapdairumo. Pagrindinė to priežastis yra papildomas elektros įrenginių naudojimas. Dažniausias SPS pritaikymas yra aptinkamas lengvuosiuose automobiliuose, ypač miestuose, kur dažni sustojimai daro didelę įtaką degalų sąnaudoms ir taršos lygiui, tačiau jų pritaikymas ir kitoms TP yra taip pat efektyvus energijos mažinimo būdas. Transporto priemonėse su didesniais vidaus degimo varikliais SPS sistemų nauda didėja dėl šių jų didesnio degalų suvartojimo. Kaip pavyzdys, žemės ūkyje naudojami traktoriai gali dirbti tuščiąja

eiga nuo 5 % iki 50 % viso jų eksploatavimo laiko, todėl tokį nenaudingą VDV darbą yra svarbu sumažinti iki minimumo, nes jis kenkia žmonių sveikatai, aplinkai, pablogina degalų sąnaudas ir sumažina VDV eksploatavimo laiką (Perozzi et al., 2016). Autoriai, pasitelkę integruotus duomenų kaupiklius, taikydami statistinius metodus nustatė Europos ir Šiaurės Amerikos žemės ūkiuose naudojamų traktorių *New Holland T9* variklių darbo tuščiąja eiga laiko pasiskirstymą. Žemės ūkio traktorių nereikalingą variklio darbą tuščiąja eiga nustatyti galima tik įvertinus papildomus kriterijus, nes šios TP dažnai atlieka netiesioginį darbą, o veikia kaip mobilūs energijos šaltiniai įvairiems agregatams. Pagrindiniai energijos perdavimo būdai yra mechaninės energijos perdavimas per kardaninį veleną ir hidraulinės energijos perdavimas per sujungtą aukšto slėgio vamzdyną. Norint tinkamai įvertinti traktoriaus nereikalingą VDV darbą tuščiąja eiga, svarbu papildyti SPS valdymo algoritmą parametru, kuris parodo jėgainės apkrovimą, taip įsitikinant, jog neatlieka papildomo darbo kaip mobili jėgainė. Tai galima suprasti pagal VDV patiriamą apkrovą ir jos stabilumą. Pavyzdys yra pateikiamas 9 pav.



9 pav. Traktoriaus VDV apkrovos darbo metu pavyzdys (Perozzi et al., 2016)

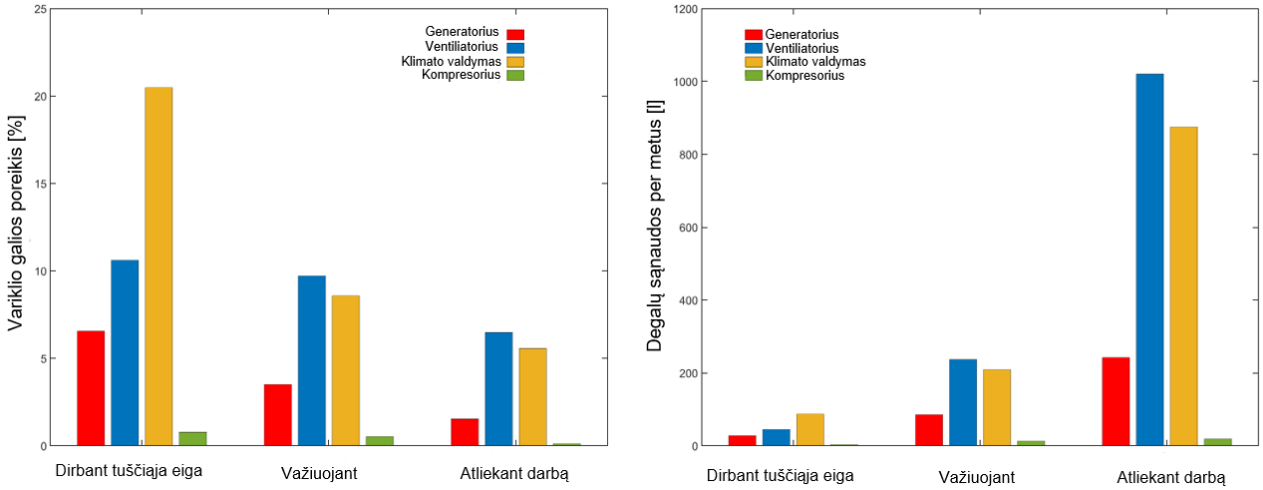
9 pav. pateiktame grafike raudoni paryškinimai parodo, jog traktorius savo darbo cikle nepatiria jokios papildomos apkrovos, o tai reiškia, kad jo darbas tuščiąja eiga yra nereikalingas. Žinant visą VDV darbo laiką ir laiką pradirbtą tuščiąja eiga, galima sudaryti diagramą, kuriame yra pavaizduotas jų santykis nuo stovėjimo trukmės. Ši diagrama yra pateikiama 10 pav.



10 pav. VDV darbo tuščiąja eiga pasiskirstymai ir trukmės: AM – globalinėje rinkoje, NAR – Šiaurės Amerikoje, EU – Europoje (Perozzi et al., 2016)

Iš 10 pav. pateiktos diagramos matoma, jog vidutiniškai VDV darbo tuščiąja eiga trukmė sudaro apie 20 % viso traktorių eksploatavimo laiko, o dažniausias VDV darbo tuščia eiga laiko intervalas yra nuo 480 iki 960 s. Įvertinus tai, jog pagal autorių surinktus duomenis šie traktoriai per metus vidutiniškai dirba apie 700 h, o jų vidutinės degalų sąnaudos dirbant tuščiąja eiga yra 7 l/h, per metus su SPS sistema vienas traktorius gali sutaupyti iki 1000 l dyzelino.

Visos transporto priemonės tampa technologiškesnės ir inovatyvesnės, taip palengvindamos darbą jų operatoriams. Jose gerokai padaugėjo priedų, kurie padidina komforto lygį ir sumažina darbo krūvį, tačiau šiems priedams yra reikalinga papildoma energija. Papildomos įrangos energijos aprūpinimui VDV apkrovą gali generuoti TP integruoti generatoriai, ventiliatoriai, kondicionavimo kompresoriai, stabdžių sistemos kompresoriai. Jų galios poreikis priklauso nuo VDV sūkių dažnio, todėl gali būti patiriama didelių energijos nuostolių ypač tam tikromis sąlygomis, pavyzdžiui – VDV dirbant tuščiąja eiga. Šie agregatai yra varomi VDV, todėl dėl jų sunaudojamos galios VDV praranda savo naudingąją galią. Saetti et al. (2021) savo straipsnyje įvertino traktoriaus, kurio VDV galingumas yra 192 kW, papildomos įrangos ir priedų galios poreikį. „Steyr 6230 CVT“ traktoriuje buvo sumontuoti duomenų registratoriai ir pagalbiniai jutikliai, kad būtų galima stebėti prieš tai įvardytos įrangos galios suvartojimą 45 dienų laikotarpiu. Autoriai pateikė diagramas, kuriose vaizduojamos variklio galios procentinės sąnaudos ir degalų sąnaudos, kurias suvartoja vien papildoma įranga. Šios diagramos yra pavaizduotos 11 pav.



11 pav. Traktoriaus papildomos įrangos apkrovimas varikliui – kairėje ir įtaka degalų sąnaudoms pagal darbo režimą – dešinėje (Saetti et al., 2021)

Žiūrint į 11 pav. pateiktus tyrimo rezultatus galima matyti, jog degalų sąnaudos papildomų įrenginių aprūpinimui yra didžiausios traktoriui atliekant darbą, bet pagal tuo metu VDV generuojamą galią, procentinė visos VDV galios dalis tenkanti papildomai įrangai yra nedidelė. Didžiausią dalį VDV generuojamos galios papildoma įranga sunaudoja kai jis dirba tuščiąja eiga. VDV dirbant tuščiąja eiga papildoma įranga sunaudoja 38 % visos generuojamos galios tuo metu. Vien per eksperimentinio bandymo laikotarpį, papildoma įranga suvartojo 462 litrus dyzelino. Pagal Matteti et al. (2019) atliktą analizę, tokio tipo traktoriai per metus dirba apie 850 h, suvartodami 19 t dyzelino. Taip pat autoriai pažymi, jog sunkiosios TP dažniausiai dirba tuščiąja eiga nuo 28 % iki 46% viso darbo laiko, o vien papildomai įrangai per metus tuščiąja eiga yra sunaudojama virš 2 t dyzelino. Šio skaičiaus panaikinti visiškai neįmanoma, nes dalis šio VDV darbo tuščiąja eiga yra efektyvus darbas, o tai reiškia, jog nemažą dalį energijos suvartojantys priedai yra būtini sėkmingam TP eksploatavimui.

Molari et al. (2019) norėdami išsiaiškinti, kodėl traktoriai tiek daug laiko dirba neefektyviai atliko tyrimą, kurio metu rinko duomenis pagrindinėje TP duomenų magistralėje (angl. CAN – *Controller Area Network*) duomenų kaupikliu ir 96 h fiksavo vaizdą traktoriaus viduje. Vaizduose iš kabinos pastebėta, jog didžiąją dalį VDV darbo tuščiąja eiga operatorius pats atliko naudingą darbą ir neturėjo galimybės sustabdyti VDV, tačiau galima pastebėti, jog yra atvejų, kai operatorius palieka dirbti VDV tuščiąja eiga dėl asmeninių priežasčių, kurios niekaip nėra susijusios su darbu. Apskaičiuotas ir suskirstytas į kategorijas laikas yra pavaizduotas 2.1 lentelėje.

2.1 lentelė. Operatoriaus veiksmai VDV tuščiosios eigos metu (Molari et al., 2019)

Sustojimo kategorija	Sustojimo trukmė (%)	Vidutinė sustojimo trukmė (s)	Didžiausia sustojimo trukmė (s)	Sustojimų skaičius	Standartinis nuokrypis (s)
Prikabinimo ir atkabininmo	9,2	263	603	11	133
Valdymas ir reguliavimas	31,7	186	1406	54	240
Pokalbiai tarp vairuotojų	34,5	331	1111	33	203
Manevravimas	5,7	363	874	5	309
Poilsis	5,4	211	1029	8	313
Techninė priežiūra	6,3	1980	1980	1	0
Mobiliojo telefono naudojimas	5,8	152	562	12	139
Neklasifikuota	1,4	49	179	9	54

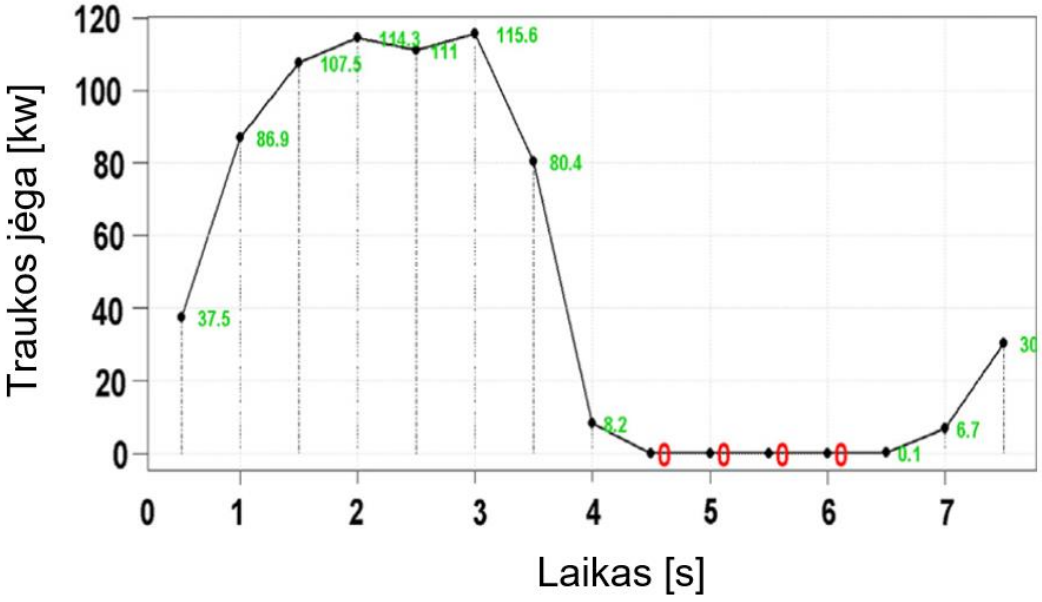
Kelių kategorijų laiką, kuris buvo sunaudotas dėl operatoriaus neefektyvaus darbo ir dėl kurio buvo naudojami papildomi energijos ištekliai, eliminuoti galima, tačiau kitas laikas, kurio metu operatorius atliko taip pat svarbius darbus, galima eliminuoti tik tobulinant variklio valdymo sistemą.

Argonne National Laboratory (2015) straipsnyje pažymėjo, jog tolimųjų reisų vilkikai taip pat suvartoja didelį kiekį degalų papildomos įrangos aprūpinimui energija. Tačiau, didžioji dalis šių energijos sąnaudų negali būti sumažinta, nes vairuotojai gyvena juose, o papildomos įrangos veikimui palaikyti reikalingas galingas ir talpus energijos šaltinis. Autoriai pateikė pasiūlymus, kaip šias sąnaudas sumažinti neatsisakant papildomos įrangos:

- dyzeliniai šildytuvai – šios sistemos naudoja mažai degalų, išmeta mažai teršalų, yra tylios ir greitai atsiperka vairuotojams, kurie dažniau važinėja šaltuose kraštuose;
- SPS – šios sistemos visiškai nepanaikina tuščiosios eigos, bet ją sumažina. Taip pat sumažina nuo to tiesiogiai priklausančias degalų sąnaudas, variklio susidėvėjimą ir išmetamųjų teršalų kiekį, tačiau nors SPS nėra brangios, jų efektyvumas šaltomis oro sąlygomis, VDV naudojant vien kabini šildyti, yra nedidelis. Taip pat, dažnas VDV paleidimas gali trikdyti vairuotojo poilsį;
- elektrifikuotos stovėjimo vietos – tai yra infrastruktūros technologija, kuri leidžia vairuotojams prisijungti elektros energiją iš išorinio tinklo, todėl papildomų įrenginių naudojimui VDV tampa nebereikalingas.

Traukos riedmenų VDV generuoja tūkstančius kilovatų galios, todėl jų eksploatacinių skysčių talpos yra taip pat didesnės nei įprasta. Šilumvežių VDV gali užtrukti 1 h ar net ilgiau, kol bus pasiekta jų darbinė temperatūra. Taip pat, papildomos įrangos poreikis energijai yra ne tik didelis, bet ir svarbus norint užtikrinti geležinkelio eismo saugumą. Dėl šių priežasčių šilumvežių savininkai nenori stabdyti VDV eksploatuojant, todėl aukoja papildomus degalus, bandydami užtikrinti papildomą saugumą. Šilumvežių VDV didelė galia, reiškia, jog jų momentinės degalų sąnaudos yra taip pat didelės. Siekiant sumažinti traukos riedmenų išmetamą taršą, pasaulyje yra išleidžiami įstatymai, ribojantys šilumvežių VDV darbą tuščiąja eiga. Šie ribojimai yra taikomi,

kai lokomotyvo darbas tuščiąja eiga tampa nereikalingas. Norint užtikrinti šių ribojimų laikymąsi, lokomotyvų savininkai privalo diegti SPS sistemas, kurios gali automatiškai įvertinti, kada VDV darbas tampa nereikalingu. Pagal Weawer (2006), senesnių šilumvežių VDV sustabdymas yra lygus 1,5 min jo darbo tuščiuoju režimu. Lenkų mokslininkai Kaluza ir Kurcharski (2018), kurie atliko statistinį tyrimą su panašiais riedmenimis, kurie yra eksploatuojami Lietuvoje nustatė, jog manevriniai lokomotyvai Lenkijoje, kurie dirba panašiomis sąlygomis, didžiąją dalį darbo laiko pradirba tuščiąja eiga. Autoriai fiksavę lokomotyvų darbą 1000 h nustatė, jog senų lokomotyvų darbas tuščiąja eiga vidutiniškai sudaro 70 % viso jų darbo laiko (nuo 55% iki 90 %). Tai reiškia, jog vidutinės degalų sąnaudos per parą suvartojamos tuščiajai eigai yra 150 l (nuo 90 l iki 240 l). Šiame tyrime tuščioji eiga buvo vertinama kai šilumvežis negeneruoja jokios traukos. Pavyzdys, kaip vertinama lokomotyvo tuščioji eiga yra pavaizduotas 12 pav.

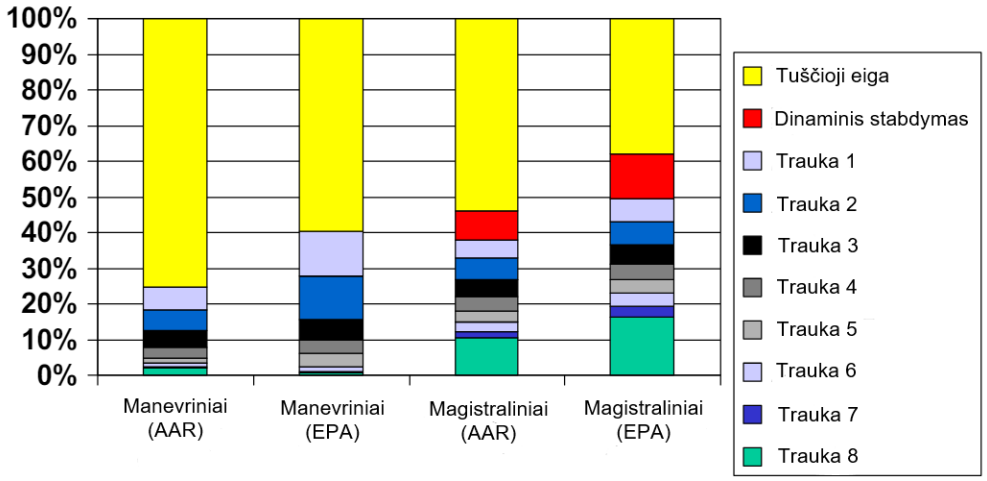


12 pav. Šilumvežio tuščiosios eigos pavyzdys (Kaluza ir Kurchanski, 2018)

Tokia tuščioji eiga neišnaudoja variklio efektyvumo, bet jos metu VDV negali būti sustabdytas. Pavaizduotame grafike matoma, jog laiko skirtumas nuo maksimalios generuotos traukos jėgos iki VDV darbo tuščiąja eiga yra 2 s. Taip pat, VDV tuščiąja eiga išbuvo kiek daugiau nei 3 s. Pagal autorius, tai yra laikoma tuščiąja eiga, nors tokio pobūdžio tuščioji eiga yra neišvengiama. Ją laikyti nenaudinga arba neefektyvia tuščiąja rida galima tik papildomai vertinant daug parametrų, tokių kaip: greitis, stabdžių padėtis, kompresoriaus statusas ir kt. atitinkamai pagal lokomotyvo seriją.

Manevrinių lokomotyvų darbas kardinaliai skiriasi nuo magistralinių. Jų darbas daugiau atliekamas lokaliai, mažais greičiais, todėl jie tuščiąja eiga pradirba ženkliai mažiau. Gaines et al. (2015) surinktais duomenimis magistraliniai lokomotyvai tuščiąja eiga pradirba taip pat nemažą

dalį viso savo darbo laiko. Manevrinių ir magistralinių lokomotyvų darbo režimų pasiskirstymas yra pavaizduotas 13 pav.



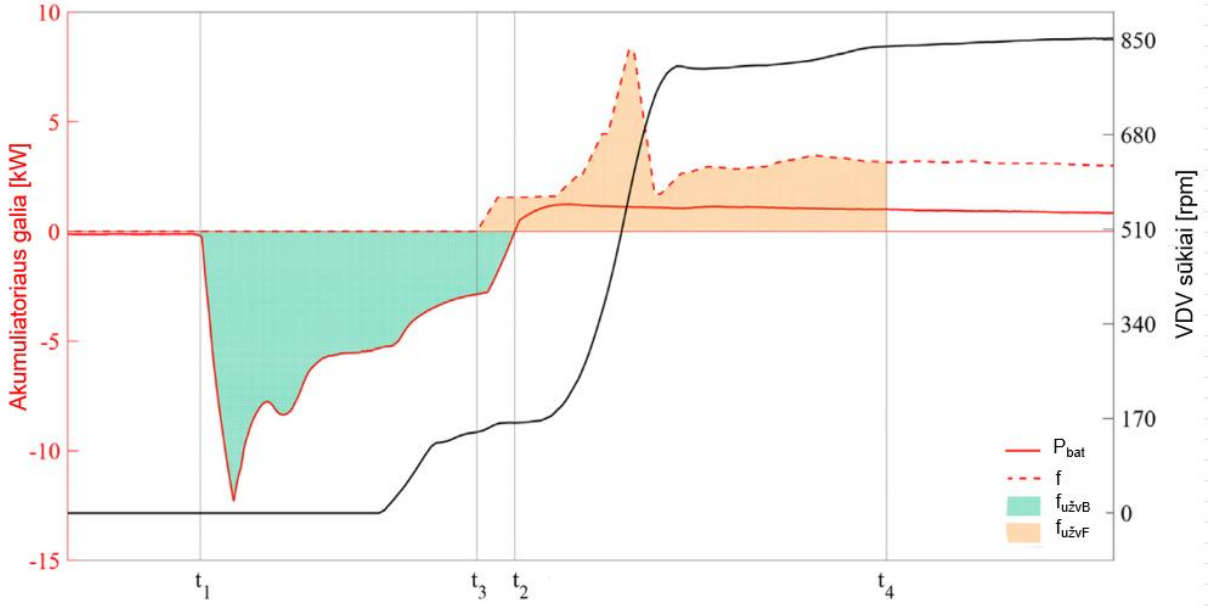
13 pav. Manevrinių ir magistralinių lokomotyvų darbo režimų pasiskirstymas (Gaines et al., 2015)

Pateiktame 13 pav. vaizde: AAR – Amerikos geležinkelių asociacija (angl. *Association of American Railroads*), EPA – apllinkos apsaugos agentūra (angl. *Environmental Protection Agency*). Duomenys parodo, jog skirtingų šaltinių pateikiami duomenys skiriasi, bet jie nurodo tą pačią tendenciją. Magistraliniai šilumvežiai tuščiąja eiga pradirba apie 55 % viso savo darbo laiko, bet šis parametras jiems nusako kada buvo išjungta trauka. Magistraliniai lokomotyvai išjunginėja trauką prisitaikydami prie kelio profilių ir kreivių, kad maksimaliai išnaudotų savo inerciją, bet tuo pačiu metu ir važiuotų pagal nustatytas eismo taisykles. Tuščiąją eigą magistraliniai lokomotyvai gali kompensuoti naudodami dinaminį stabdymą, bet tik tuo atveju, jei sukauptą energiją turi kur akumuliuoti. Kitu atveju tokio stabdymo privalumas tėra stabdžių trinkelių taupymas.

Pasaulyje 75 % triukšmo sukelia eismas, o pagrindinis triukšmo šaltinis eisme – transporto priemonių VDV. Karrouchi et al. (2023) atlikęs bandymą su automobiliu Dacia Sandero, kurio VDV darbinis tūris 1,2 litro įrodė SPS sistemos poreikį siekiant sumažinti transporto priemonių keliamą triukšmo taršą. TP sustabdytu VDV skleidė maždaug 40 dB triukšmą, o mišriame važiavimo cikle triukšmo lygis pakilo dvigubai. Tai leidžia manyti, jog didesnėse TP su galingesniais VDV, SPS taptų dar naudingesne mažinant triukšmą.

Mokslinėje literatūroje aptarinėjama SPS ir jos pritaikymas TP yra nenuginčijamai veiksmingas ir efektyvus būdas mažinti energijos sąnaudas ir taršą, tačiau jos efektyvumą reikėtų vertinti ne vien pagal sustabdyto VDV trukmę. Matteti et al. (2022) savo pateiktame straipsnyje vertindami SPS sistemos pritaikymą mažinant energijos sąnaudas pateikia svarbų argumentą, jog reikia atsižvelgti ir į energijos sąnaudas, kurios susidaro iš papildomų degalų sąnaudų paleidžiant

variklį ir sąnaudų, kurios yra reikalingos išnaudotos elektros energijai atstatyti. Šių sąnaudų vertės yra pavaizduotos 14 pav.



14 pav. Degalų ir elektros energijos sąnaudos VDV paleidimo metu (Matteti et al., 2022)

Grafike: P_{bat} – AKB galingumas [kW], f – degalų sąnaudos [l/h], $f_{užvB}$ – VDV paleidimui reikalingas elektros energijos kiekis [kW], $f_{užvF}$ – VDV paleidimui reikalingas degalų kiekis. Pavaizduoto bandymo metu, papildoma įranga buvo atjungta, nors paleidimo metu visa srovė tenka tik starteriui. Matomi 4 laiko intervalai t_1, t_3, t_2 ir t_4. Laiko intervale t_1 – t_2 VDV buvo paleidžiamas, o intervale t_3 – t_4 jau dirbo sava eiga, tačiau šis laikas buvo reikalingas tam, jog jis VDV darbas normalizuotųsi. Atlikus skaičiavimus gautas vidutinis laikas, po kurio jau apsimoka stabdyti VDV dėl sunaudotų degalų sąnaudų buvo lygus 3,5 s. Maksimali trukmė su įjungta papildoma įranga buvo 3,73 s. Tai reiškia, kad didesniems VDV laikas, reikalingas atkurti sunaudotą energiją paleidimui yra mažesnis, lyginant su anksčiau minėtais pavyzdžiais, kuriems energijai atkurti prireikė 10 s. Atsižvelgiant į degalų sąnaudas ir išmetamo CO_2 kiekį, VDV apsimokėjo stabdyti jam dirbant tuščiąja eiga ilgiau nei 4 s, tačiau siekiant mažinti išmetamą CO, rekomenduojama stabdyti, kai darbas tuščiąja eiga viršija 134 s. Taip yra dėl to, jog SU variklių katalizatoriai, kai VDV patiria apkrovą žemuose sūkiuose, nėra tokie efektyvūs.

2.3 Antrojo skyriaus išvados

1. Mokslinėje literatūroje aptariami įvairūs būdai, kaip sumažinti riedmenų ir kitų TP energijos sąnaudas. Vieni metodai siūlo optimizuoti eismo grafikus ir riedmenų valdymą važiuojant konkrečiais ruožais, atsižvelgiant į nustatytus parametrus. Kiti siūlo būdus kaip kaupti rekuperuotą energiją ir ją panaudoti. Dar kiti rekomenduoja optimizuoti nereikalingą riedmenų VDV darbą įdiegiant SPS.

2. Literatūroje mažai kalbama traukos riedmenų SPS praktinį pritaikymą, ar bent jau teorinį, atsižvelgiant į būtinuosius parametrus. Mokslininkai teigia, kad tiek magistraliniams, tiek manevriniams lokomotyvams SPS sistemos pritaikymas būtų naudingas, tačiau nevertina papildomos įrangos energijos sąnaudų ir neanalizuoja VDV paleidimo metu atsiradusių energijos nuostolių.
3. Atlikus platesnę analizę su kitomis transporto priemonėmis ir jų SPS pritaikymu, gautą informaciją ir strategijas galima panaudoti atliekant tikslesnį teorinį tyrimą pritaikant šią sistemą traukos riedmenims.

3. LOKOMOTYVO ER20CF DARBO REŽIMŲ IR ENERGIJŲ SĄNAUDŲ TYRIMAS

Norint tiksliai išanalizuoti lokomotyvų darbo režimus ir energijos sąnaudas reikia suprasti kokios yra jų darbo apimtys. Tyrimo esmė – suprasti kokiu intensyvumu, kokiomis sąlygomis ir kokiais režimais yra eksploatuojami lokomotyvai Lietuvoje, o tuo pačiu kaip šie režimai lemia VDV efektyvumą. Eksperimentinis tyrimas atliktas stebint, saugant ir analizuojant duomenis apie realiomis sąlygomis eksploatuojamus lokomotyvus. Tyrimui atsitiktinai parinkti penki lokomotyvai į kuriuos įdiegtos nuotolinės diagnostikos sistemos. Šie penki lokomotyvai jokiais kriterijais iš likusių tos pačios serijos lokomotyvų neišsiskiria, todėl jų eksploatacijos įvairumas gali pagrįstai atvaizduoti bendrus rezultatus, kurie gali būti pritaikyti visam šios serijos lokomotyvų parkui. Eksperimentinis tyrimas buvo vykdomas du mėnesius – nuo 2024 m. vasario 1 d. iki balandžio 1 d. imtinai. Tyrimo metu buvo stebimi įvairūs darbo režimai: tolimų krovininių sąstatų kelionės, keleivinių sąstatų kelionės, manevravimas, važiavimas su techniniu gedimu ir prastovos. Tokia eksploatacijos sąlygų įvairovė leidžia lokomotyvų darbą vertinti realistiškiau – įtraukiant ne tik normalią, bet ir trikdomą eksploataciją. Duomenų rinkimas buvo atliekamas nuotoline diagnostikos sistema. Iš visų galimų stebėti parametrų analizei parinkti tie, kurie nurodo VDV darbą ir apibūdina lokomotyvo eksploatacijos sąlygas: VDV sūkių skaičius, momentinės degalų sąnaudos, apkrovos lygis, temperatūra, klaidų kodai, lokomotyvo greitis, būsena, generuojama trauka, stabdymo režimai ir slėgiai sistemoje, AKB įkrovos lygiai, papildomos įrangos būsena ir kt. Visos stebimos vertės buvo renkamos realiuoju laiku ir kaupiamos tyrimo tikslais. Atsižvelgiant į tai, kad lokomotyvų darbo režimų kaita nėra tokia greita kaip, pavyzdžiui, lengvųjų automobilių, buvo pasirinktas 30 s intervalas tarp duomenų fiksavimo. Tai leido išlaikyti pakankamą informacijos detalumą bei sumažinti perteklinių duomenų kiekį. Tyrimo metu sukaupti duomenys laido sudaryti prielaidas tolesniam lokomotyvų darbo režimų klasifikavimui bei jų energijos sąnaudų vertinimui.

3.1 Eksperimentiniam tyrimui naudojama įranga

Tyrimas atliktas su vienu galingiausių ir sunkiausių lokomotyvų Europoje – *Siemens Eurorunner 20 CF*. Šis lokomotyvas yra naujausias „LTG Cargo“ traukos riedmenų parko traukos riedmuo. Jo privalumas lyginant su kitais Lietuvoje esančiais magistraliniais lokomotyvais yra tai, jog šis, 138 t sveriantis lokomotyvas, gali pervežti trečdaliu didesnius krovinius nei galėjo iki šiol naudojami lokomotyvai, todėl ER20CF yra eksploatuojamas duagiausiai. Lyginant su ankstesniais magistraliniais lokomotyvais, kurie dviguba trauka galėjo traukti 4000 t sąstatus, naujasis lokomotyvas pasižymi 40 % mažesnėmis degalų sąnaudomis, o tai reiškia mažesnes energijos

sąnaudas ir didesnę finansinę naudą. Šis lokomotyvas Lietuvoje naudojamas traukti krovininius ir keleivinius sąstatus. ER20CF yra pavaizduotas 15 pav.



15 pav. Lokomotyvas „Siemens ER20CF“ (LTG Cargo, 2023)

Specialiai pagal AB „Lietuvos geležinkeliai“ užsakymą suprojektuotame ir pagamintame lokomotyve įmontuotas 2000 kW galingumo MTU 16V4000R41 dyzelinis variklis, kuris leidžia lokomotyvui lengvai pasiekti maksimalų leidžiamą greitį Lietuvos geležinkeliuose – 90 km/h prekiniams traukiniams ir 120 km/h – keleiviniams traukiniams. Didelė mase ir traukos jėga, kuri siekia 450 kN, pasižymintis lokomotyvas dviguba trauka gali traukti 7000 t sąstatus. Galimybė atlikti trigubą trauką yra, bet tokio poreikio ir sąlygų Lietuvoje dar nebuvo. Lokomotyvo ER20CF techninės charakteristikos yra pateiktos 3.1 lentelėje.

3.1 lentelė. Lokomotyvo ER20CF techninės charakteristikos

Ašių formulė	Co'Co
Masė	138 tonos
Ašinė apkrova	22,5 tonos
Ilgis	22850 mm
Plotis	2924 mm
Aukštis	4425 mm
Vėžės plotis	1520 mm
Jungtinė trauka	≤ 3
Maksimalus greitis	120 km/h
Variklis	MTU 16V4000R41
Variklio darbinis tūris	76,3 l
Variklio tipas	16 cil V-forma
Maksimali galia	2000 kW
Maksimalus sukimo momentas	8500 Nm
Degalų sistemos tipas	Common Rail
Kuro bako talpa	7000 litrų
Eksploatavimo temperatūros diapazonas	-34°C – +40°C
Nominali ETV galia	272 kW

VDV kontroliuoja variklio valdymo blokas (toliau – ECU). Ši integruota sistema atlieka įvairias funkcijas: reguliuoja ir palaiko vienodą reikalingą sūkių skaičių pasikeitus apkrovų dydžiams, parenka reikalingą įpurškiamų degalų kiekį paleidžiant VDV, esant reikalui atlieka avarinį jo stabdymą bei keičia ir riboja kitus parametrus, dėl kurių galėtų kilti bet koks pavojus VDV ar pačiam lokomotyvui.

VDV būseną stebi variklio stebėjimo blokas (angl. EMU – *Engine monitoring unit*), kuris atlieka ir pagalbinę saugos sistemos funkciją. Variklio stebėjimo blokas (toliau – EMU) surenka duomenis apie VDV ir jo parametrus ECU bloko. EMU realiuoju laiku gali pateikti duomenis apie:

- greičius;
- temperatūros ir slėgių įvestis;
- gedimus ir jų atsiradimo priežastis.

EMU tenka svarbus vaidmuo užtikrinant VDV patikimumą ir efektyvumą, taikant griežtus saugos reikalavimus. Lokomotyvuose ER20CF sumontuota įmonės „Railnova“ sukurtas nuotolinės diagnostikos įrenginys „Railster“, kuris renka ir archyvuoja duomenis iš EMU bei kitų informacinių lokomotyvo mazgų. Šis įrenginys yra pavaizduotas 16 pav.



16 pav. Nuotolinės diagnostikos įrenginys „Railster“

Ši sistema suteikia galimybę realiuoju laiku perduoti duomenis į „debesį“, leidžiant vartotojams greitai ir patogiai pasiekti duomenis, taip pat sužinoti apie galimus gedimus ar kitas technines problemas ir reaguoti į jas anksčiau laiko. Įrenginys „Railster“ nėra didelis, todėl montuojant nereikalauja papildomų modifikacijų lokomotyve. Įrenginio matmenys yra 205 mm x 190 mm x 58 mm, o korpusas atitinka IP65 standartą. Įrenginys paprastai tvirtinamas prie sienos arba po mašinisto pultu. „Railster“ yra sumontuotas lokomotyvo A kabinoje mašinisto pulto konsolėje. Montavimo vieta yra pavaizduota 17 pav.

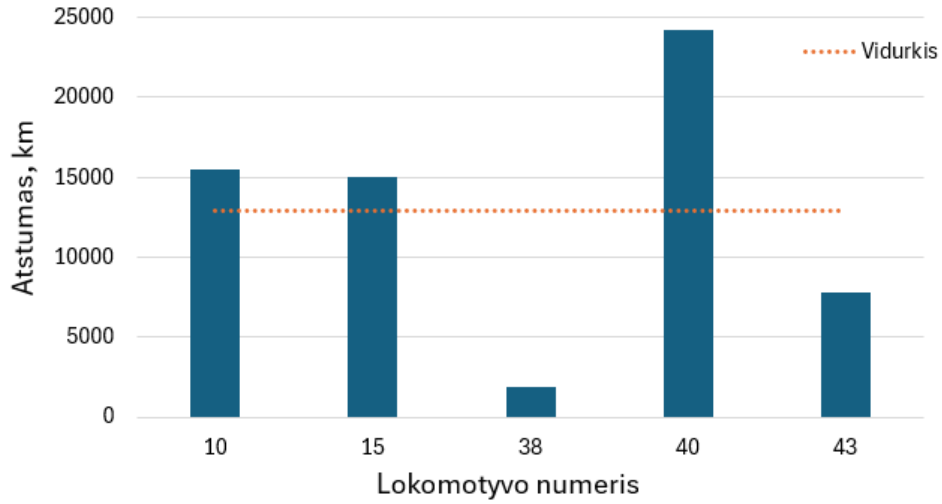


17 pav. „Railster“ montavimo vieta

„Railster“ palaiko universalius įvesties ir išvesties prievadus (UIP), kurie palaiko RS485, RS232 ir CAN režimus, bei yra konfigūruojami naudojant programinę įrangą. Šis nuotolinio stebėjimo įrenginys pritaikytas rinkti duomenis iš riedmenų sistemų realiuoju laiku ir siųsti juos į debesį, todėl palaiko 2G/3G ryšio tinklus duomenų perdavimui ir naudoja šifruotą transporto lygmens saugos (toliau – TLS) ryšį. TLS protokolas užtikrina siunčiamų duomenų saugumą sukurdamas saugų ryšį, per kurį duomenys gali būti perduodami kitiems vartotojams. Taip pat „Railster“ turi integruotą globalinės padėties sistemos (toliau – GPS) imtuvą su nuolatine 3V įtampa silpnų bangų stiprintuvo (angl. LNA – *Low Noise Amplifier*) maitinimui, užtikrinant aukštesnį radijo dažnio jautrumą. GPS antena paprastai montuojama mašinisto kabinoje arčiau priekinio stiklo. Įranga gali būti maitinama iš bet kokio standartinio įtampos šaltinio, kuris atitinka EN50155 standartą. Įrenginys turi vidinę įkraunamą bateriją, kuri užtikrina iki 7 dienų autonominį darbą. Baterijos tarnavimo laikas iki 3000 ciklų. Vidinė baterija leidžia įrenginiui veikti net ir esant išjungtam.

3.2 Lokomotyvų eksploatacijos apžvalga ir energijos sąnaudų tyrimas

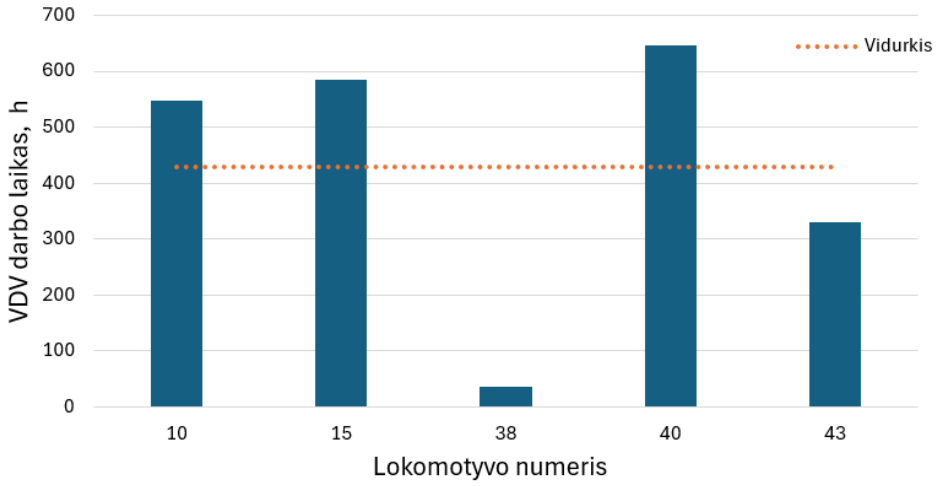
Pagrindinis eksploatacijos parametras, tiesiogiai susijęs su lokomotyvų ekonomine nauda yra pervežtų krovinių kiekis. Krovinių kiekį beveik tiesiogiai galima sulyginti su įveikiamu atstumu, nes magistraliniai lokomotyvai tuščiąja rida nevažinėja. Tuščioji rida nusako eksploatacijos tipą, kuriuo TP neatlieka naudingo darbo. Tyrimo metu lokomotyvų nuvažiuotas atstumas yra pavaizduotas 18 pav.



18 pav. Lokomotyvų nuvažiuotas atstumas

18 pav. diagramoje pavaizduoti visi stebimi lokomotyvai ir jų įveikti atstumai. Galima matyti, jog atskirtis tarp mažiausio ir didžiausio įveikto atstumo per visą laikotarpį yra didelė. Mažiausiai nuvažiavo 38 lokomotyvas – 1841 km. Didžiausią atstumą įveikė 40 lokomotyvas, kuris nuvažiavo virš 24000 km. Tai galima paaiškinti tuo, jog „LTG Cargo“ yra sumažėjęs krovinių pervežimas ir lokomotyvai dėl esamos planinės techninės priežiūros sistemos periodiškai atlieka remontus, kurie lemia lokomotyvo prastovą. Atotrūkį tarp mažiausiai ir daugiausiai atstumo įveikusių lokomotyvų taikliai atspindi vidutinis įveiktas atstumas – 12878 km.

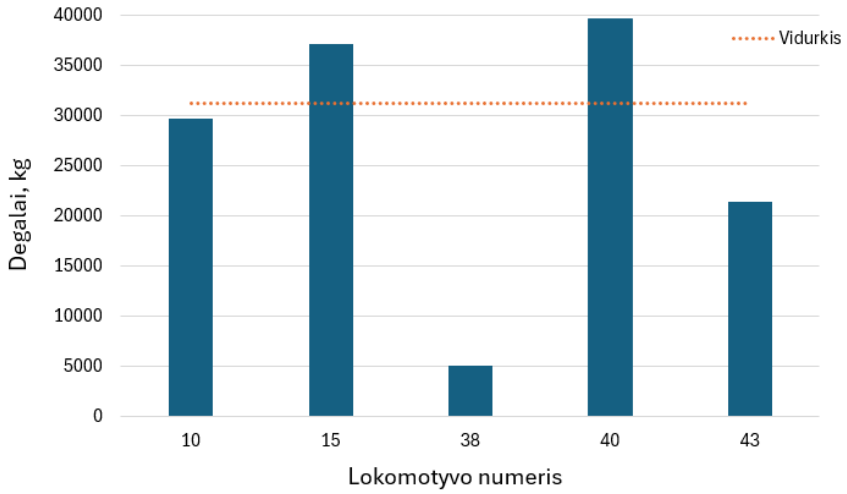
Lietuvos geležinkelių infrastruktūroje prekinių lokomotyvų įveiktas atstumas nėra tiesiogiai proporcingas išdirbtoms moto valandoms. Išdirbtų moto valandų skaičius tyrimo metu yra pavaizduotas 19 pav.



19 pav. Lokomotyvų išdirbtos valandos

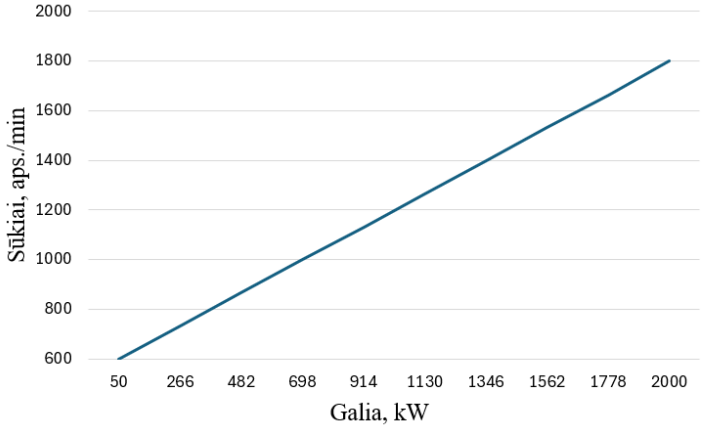
Akivaizdžių skirtumų su labai didelę atskirtį turinčiomis vertėmis užfiksuoti yra sunku, tačiau galima pastebėti, jog lokomotyvai 10 ir 15 susikeitė vietomis lyginant su 18 pav. pateikta

diagrama. Iš prieš tai pateiktų grafikų galima teigti, jog 15 lokomotyvas per tyrimo laikotarpį atliko mažiau efektyvaus darbo, nes jo vidutinis greitis yra mažesnis, o tai gali reikšti, kad su juo buvo atliekama daugiau stabdymo ir greitėjimo arba darbo tuščiąja eiga. Vidutinė ER20CF darbo vertė per tyrimo laikotarpį siekė 429 h. Tai reiškia, kad pagrindinis „LTG Cargo“ riedmuo per dieną pradirba 7,15 h. Iš šių parametrų tiksliai vertinti energijos sąnaudų efektyvumą galima tik preliminariai. Darbo režimus taip pat atvaizduoja ir degalų sąnaudos per visą tyrimo laikotarpį. Jos yra pavaizduotos 20 pav.



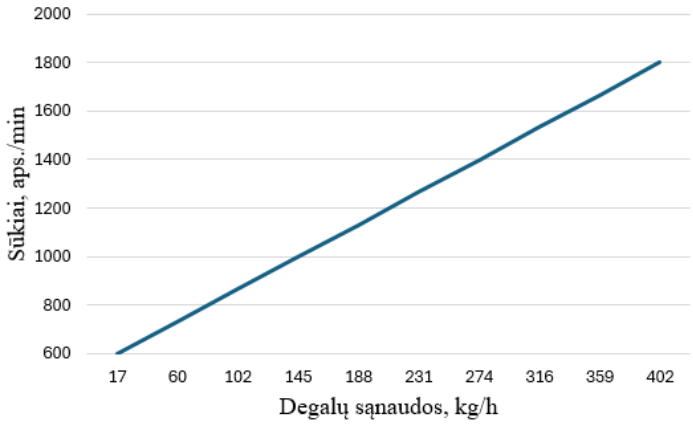
20 pav. Lokomotyvų degalų sąnaudos

Suminės degalų sąnaudos tyrimo metu svyruoja nuo 5 t iki beveik 40 t. Vidutinis 31,3 t suvartojimas parodo, jog atskirtis tarp skirtingų lokomotyvų mažėja. Tai galima paaiškinti pagal 21 ir 22 pav. pateiktus grafikus.



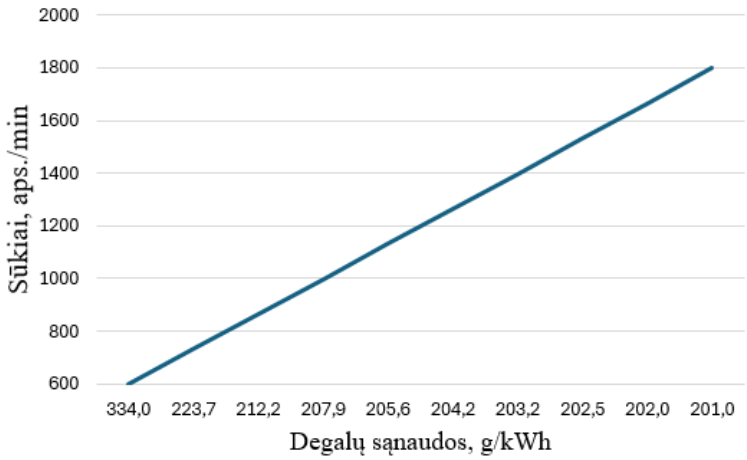
21 pav. ER20CF galios priklausomybė nuo sūkių

Kaip pavaizduota 21 pav., ER20CF variklio apkrovos ir sūkių reguliavimas yra tiesiogiai proporcingas. Variklis minimalia 50 kW apkrova gali būti apkraunamas nuo laisvų sūkių – 600 aps./min. Maksimalia apkrova – 2000 kW variklis gali būti apkrautas tik esant maksimaliems sūkiams – 1800 aps./min. Realiomis sąlygomis šių parametrų santykis gali svyruoti iki 5 %.



22 pav. Momentinės degalų sąnaudos

Degalų sąnaudos yra tiesiogiai priklausomos nuo variklio sūkių, nes, kaip ir minėta prieš tai, variklio sūkiai didėja tolygiai su apkrova. Didėjant apkrovai, didėja variklio galios poreikis. Lokomotyvo VDV valdymo algoritmas tiesiogiai didina variklio sūkius ir galią, kai gaunama apkrova iš generatoriaus, kuris patiria didesnį krūvį dėl ETV reikalingos didesnės srovės generuoti traukai. Didinant variklio sūkius proporcingai didėja ir momentinės degalų sąnaudos. Laisvais sūkiais be apkrovos arba su minimalia apkrova iki 50 kW, ER20CF variklis savo darbinėje būsenoje naudoja 18±2 kg/h dyzelino. Prie maksimalių sūkių, degalų sąnaudos siekia 402±20 kg/h. Momentinės degalų sąnaudos neparodo šilumvežio efektyvumo darbo metu. Traukos metu sąnaudas reikia vertinti išraiška, kuri parodo sąnaudų ir generuojamos galios santykį. Šios išraiškos grafikas yra pavaizduotas 23 pav.



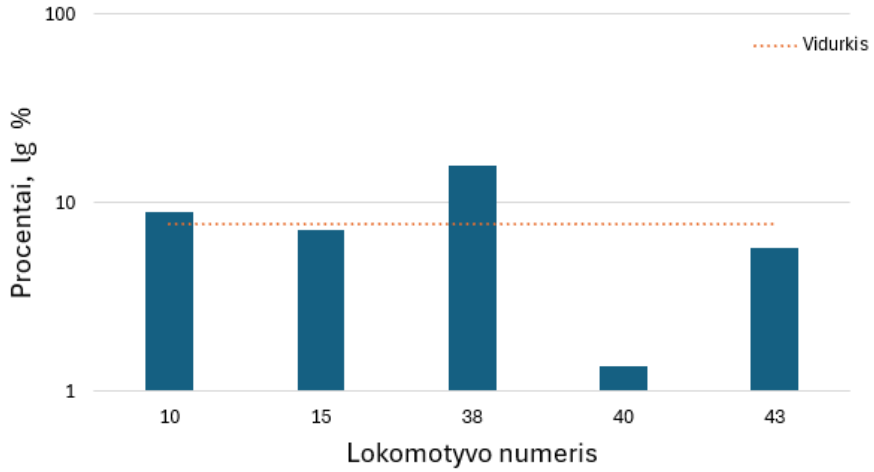
23 pav. Santykinės degalų sąnaudos

Grafike pavaizduotos sąnaudos parodo koks degalų kiekis reikalingas vieno kilovato galiai pasiekti per vieną valandą. Galima matyti, jog didėjant galiai ir variklio sūkiams, šios sąnaudos mažėja. Tai reiškia, kad efektyviausias degalų vartojimas yra gaunamas atliekant maksimalų darbą. Prie minimalių sūkių ir apkrovos šios sąnaudos siekia 334 g/kWh, o prie maksimalių 201 g/kWh. Šie skaičiai yra gaunami tokie, nes degalų sąnaudos nedidėja tiek kartų, kiek didėja galios

išeiga. Šie pateikti skaičiai yra gauti iš atliktų bandymų po dalinio variklio remonto. Tikėtina, jog jų vertės eksploatuojant lokomotyvą gali prastėti, o tai reiškia, kad tik didėja nereikalingos degalų sąnaudos ir tarša.

3.3 ER20CF darbo traukos režimu ir tuščiąja eiga analizė

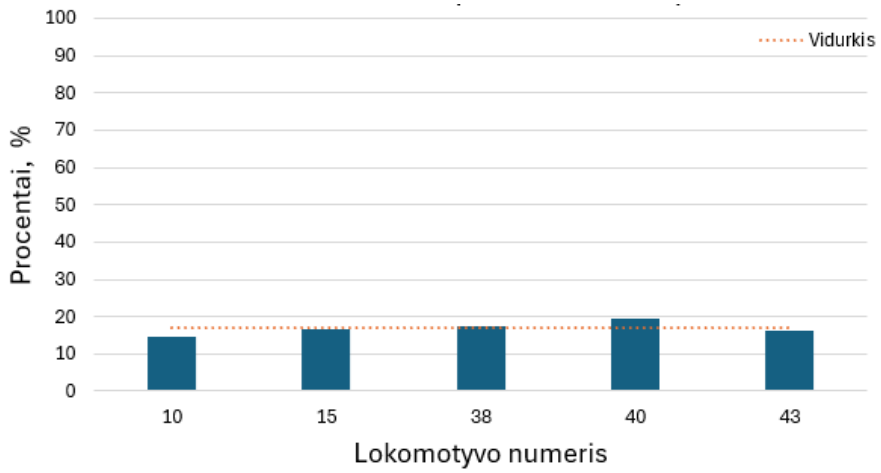
Siekiant įvertinti visų stebėtų lokomotyvų darbo režimus ir išanalizuoti kokie energijos nuostoliai yra patiriami dėl neefektyvaus energijos suvartojimo, reikia apsibrėžti ribas, į kurias jie bus išskirstyti. Pagrindiniai darbo režimai sąnaudų efektyvumo vertinimui yra darbo režimas traukos metu ir tuščiąja eiga. Analizuojant lokomotyvų darbo režimus svarbu įvertinti, kokiais traukos režimais iš viso jie dirba. Tyrime gauti duomenys taip pat suskirstyti į papildomus keturis darbo režimus. Pirmasis režimas yra šiek tiek panašus į tuščiosios eigos darbo režimą, nes jis nurodo, kiek viso lokomotyvų darbo laiko užima darbas iki 650 aps./min, tačiau visi keturi režimai vertina lokomotyvo darbą, kai jis atlieka bent minimalią trauką. Pirmasis traukos režimas yra pavaizduotas 24 pav.



24 pav. Lokomotyvų darbo laikas pirmuoju traukos režimu

24 pav. grafike matyti, kad pirmuoju darbo režimu visi lokomotyvai vidutiniškai veikia 7,8 % viso traukos darbo laiko. Kuo didesnė vertė šiuo režimu, tuo daugiau lokomotyvas manevruoja stotyse ar depuose be krovinio. Labai mažą atstumą įveikęs 38 lokomotyvas pirmuoju režimu dirbo daugiausiai – 15,6 % viso darbo laiko, nes beveik neatliko kelionių su kroviniais, o tiesiog važinėjo depų teritorijose dėl gedimų. Tuo tarpu, daugiausiai ir efektyviausiai dirbęs 40 lokomotyvas manevravo be didelės apkrovos tik 1,4 % viso traukos darbo laiko. Iš to galima spręsti, jog šis šilumvežis daugiausia važiavo su pakrautais sąstatais.

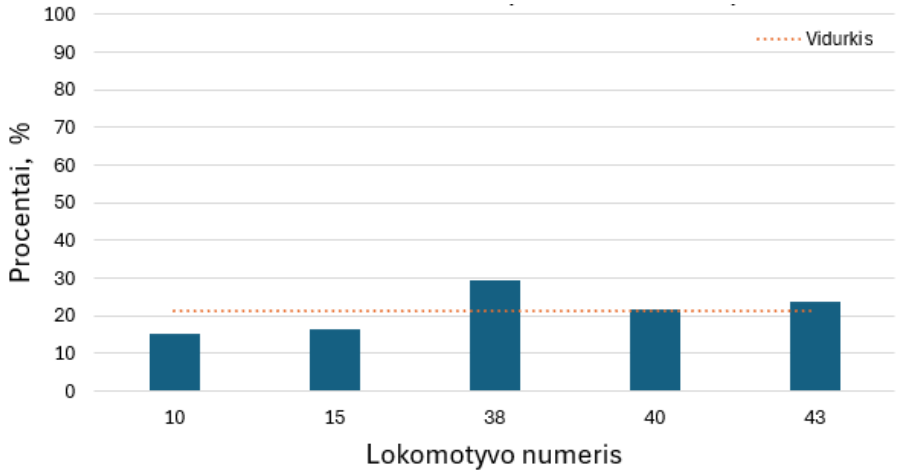
Antrasis traukos režimas nurodo, kiek procentų nuo viso traukos darbo laiko lokomotyvai dirbo 650 aps./min -1000 aps./min intervale. Šis grafikas yra pateiktas 25 pav.



25 pav. Lokomotyvų darbo laikas antruoju traukos režimu

Šiame sūkių intervale lokomotyvai dirbo 16,9 % viso traukos darbo laiko. Šiuo režimu daugiausiai atsispindi mašinistų profesionalumas ir tai, kaip jie sugeba išnaudoti sąstato inerciją. Grafike galima matyti, jog visų lokomotyvų vertės yra labai panašios, todėl galima teigti, jog mašinistai valdo lokomotyvus profesionaliai.

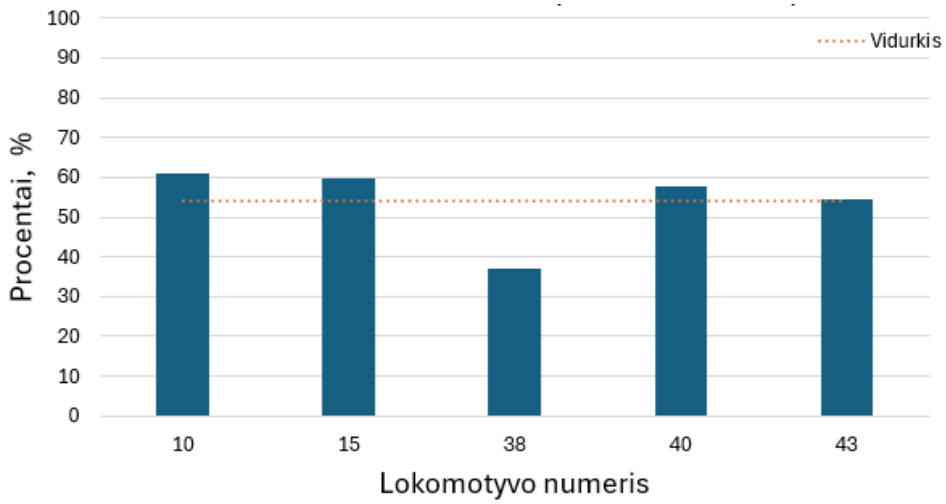
Trečiasis traukos režimas nurodo, kiek procentų nuo viso traukos darbo laiko lokomotyvai dirbo 1000 aps./min - 1400 aps./min intervale. Šis grafikas yra pateiktas 26 pav.



26 pav. Lokomotyvų darbo laikas trečiuoju traukos režimu

Šis režimas naudojamas, kai lokomotyvas veža vidutinį krovinį arba dirba kalvotame reljefe. Šiame sūkių diapazone lokomotyvai išvysto pakankamą galią greitėjimui arba greičiui palaikyti patiriant vidutinę apkrovą. Dažnu atveju, tai yra maksimali galia, kurios prireikia ER20CF atliekant keleivinius ar nedidelio svorio reisus. Vidutinis traukos darbo laikas šiuo režimu yra 21,3 %. Išskirti galima tik 38 lokomotyvą, kuris dirbo mažiausiai ir turėjo lengviausius sąstatus, jo traukos darbo laikas trečiuoju režimu siekė 29,6 % viso traukos darbo laiko.

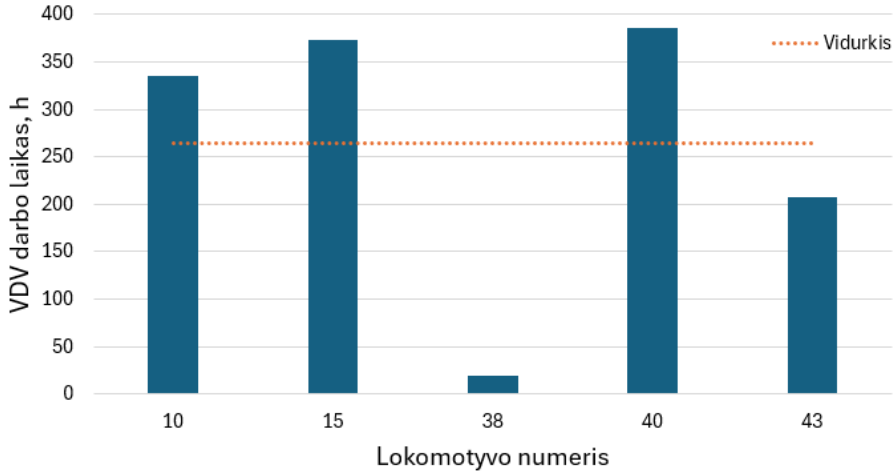
Ketvirtasis traukos režimas nurodo, kiek procentų nuo viso traukos darbo laiko lokomotyvai dirbo maksimaliame sūkių diapazone – 1400 aps./min - 1800 aps. Šis grafikas yra pateiktas 27 pav.



27 pav. Lokomotyvų darbo laikas ketvirtuoju traukos režimu

Šis režimas naudojamas, kai lokomotyvas traukia sunkų krovinį arba dirba itin sudėtingomis sąlygomis – stačios įkalnės, didelės varžos kreivėse. Vidutiniškai šiuo režimu lokomotyvai dirba šiek tiek daugiau nei pusę viso savo traukos laiko – 54 %. Nors atrodytų, jog aukštais sūkiais ir didelėmis apkrovomis lokomotyvui dirbti nėra gerai, bet tik taip išgaunamas maksimalus jo efektyvumas pervežant kiek įmanoma didesnius krovinius.

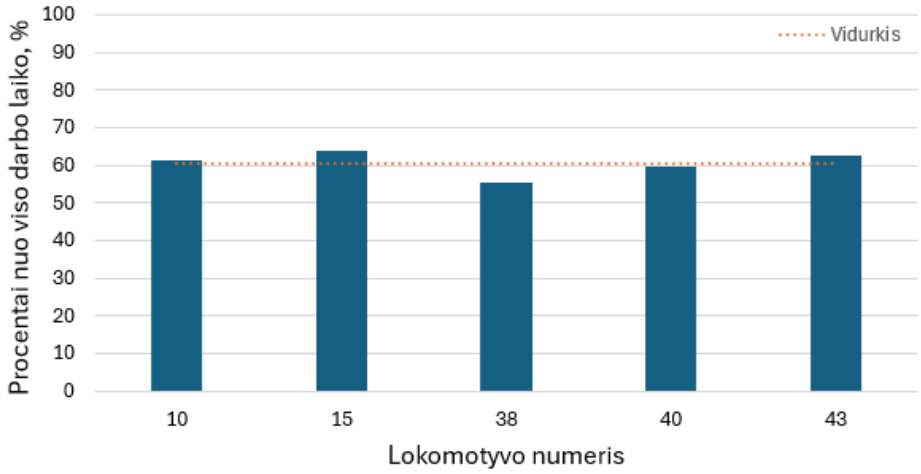
Mažinant energijos sąnaudas, yra svarbu įvertinti, kas yra didžiausias neefektyvaus degalų suvartojimo šaltinis. Tai dažniausiai yra VDV darbas tuščiąja eiga. Lokomotyvų darbo laikas tuščiąja eiga yra pavaizduota 28 pav.



28 pav. Lokomotyvų darbo laikas tuščiąja eiga

Šiame grafike pateiktos tuščiosios eigos darbo laikas buvo vertinamas, kai lokomotyvo VDV sūkiai buvo ne aukštesni nei 1000 aps./min ir VDV nepatyrė jokios apkrovos – neatliko

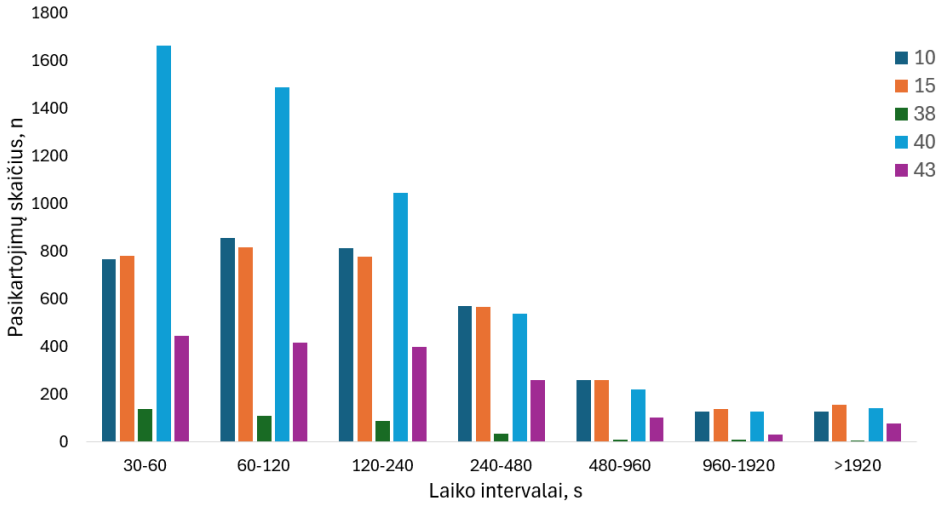
jokio naudingo darbo. Sūkiai parinkti didesni, nei automatiškai lokomotyvo nustatytos laisvosios apsukos, nes atliekant tyrimą duomenų nuskaitymas galėjo įvykti tada, kai sūkiai buvo mažinami iki minimalių atjungiant trauką. Per tyrimo laikotarpį visi lokomotyvai vidutiniškai tuščiąja eiga dirbo 264,4 h. Palyginimas, kaip šis laikas atrodo įvertinus pagal visas darbo valandas yra pateiktas 29 pav.



29 pav. Lokomotyvų darbo laikas tuščiąja eiga procentais

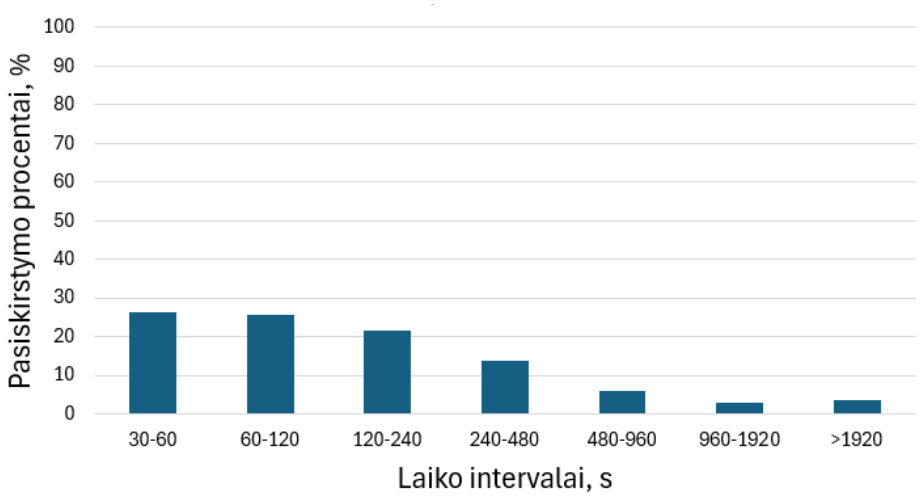
Šiame grafike labai aiškiai matoma tendencija, nes atsižvelgiant į tai, jog visi lokomotyvai aiškiu skirtumu atsiskyrė darbo valandomis, sunaudotu degalų kiekiu ir nuvažiuotu atstumu, jų tuščiosios eigos darbo procentas išliko labai panašus. Didžiausia atskirtis yra 8,6 % tarp 15 ir 38 lokomotyvų. Vidutiniškai visų lokomotyvų darbas tuščiąja eiga sudaro 61,5 %. Tai yra labai didelis procentas atsižvelgiant į tai, jog ER20CF yra magistralinis lokomotyvas. Svarbu paminėti, kad 28, 29 pav. grafikuose nėra vertinami kiti parametrai, tokie kaip temperatūros, greičiai ir kt. kurie gali parodyti visiškai nereikalingą variklio tuščiąją eigą. Iš kitos pusės, kitose šalyse magistralinių lokomotyvų tokios pat tuščiosios eigos skaičiai yra ženkliai mažesni. Tai galima paaiškinti tuo, jog Lietuvoje nemaža dalis pagrindinių geležinkelio kelių yra vienkeliai, kuriuose keleiviniai traukiniai turi pirmumo teisę.

Norint sumažinti energijos sąnaudas naudojant SPS, svarbu įvertinti pagrindinį parametrą, kurį ši sistema optimizuoja – tuščiąją eigą. Žinoma, kiek laiko valandomis ir koks procentas nuo viso darbo laiko lokomotyvuose yra praleidžiamas tuščiąja eiga, tačiau taip pat svarbu yra laiko intervalas, kurį lokomotyvas praleidžia tuščiosios eigos būsenoje. Šis grafikas yra pavaizduotas 30 pav.



30 pav. Lokomotyvų darbo tuščiąja eiga pasikartojimai laiko intervaluose

Šiame grafike yra pavaizduota kiek kartų per visą tyrimo laikotarpį lokomotyvai dirbo tuščiąja eiga. Taip pat, pasikartojimai yra suskirstyti į laiko grupes, nevertinant trumpiausios grupės – < 30s. Galima pastebėti, jog pirmuosiuose trijuose laiko intervaluose tendencija išlieka tokia pati, tiesiog jos dydis priklauso nuo paties lokomotyvo darbo laiko. Paskutiniuose keturiuose laiko intervaluose matomas išsiskyrimas pagal lokomotyvus. Tai galima paaiškinti dėl skirtingo lokomotyvų darbo pobūdžio. Mokslinėje literatūroje minima, jog suveikus SPS nauda mažo tūrio VDV gaunama nuo vidutiniškai 15 s, o didesniems, priklausomai nuo papildomų aplinkybių, bet dažnu atveju po trumpesnio laiko. Tyrimo metu lokomotyvai tuščiąja eiga kiekviename laiko intervale vidutiniškai dirbo: 756 kartus 30 s - 60 s intervale; 737 kartus 60 s -120 s intervale; 623 kartus 120s – 240 s intervale; 394 kartus 240 s - 480 s intervale; 170 kartų 480 s - 960 s intervale; 86 kartus 690 s - 1920 s intervale ir 103 kartus, kuomet darbas tuščiąja eiga truko ilgiau nei 1920 s. Visų pasikartojimų skirtinguose laiko intervaluose procentinė išraiška yra pavaizduota 31 pav.



31 pav. Lokomotyvų darbo tuščiąja eiga pasiskirstymas laiko intervaluose

Pagal 31 pav. pateiktą grafiką, daugiausiai tuščiąja eiga lokomotyvai užtrunka pirmajame laiko intervale, bet nedideliu skirtumu mažesni antrasis ir trečiasis laiko intervalai suteikia tvirtą pagrindą stengiantis optimizuoti dideles nereikalingas energijos sąnaudas. Tikėtina, jog vertinant papildomus parametrus dėl nereikalingos tuščiosios eigos, prieš tai pateiktų grafikų vertės, susijusios su tuščiąja eiga, taps nebe tokios didelės, bet atlikus tyrimą pirminis tuščiosios eigos sąnaudų rodiklis yra pažymėtinai aukštas.

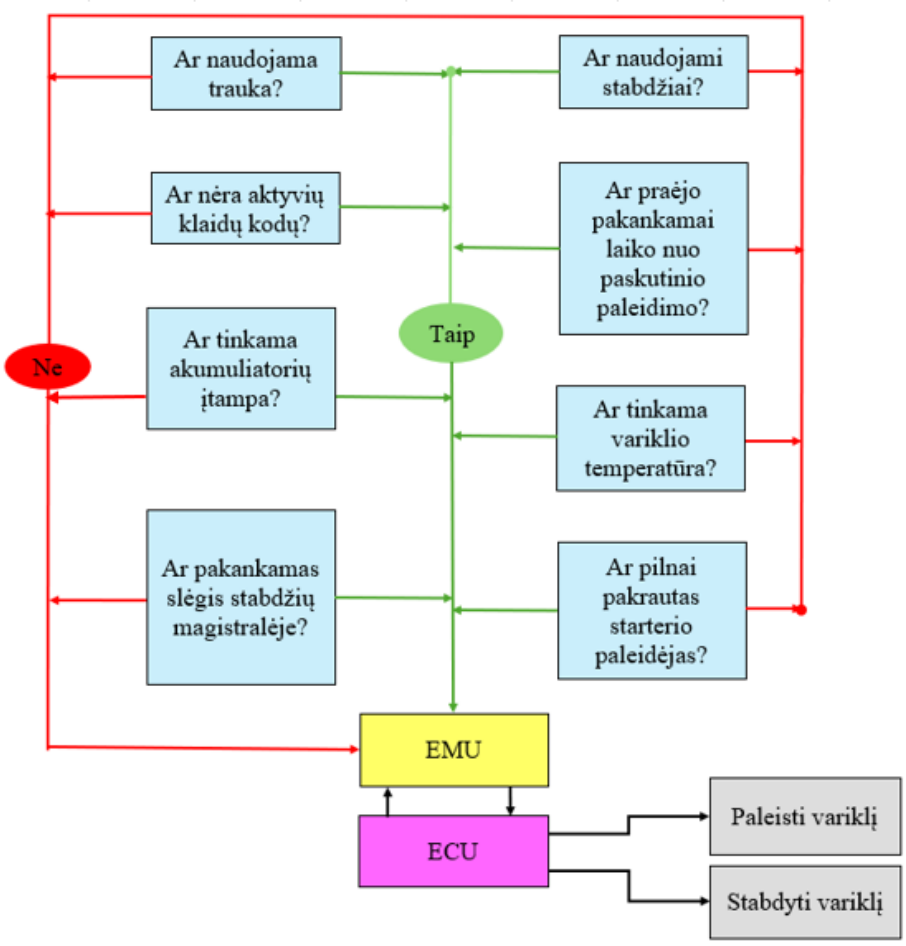
3.4 Trečiojo skyriaus išvados

1. Lokomotyvo ER20CF darbo režimų ir energijos sąnaudų analizė parodo, kaip skirtingi traukos režimai lemia degalų sąnaudas ir bendrą efektyvumą. Analizuojant nuvažiuotą atstumą, važiavimo trukmę bei variklio darbą skirtingais apsukų, nustatyta, kad mažiausios degalų sąnaudos buvo pasiektos esant žemų sūkių režimui, kuris dažniausiai atitinka tuščiosios eigos arba mažos apkrovos sąlygas. Vidutinių sūkių intervalai užtikrina gerą balansą tarp energijos sąnaudų ir lokomotyvo galios, tinkantį vidutinio intensyvumo darbui. Aukščiausi sūkiai pasižymėjo didžiausiomis degalų sąnaudomis, tačiau buvo būtini esant maksimalioms apkrovoms ir stabiliam važiavimui.
2. Pagal šiame skyriuje pateiktus grafikus yra aiškiai matoma tendencija, jog lokomotyvams dirbant skirtingą valandų kiekį ir įveikiant skirtingus atstumus, jų darbo režimų procentinės reikšmės skiriasi nedaug arba nereikšmingai. Tai leidžia daryti prielaidą, jog iš tyrimo duomenų pateikti vidurkiai visiškai tinka visam „LTG Cargo“ ER20CF lokomotyvų parkui.
3. Optimalių energijos sąnaudų pasiekimas priklauso nuo darbo režimų pritaikymo prie specifinių eksploatacijos sąlygų, todėl siekiant sumažinti degalų sąnaudas ir didinti efektyvumą, svarbu kuo labiau vengti ilgalaikio darbo tuščiąja eiga, kai tai nėra būtina, ir išnaudoti žemesnių sūkių režimų efektyvumą, kai to yra pakankama saugiam judėjimui.

4. LOKOMOTYVO ER20CF AUTOMATINĖS DYZELINIO VARIKLIO STABDYMO – PALEIDIMO SISTEMOS MODELIAVIMAS

Automatinė vidaus degimo variklio stabdymo – paleidimo sistema yra viena iš modernių technologijų, skirtų sumažinti degalų sąnaudas ir emisijų kiekį, ypač transporto priemonėms dirbant tuščiosios eigos režimu. Tokios sistemos pagrindinis veikimo principas yra automatinis VDV sustabdymas, kai TP stovi, ir greitas jo paleidimas, kai TP valdytojas ketina tęsti važiavimą.

SPS naudą galima išgauti tik pritaikant ją kiekvienai TP invidualiai. Reikalinga įvertinti parametrus ir veiksnius, kurie turi tiesioginę įtaką TP efektyviam ir saugiam naudojimui tiek stabdant VDV – tiek jį paleidžiant. Taip pat svarbu užtikrinti, kad pati sistema veiktų sklandžiai, nesukeldama papildomo VDV ar pagalbinių agregatų nusidėvėjimo ar neigiamo poveikio TP dinamikai. Geležinkelių transportui šios sistemos jau yra pritaikytos, tačiau norint užtikrinti optimalų ir efektyvų SPS darbą ER20CF lokomotyvui, reikia atsižvelgti į parametrus, kurie nemažintų lokomotyvo darbo efektyvumo, nesukeltų geležinkelio eismo trikdžių ir nedarytų neigiamos įtakos lokomotyvo techninei būklei ir ilgaamžiškumui. Atsižvelgiant į tai, sudarytas sąrašas parametrų ir veiksnių, kuriuos reikia įvertinti, kad ER20CF būtų galima naudoti SPS. Iš parametrų sąrašo sudaryta ER20CF SPS algoritmo schema yra pavaizduota 32 pav.



32 pav. Lokomotyvo ER20CF SPS darbo algoritmas

Pateiktoje 32 pav. schemoje išdėstytos sąlygos, stebėjimo bei valdymo blokai, veiksmai, kurių visuma sudaro modeliuojamos SPS veikimo principą. Visos sąlygos sudaro grandinę, kurioje esant net ir vienai netinkamai vertei, SPS nesuveiks, t.y. nesustabdys VDV. Pirmiausia tikrinama ar lokomotyvas generuoja trauką ir ar atlieka stabdymą. Toliau vertinama, ar sistemoje nėra aktyvių bei istorinių diagnostikos klaidų kodų. Po to vertinama akumuliatorių įtampa, kuri yra būtina elektros įrangai. Taip pat patikrinamas stabdžių magistralės slėgis. Skirtingai nei daugumoje SPS, šiame modelyje taip pat vertinamas laikas, praėjęs nuo paskutinio VDV paleidimo. Ši sąlyga padeda išvengti per dažno VDV paleidimo, dėl kurio lokomotyvo komponentai dėvisi greičiau. VDV temperatūra turi būti įvertinta norint išvengti papildomų variklio apkrovų paleidimo metu dėl žemos temperatūros ir esant aukštai temperatūrai būtų užtikrinamas reikiamas aušinimo kiekis. Galiausiai patikrinama, ar starterio paleidimo kondensatorius yra visiškai įkrautas ir pasirengęs paleisti VDV. Svarbu pabrėžti, jog modeliuojamoje lokomotyvo SPS yra nevertinamas greitis. Greitis nevertinamas, nes sumodeliuotoje SPS lokomotyvo VDV galima sustabdyti ir judant, taip padidinant šios sistemos efektyvumą. Lietuvoje galiojančiuose geležinkelio riedmenų eksploatacijos įstatymuose nėra įvardyta, jog riedmens variklis privalo būti paleistas riedmeniui judant. Svarbu, kad riedmuo turėtų veikiančius stabdžius.

Šis algoritmas leidžia automatizuotai valdyti VDV stabdymą ir paleidimą remiantis realiojo laiko duomenimis, gautais iš lokomotyvo CAN magistralės bei informacinių blokų, taip užtikrinant efektyvų, saugų ir ekonomišką lokomotyvo eksploatavimą. Modeliuojamos SPS veikimo principas:

1. EMU blokas renka informaciją apie parametrų būklę. Visi parametrai turi atitikti iškeltas sąlygas tam, kad ECU galėtų gauti signalą apie tinkamus parametrus vykdyti užduotį. Jei nors vienas parametras yra netinkamas, EMU toliau renka duomenis realiuoju laiku ir neduoda jokios komandos ECU.
2. ECU teikia signalą EMU dėl VDV būsenos – variklis dirba arba variklis išjungtas.
3. ECU gavęs signalą, jog visos sąlygos atitinka reikalavimus ir variklis yra įjungtas, atlieka funkciją „Stabdyti variklį“. Jei variklis yra išjungtas ir parametrai nebeatitinka keliamų reikalavimų, lygiai taip pat ECU gavęs signalą, atlieka funkciją „Paleisti variklį“.

Norint užtikrinti SPS veikimą, reikia nustatyti aiškias kiekvieno parametro sąlygoms ribas, kurios leistų stabdyti ar priverstų vėl iš naujo paleisti VDV. Nustačius šias ribas, bus aiškiai matoma nereikalinga tuščioji eiga.

4.1 Traukos ir stabdžių parametrai

Tyrimo metu gauti parametrai yra pateikiami tiesioginiais SI sistemos vienetais, kurie duomenų šifravimo metu buvo padauginti iš vidinių duomenų magistralių koeficientų ir paversti skaitinėmis reikšmėmis, iš kurių kiekviena turi savo reikšmę. Trauką gali apibūdinti šie parametrai:

1. *Traction_effort* – tai parametras, nurodantis elektros traukos variklių generuojamą traukos ir stabdymo galią kiloniutonais [kN], padauginus iš vidinio koeficiento 15. Teigiama reikšmė reiškia, jog yra vykdoma trauka, o neigiama, kad yra vykdomas dinaminis stabdymas. Sistemos modeliavimo atžvilgiu, šio parametro reikšmė turi būti lygi 0, bet įvertinant duomenų nuokrypius, leidžiama vertė gali būti 0+0,01 kN.
2. *Engine_actual_torque_pct* – šis parametras nurodo, kiek procentų siekia VDV apkrova nuo maksimalios galios. Tai nėra tiesioginis traukos parametras, bet galima suprasti, jog VDV patiriant apkrovą, jis vykdo trauką. Vienintelė išimtis gali būti reostatiniai bandymai, kurie atliekami po VDV remonto, bet juose visada naudojama apkrova nuo 20 %, todėl šis parametras taip pat tinka traukos vertinimui. Šis parametras parodo neatliekamą trauką, kai jo vertė turi būti ne didesnė nei 2 %, nes žinant, jog VDV maksimali galia 2000 kW, 2 % yra tik 40 kW, su kuriais lokomotyvas neatlieka jokios traukos.

Stabdžiai yra kritiškai svarbūs saugumui visame transporto sektoriuje, tačiau geležinkelių transporto sektoriuje tai yra pats svarbiausias aspektas. Net ir nustojus veikti VDV, stabdžiai privalo veikti. ER20CF turi trijų tipų stabdžius:

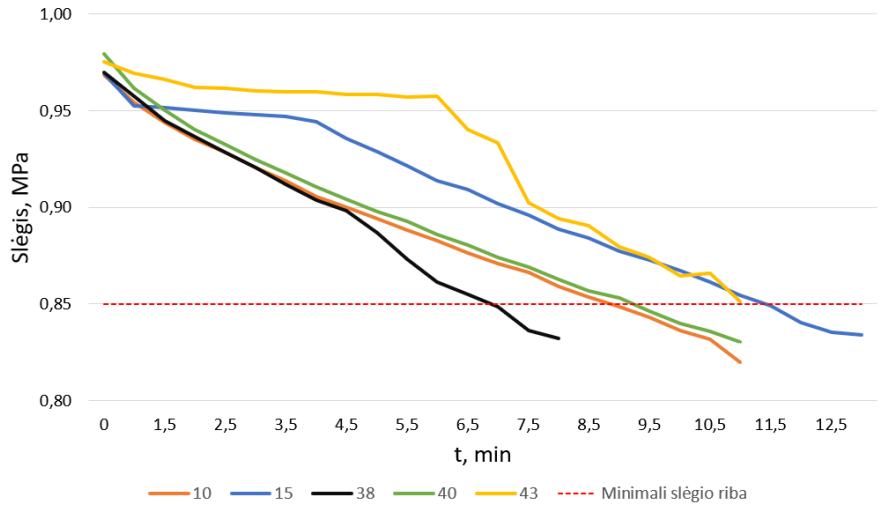
1. Pneumatinius, kurie veikia tik slėgio valdymo būdu. Šio tipo stabdžiai turi kelis pagrindinius komponentus: oro rezervuarus, kuriuose yra talpinamas suslėgtas oras atlikti stabymą, nuo kurių pildosi viso traukiamo sąstato oro rezervuarai; stabdžių magistralę, kuri veikia kaip stabdymo jėgos reguliatorius, nes nuleidžiant slėgį joje galima reguliuoti stabdymo jėgą, bet nuleidus slėgį stabdžių magistralėje ji suveikia kaip avarinis stabdys; stabdžių cilindrus, kurie veikiami slėgio, per svirtinę pavarą atlieka stabdymą prispaudžiant stabdžių kaladėles prie stabdžių disko. Šie stabdžiai yra naudojami traukiant krovininius sąstatus.
2. Elektrinius – pneumatinius, kurių stabdymo principas išlieka toks pat kaip ir pneumatinio, tik vietoje stabdžių magistralės slėgio, stabdžių valdymą atlieka elektrinis stabdžių valdymo blokas. Šie stabdžiai ER20CF yra naudojami traukiant keleivinius sąstatus.

3. Dinaminius, kurie stabdymo jėgą sukuria generuodami elektros energiją iš ETV ir ją paversdami šiluma. Energijai verčiama šiluma per stipriai ventiliuojamą varžyną, kad nebūtų perkaitimo, todėl šie stabdžiai negali būti naudojami veikiant SPS.

Norint kuo efektyviau panaudoti SPS, stabdžių panaudojimas esant sustabdytam VDV turi būti minimalizuotas, bet taip pat stabdžiai turi būti parengti bet kuriuo eksploatacijos metu. Todėl, norint tenkinti sistemos reikalavimą stabdžių panaudos parametrui, visi stabdžiai, išskyrus stovėjimo stabdį, negali būti naudojami. Stabdžių būseną apibūdinantys parametrai:

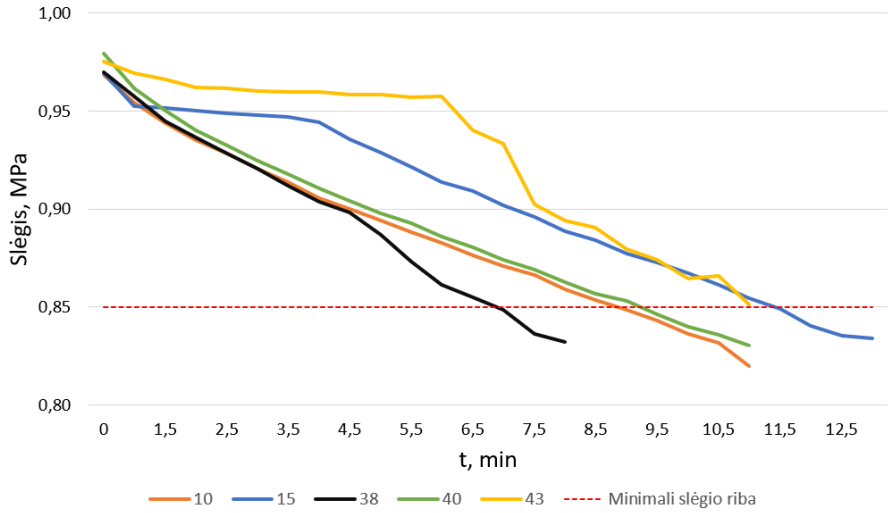
1. *Traction_effort* – prieš tai įvardytas parametras, kuris gali nurodyti tiek trauką, tiek stabdymą. Neigiama šio parametro reikšmė nurodo, kad yra vykdomas dinaminis stabdymas, bet šiuo atveju yra leidžiama kiek didesnė paklaida nei traukoje, nes dažnai, mažos neigiamos vertės šiame parametre gali reikšti tai, kad lokomotyvas riedėdamas sukuria didesnę trauką nei reikalinga ETV. Todėl, šio parametro reikšmė gali būti 0 - 0,02 kN.
2. *Air_brake_status* – tai yra pagrindinių stabdžių statuso parametras, pateiktas skaitinėmis reikšmėmis, kurio kiekvienas signalas turi savo reikšmę. Signalas 1 – užstabdyta, signalas 2 – atleista, signalas 3 – išjungta, signalas 4 – negalioja. Parametras tenkins algoritmo sąlygą, kai gaunamo signalo išvestis bus 2.
3. *Parking_brake_status* – stovėjimo stabdžio parametras. Stovėjimo stabdys veikia priešingai nei tiesioginis stabdys. Stovėjimo stabdžiui suveikus jis nebenaudoja oro, iki kol jis nėra atleidžiamas, todėl SPS veikimui šis parametras įtakos tiesiogiai nesudaro. Šis parametras taip pat pateikiamas skaitinėmis reikšmėmis kaip ir tiesioginis stabdys. Todėl, šio parametro leidžiami signalai sistemai yra 1 ir 2 (užstabdyta ir atleista). Esant išjungtam ar neveikiančiam bent vienam stabdžiui SPS veikti negali.

Patenkinus stabdžių sistemos sąlygas, SPS yra reikalinga matyti ir taip pat įvertinti stabdžių slėgį esantį rezervuaruose. Darbinio stabdžių slėgio lokomotyve diapazonas eksploatuojant yra nuo 0,85 MPa iki 1 MPa. Kritiškai žemas slėgio taškas yra 0,7 MPa, tačiau elektrinę pavarą turintis oro kompresorius pasileidžia kai slėgis nukrenta žemiau 0,85 MPa, todėl oro kompresoriaus įsijungimo riba yra žemiausias taškas, kuriame yra tenkinamas sistemos reikalavimas slėgiui. Slėgio kitimas lokomotyvo su sąstatu eksploatacijos metu yra pavaizduotas 33 pav.



33 pav. Stabdžių slėgio kitimas vamzdyne

Šiame grafike pavaizduotos geltoni ruožai, kuriuose yra atliekamas stabdymas, todėl galima aiškiai matyti staigų slėgio kritimą. Slėgiui pasiekus minimalią ribą, jis pradeda kilti ne iš karto, nes vagonų stabdžių slėgio darbinis diapazonas yra mažesnis nei lokomotyvo, todėl net ir kompresoriui pradėjus veikti, vagonams tenka didesnė dalis pripumpuojamo oro. Svarbu paryškinti, kad net ir neatliekant stabdymo, slėgis pastoviai krenta dėl sąstate esančio didelio kiekio vagonų, kurių stabdžių sistemos agregatų sandarumas dažnu atveju yra prastos būklės. Stabdžių slėgio kritimas vamzdyne neatliekant stabdymo yra pavaizduotas 34 pav.



34 pav. Stabdžių slėgio kritimas neatliekant stabdymo

Šiame grafike atvaizduoti atsitiktinai iš tyrimo laikotarpio parinkti stabdžių slėgio kritimai neatliekant stabdymo. Netolygus kritimas gali reikšti, jog sąstatas įveikinėjo kreives arba įkalnes, kuriose buvo judėjimas sukabinimo įtaise, o dėl prastos vagonų techninės būklės, judinant nesandarias stabdžių sistemos agregatų dalis, jų nuotėkis gali didėti arba mažėti. Laikas, per kurį slėgis nukrito nuo kompresoriaus atsijungimo ribos iki įsijungimo, svyravo nuo 7 min iki 11,5 min.

Šis skirtumas gali atsirasti daugiausia dėl sąstato dydžio ir jau prieš tai minėtų problemų. Vidutinis slėgio kritimas neatliekant stabdymo 13 kPa/min. Tenkinant sistemos sąlygas stabdymo ir traukos parametrams, nedirbant VDV, galima taupyti suslėgto oro atsargas stabdymui. Nors stabdžiai vis tiek veiktų, jų nenaudojant galima pailginti lokomotyvo su sustabdytu VDV veikimo laiką.

4.2 Diagnostikos klaidos kodų parametrai

Lokomotyvai, kaip ir visos šiuolaikinės transporto priemonės, turi vidinę diagnostikos sistemą, kuri aptikus tam tikrų parametrų neatitiktis skleidžia signalą į mašinisto panelę arba įrašo į vidinę atmintį. Norint užtikrinti, kad SPS lokomotyve veiktų sklandžiai ir saugiai, būtina užtikrinti, jog VDV valdymo sistemoje nebūtų jokių aktyvių klaidos kodų, nes dažnu atveju, klaidos kodai skleidžia ne tik informacinį signalą, bet ir apribojimų signalą, kuris gali mažinti lokomotyvo VDV galią, jo paleidimų skaičių ar ETV traukos galią. Modeliuojama sistema, atsakinga už VDV automatinį stabdymą ir paleidimą, todėl ji reikalauja nepriekaištingo pagrindinių komponentų veikimo, tokių kaip degalų tiekimo sistema, AKB, elektros grandinės ir VDV valdymo modulis. Aktyvūs klaidos kodai gali rodyti gedimus ar neatitikimus, kurie ne tik trukdo tinkamam sistemos veikimui, bet ir padidina eismo pavojaus riziką.

Klaidų kodai, kurie yra susiję su VDV ar elektros sistemų bei posistemių veikimu, gali apsunkinti ar net blokuoti paleidimą. Pavyzdžiui, jei yra problemų dėl degalų tiekimo sistemos, VDV veikti gali iš inercijos, nors ir tiekiamų degalų kiekis ar pavidalas nėra tinkamas. Žinoma, kad toks VDV darbas nebus naudingas, bet to turėtų užtekti pagalbiniams mazgams energijai aprūpinti. Jei yra elektros sistemos, AKB ar starterių gedimų, VDV sustabdžius, jo pakartotiniam paleidimui gali trūkti energijos, todėl pagrindinės klaidos, kurios realiomis sąlygomis apsunkina ar blokuoja VDV paleidimą, negali būti aktyvios ar net istorinės. Dažniausios pasikartojančios klaidos, kurios gali trukdyti VDV paleidimui, darbui ir modeliuojamos SPS veikimui, yra:

1. 092 – tai yra VDV nesėkmingo paleidimo klaida, kada nesuveikia automatinis dekompresinis vožtuvas. Ši klaida reiškia, jog VDV sūkiams pasiekus 80 aps./min, dekompresinis vožtuvas nepersijungia į kitą padėtį. Ši problema gali atsitikti dėl alkūninio veleno padėties daviklio gedimo arba nevisiškai įkrauto starterio paleidimo kondensatoriaus. VDV paleidimo procese dekompresinis vožtuvas leidžia lengviau įsukti alkūninį veleną, kol jis nėra veikiamas kompresijos.
2. 091 – tos pačios VDV paleidimo grupės klaida, tiesiog ji atsiranda, kai dekompresinis vožtuvas neišsijungia iš antrosios padėties dėl nepasiektų minimalių 300 aps./min sūkių. Pasiekus 300 aps./min ir dekompresiniui vožtuvui atsijungus, lokomotyvo VDV yra sukamas su visa kompresija. Šios klaidos tiesiogiai blokuoja starterių darbą, todėl esant bent vienai iš šių klaidų, sistemos keliami reikalavimai nebus tenkinami.

3. 301/316 – netinkamas tam tikro degalų purkštuko įpurškimo kampas. Esant šiai klaidai, VDV darbas tampa nestabilus, o pakartotinis jo užvedimas gali būti ir kenksmingas pačiam VDV.
4. 391 – per aukšta arba per žema išmetamųjų dujų temperatūra cilindre. Ši klaida nurodo, jog vyksta netinkamas degimo procesas kažkuriame cilindre. Esant šiai klaidai, VDV darbas taip pat tampa nestabilus, nes dozuojamas netinkamas degalų kiekis įpurškimo metu. Eksploatuojant lokomotyvą su šiuo klaidos kodu kyla pavojus ne tik nebepaleisti VDV, bet ir sugadinti jį bei jo išorinius mazgus.

EMU blokui stebėsenos metu aptikus aktyvius ar istorinius šiuos klaidų kodus SPS neveiks, kol šie kodai nebus pašalinti, o gedimai – sutvarkyti.

4.3 Variklio paleidimo energijos sąnaudų įvertinimas

Automatinės variklio stabdymo – paleidimo sistemos pagrindinė užduotis yra mažinti nereikalingas energijos sąnaudas, taip sumažinant be reikalo sunaudojamų degalų kiekį ir taršą. Siekiant patikrinti sistemos teorinį efektyvumą, svarbu žinoti koks degalų kiekis yra sunaudojamas VDV paleidimui bei jo darbo stabilizavimuisi. Pavyzdžiui, jei VDV paleidimui ir jo darbo stabilizavimuisi sunaudojamas ženkliai didesnis degalų kiekis, nei jam dirbant tuščiąja eiga, jo pakartotinas paleidimas bus efektyvus tik tada, jei jis nedirbdamas praleis ilgą laiką. Siekiant tiksliau įvertinti ER20CF VDV paleidimui reikalingą degalų kiekį, iš tyrimo metu gautų duomenų išrinktas lokomotyvo VDV paleidimas ir *Power BI* platformoje laiko intervalas su kitais parametrais išskaidytas kas 1 s. Parinktas lokomotyvo paleidimas šaltame stovyje, kai aušinimo skysčio temperatūra siekė 30°C, nes šiuo metu nėra naudojamos SPS, todėl lokomotyvų varikliai per pamainą pradėję darbą yra beveik nestabdomi, todėl retai kada atvėsta iki tokios temperatūros.

Žinant momentines degalų sąnaudas litrais per valandą ir laiko trukmę kurią lokomotyvas praleidžia naudodamas šias sąnaudas, galima apskaičiuoti tikslų kiekį degalų, reikalingą paleisti lokomotyvo VDV. Tam yra naudojama formulė:

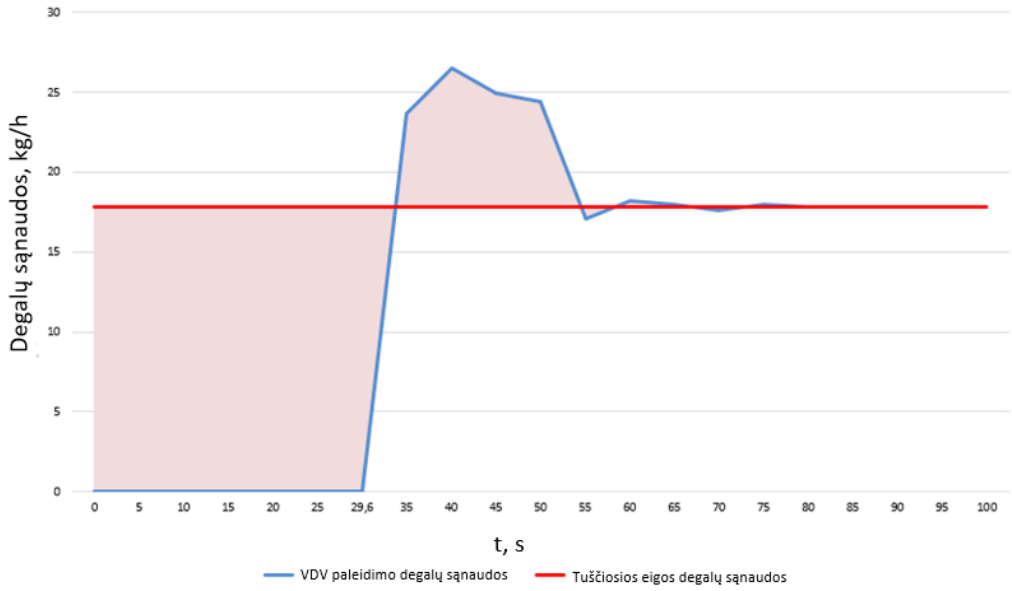
$$\sum_{i=1}^{n-1} C(t_i) \cdot (t_{i+1} - t_i)\,; \tag{4.3}$$

čia: t_i – laiko momentas;

$C(t_i)$ – momentinės degalų sąnaudos t_i momentu.

Atlikus skaičiavimą gauta, jog lokomotyvas sunaudoja 0,15625 kg degalų per 23 s, kol VDV pasileidžia ir stabilizuojasi. Šis skaičiavimas atliktas, kai lauko temperatūra buvo 8 °C. Žinant degalų kiekį, kurio reikia VDV paleidimui ir darbui tuščiąja eiga, galima apskaičiuoti po kiek laiko sustabdžius variklį, jau yra taupomi degalai. VDV dirbant tuščiąja eiga, vidutinės degalų sąnaudos

yra 18 kg/h. Tai nėra didelis vidutinių degalų sąnaudų skirtumas lyginant su paleidimui reikalingu degalų kiekiu, todėl VDV pradirbus 29,6 s tuščiąja eiga, jis sunaudoja tokį pat degalų kiekį kaip ir užvedant variklį. Todėl galima teigti, jog po 29,6 s su sustabdytu VDV, lokomotyvas ER20CF taupo degalus. Grafikas, kuriame pavaizduotos degalų sąnaudos paleidžiant VDV yra pavaizduotas 35 pav.



35 pav. Degalų sąnaudos VDV paleidimo metu

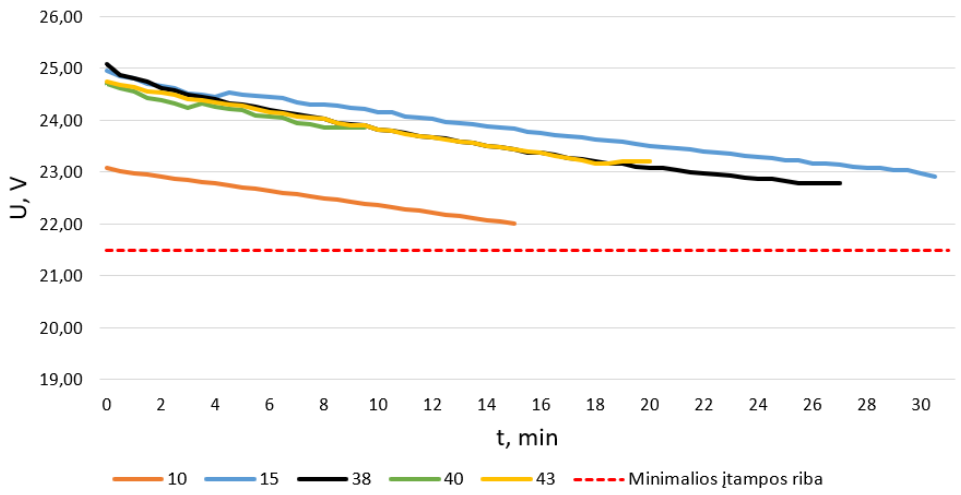
Šviesiai raudona spalva pažymėti plotai vaizduoja vienodas degalų sąnaudas tiek taupant jas sustabdytu VDV, tiek eikvojant paleidimo metu. Po 55 s matomas VDV darbo stabilizavimasis, kai visi cilindrai pradeda dirbti optimaliai. Šiame bandyme nėra vertinami elektros energijos nuostoliai, tokie kaip elektros energijos įkrovimas į pradinę būklę, nes VDV dirbdamas tuščiąja eiga patiria iki 50 kW apkrovą, kuri neturi įtakos degalų sąnaudoms. Taip pat, AKB bei starterių paleidimo kondensatorių įkrovimui reikalinga energija nėra vertinama, nes apkrova pagalbiniam generatoriui nesudaro nei 1 % VDV patiriamos apkrovos.

4.4 Starterio paleidimo kondensatoriaus ir akumuliatoriaus baterijų įkrovos lygis

Lokomotyvo ER20CF variklis, skirtingai nei daugumos kitų transporto priemonių, kurių VDV paleidžia pagrindinė AKB, yra paleidžiamas nuo atskiro kondensatoriaus (angl. UCAP – *Ultracapacitor module*). Šis kondensatorius (toliau – UCAP) yra naudojamas starterio sukimui. VDV dirbant UCAP įkrauna pagalbinis elektros generatorius, o sustabdytam VDV – pagrindinė AKB. Originaliai, gamykloje į ER20CF lokomotyvus buvo sumontuota ~450–500 F UCAP tam, kad lokomotyvą būtų galima bandyti užvesti bent 3 kartus vieną po kito, starterį sukant 4 s – 5 s intervalais, tačiau šiuo metu, lokomotyve sumontuota 250 F UCAP, kuri įsikrovusi iki 28–29 VDC

lokomotyvo starterį pasuka tik vieną kartą 4 - 5 s. Ši modifikacija buvo atlikta tam, kad UCAP greičiau įsikrautų ir duotų visiškos įkrovos signalą ECU, nes ER20CF paleidimui visiškai pakanka 2 s sukimo starteriu, o originalus UCAP kraudavosi gerokai ilgiau. Tačiau dėl kokios nors priežasties nepaleidus VDV ilgiau nei per 5 s, dabartinis UCAP išsikrauna ir mašinistui vėl reikia laukti apie 4 min, kol AKB įkrauna UCAP. Nors tai neatitinka pirminės ER20CF specifikacijos reikalavimų, ši modifikacija puikiai tinkama SPS naudojimui. Tyrimo duomenų pakete UCAP įkrovos signalas nėra gaunamas, tačiau žinant, kad kondensatorius yra įkraunamas per 4 min, jo visiško įkrovimo laikas pažymimas kaip 5 min. Tai reiškia, kad SPS galės VDV stabdyti ne anksčiau, kaip 5 min nuo paskutinio paleidimo.

VDV nedirbant visas elektroninio valdymo ir pagalbines komforto įrangas maitina pagrindinė AKB, kurią sudaro keturios 24 V 259 Ah akumuliatoriaus baterijos. Nominali šių baterijų srovė yra 160 A, o tai reiškia, kad jos gali palaikyti lokomotyvo elektrinę dalį apie 45 min. Norint, kad lokomotyvas funkcionuotų su nepaleistu VDV ir galėtų užtikrinti saugą eisme yra reikalingas pakankamas AKB įkrovimo lygis. Taip pat, papildomos komforto įrangos veikimas užtikrina tinkamą mašinisto darbo zonos aplinką. ER20CF gamintojo numatyta kritinė AKB įkrovos riba yra 21,5 V. Apdorojus tyrimo duomenis taip, kad būtų galima matyti AKB įtampos kritimą, kai VDV yra sustabdytas, bet lokomotyve yra įjungtos komforto sistemos, gautas grafikas, kuris yra pavaizduotas 36 pav.



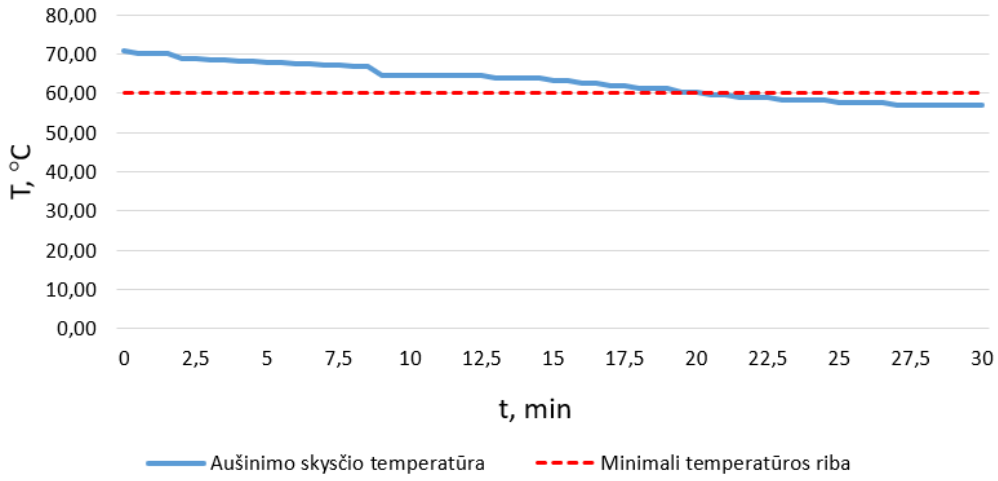
36 pav. AKB įtampos kritimas

Svarbu pažymėti, jog tyrimo duomenys buvo rinkti nuo 2024-02-01 iki 2024-04-01, kada vidutinė oro temperatūra Lietuvoje buvo atitinkamai 2,3 °C ir 4,2 °C. Tai reiškia, kad lokomotyvuose buvo naudojamos šildymo sistemos. 36 pav. pavaizduotame grafike visų lokomotyvų vertės yra parinktos atsitiktinai iš viso tyrimo laikotarpio. Grafikuose matoma, kad kritinės AKB įkrovos ribos nepasiekė nė vienas lokomotyvas, net ir po VDV sustabdymo. AKB kritimas svyravo nuo 0,065 V/min iki 0,071 V/min, todėl vidutinė vertė yra 0,068 V/min. Tai

reiškia, kad įprastomis sąlygomis įtampos kritimas laike priklauso tik nuo pradinio įkrovos lygio, o eksploatuojant lokomotyvą, po VDV sustabdymo vidutinė įkrovos riba dažniausiai nebūna žemesnė nei 24 V.

4.5 Aušinimo skysčio temperatūros apribojimas

Vidaus degimo variklių efektyvumas ir ilgaamžiškumas tiesiogiai priklauso nuo eksploatacijos metu pasiekiamos temperatūros. SU varikliams ypač svarbu, kad aušinimo skysčio temperatūra, nuo kurios priklauso variklio veikimas, būtų pasiekta iki reikiamos ribos. Aušinimo skysčio temperatūra daro tiesioginę įtaką VDV degimo procesui ir taršai. Terminas „darbinė temperatūra“ yra gamintojų nurodyta temperatūros riba, kurioje VDV gali dirbti efektyviausiai nekenkdamas ilgaamžiškumui. Nepasiekus šios temperatūros VDV naudoja daugiau degalų, išmeta didesnį kiekį teršalų ir atitinkamai dėvisi greičiau. Lokomotyvui ER20CF darbinę temperatūrą gamintojai yra nustatę nuo 80 °C iki 90 °C, tačiau dėl didelio aušinimo skysčio kiekio ir įvairių eksploatacijos sąlygų, riedmuo gali generuoti maksimalią trauką tik tada, kai aušinimo skystis pasiekia ne žemesnę nei 60 °C temperatūrą. Taip pat, siekiant padidinti lokomotyvo ilgaamžiškumą, VDV paleisti galima tik tada, kai aušinimo skystis yra pašildomas iki ne žemesnės nei 25 °C temperatūros. Norint efektyviai naudoti SPS, kiekvieną kartą automatiškai paleidus VDV, lokomotyvas privalo būti pasiruošęs bet kokiam darbo režimui, todėl aušinimo skysčio temperatūros parametras tenkinti algoritmui privalo būti ≥ 60 °C. Siekiant įvertinti lokomotyvo aušinimo skysčio temperatūros kritimą sustabdžius VDV, atsitiktiniu būdu iš tyrimo laikotarpio parinktas lokomotyvas ir jo aušinimo skysčio temperatūros kritimo grafikas yra pavaizduotas 37 pav.



37 pav. Aušinimo skysčio temperatūros kritimas

37 pav. grafike matomas temperatūros kritimas nuo VDV sustabdymo iki minimalios temperatūros ribos. Kritinę vertę savaime aušdamas lokomotyvas pasiekia per 19,5 min, kai lauko

temperatūra yra 7 °C. Temperatūros kritimo greitis yra 0,4 °C/min. Galima numatyti, jog šiltuoju metų laiku laikas, per kurį lokomotyvo aušinimo sistemos temperatūra pasieks minimalią ribą – pailgės.

4.6 Ketvirtojo skyriaus išvados

Įvertinus ER20CF lokomotyvo SPS algoritmo sąlygoms tenkinti reikalingus parametrus, nusistačius jų ribas pagal gamintojo nurodymus ir modeliuojamos SPS poreikį, sudaryta 4.6 lentelė, kurioje yra nurodytos teoriniam sistemos efektyvumui patikrinti reikalingos parametrų vertės.

4.1 lentelė. Modeliuojamos SPS algoritmo įvesties parametrai

Parametras	**Vertė**	**Mato vnt.**
Trauka	0+0,01	kN
Stabdžių slėgis magistralėje	0,85–1	MPa
Aušinimo skysčio temperatūra	≥60	°C
Akumuliatorių baterijos įtampa	>21,5	V
Laikas nuo paskutinio variklio paleidimo	≥5	min
Variklio sūkiai	≤650	aps./min
Rankinis stabdys	1 arba 2	-
Pagrindinis stabdys	2	-
Klaidos kodai	0	-

Lentelėje pateikti visi sumodeliuotos SPS algoritmo įvesties parametrai, kuriuos eksploatacijos metu turės atitikti lokomotyvas, kad sistema suveiktų, t.y. sustabdytų VDV. Įsivedus SPS sistemos veikimui reikalingus parametrus ir jų vertes apibrėžta nereikalinga tuščioji eiga. Pagal suformuotą algoritmo logiką VDV bus stabdomas tik tada, kai visi parametrai tenkins reikalavimus, o paleidžiamas tada, kai bent vienas parametras nebetenkins reikalavimų. Didžiausios projektuojamos sistemos kliūtys yra:

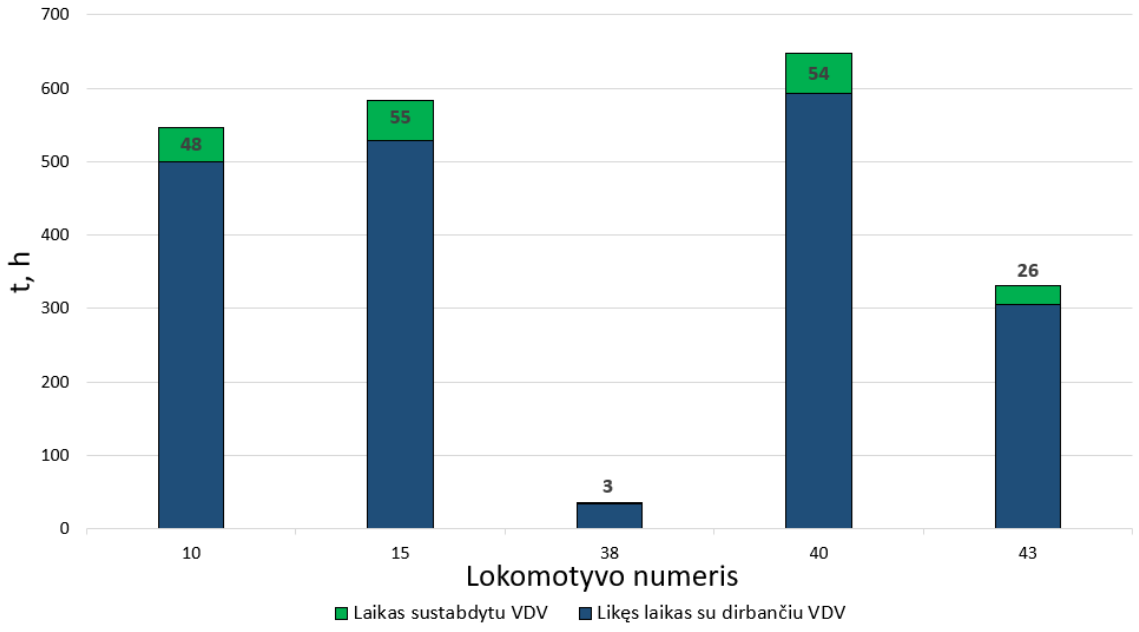
1. Stabdžių magistralės slėgio kritimas, kuris yra 13 kPa/min ir vidutiniškai VDV leistų būti sustabdytam 9 min iki kol prireiks panaudoti oro kompresorių.
2. AKB įtampos kritimas, kuris yra 0,068 V/min. Nors šis parametras numatytos kritinės vertės tyrimo laikotarpiu nepasiekė, bet karščiausiu metų laiku, kai bus naudojamas kondicionierius, tikėtina, kad ją pasieks.
3. Aušinimo skysčio temperatūros kritimas, kuris yra 0,4 °C/min 7 °C lauko temperatūroje, kuris taip pat padidės sustabdžius VDV šaltuoju metų laiku.

5. SUMODELIUOTOS AUTOMATINĖS DYZELINIO VARIKLIO STABDYMO – PALEIDIMO SISTEMOS EFEKTYVUMO VERTINIMAS

5.1 Sumodeliuotos sistemos efektyvumo tikrinimas eksploatacinėmis sąlygomis

Teorinis SPS efektyvumo įvertinimas yra svarbus veiksmas, siekiant pagrįsti šios sistemos efektyvumą ekologiniu ir ekonominiu požiūriu. Įvertinti sumodeliuotą SPS sistemą pagal eksperimentinio tyrimo duomenis yra reikalinga, nes tik remiantis realiais eksploatacijos duomenimis galima kuo labiau priartėti prie tokios sistemos realizavimo tikrovėje. Siekiant nurodyti SPS efektyvumą, būtina išanalizuoti kiek laiko VDV galėtų būti sustabdytas nesumažinant lokomotyvo parengties eksploatacijai bet kokiomis sąlygomis.

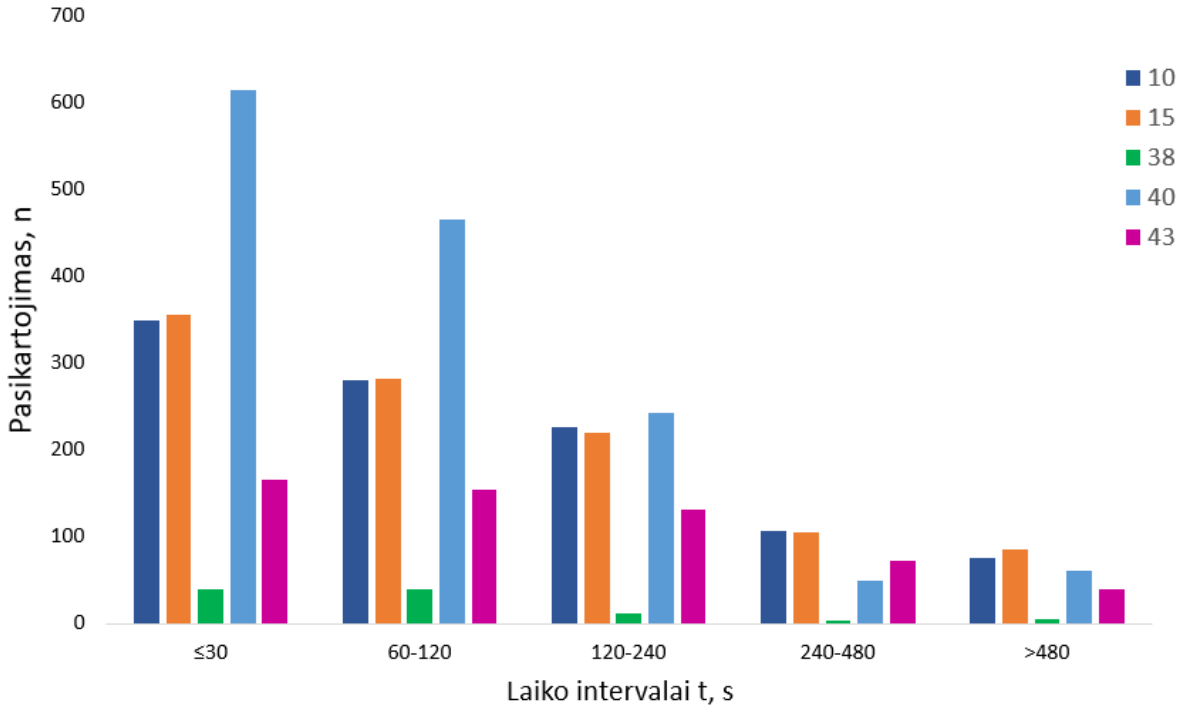
SPS efektyvumo skaičiavimai atlikti Excel programoje. Įsivedus visus prieš tai išvardytus SPS algoritmo sąlygoms tenkinti apribotus parametrus pritaikytos skaičiavimo formulės, kurios tokiu pačiu metodu kaip ir algoritmas, pateikia tenkinantį arba netenkinantį signalą. Pagrindinis sumodeliuotos sistemos efektyvumą parodantis parametras yra jos veikimo laikas. Šis parametras gautas pritaikius SPS algoritmo logiką su įvesties parametrais visų lokomotyvų eksperimentinio tyrimo metu surinktam eksploatacijos duomenų paketui. Visiems penkiems lokomotyvams skaičiavimai atlikti tokiu pačiu metodu – pritaikant vienodas formules pagal kiekvieno lokomotyvo eksploatacijos duomenis. Gauti algoritmo sąlygas tenkinami signalai išskirti lygiagrečiai eksploatacijos duomenų eilėms. Po to, laikas pozicijose, kuriose gautas tenkinamas signalas, susumuotas. Šio laiko suma parodo galimą SPS veikimo laiką per visą eksperimentinio tyrimo laikotarpį. Šis laikas yra pavaizduotas 38 pav.



38 pav. SPS veikimo laikas per eksperimentinio tyrimo laikotarpį

38 pav. grafike pavaizduotas tyrimo metu visų lokomotyvų darbo laikas valandomis, kurios yra išskirtos į laiką su sustabdytu ir paleistu VDV. Atlikus teorinį bandymą iš pateikto rezultato galima matyti, kad SPS veikia efektyviai ir sumažina nereikalingą VDV darbą. Naudojant SPS sistemą VDV darbo laikas sumažėjo nuo 3 h iki 55 h priklausomai nuo lokomotyvo eksploatacijos kiekio ir tipo. Sumažintų valandų skaičiai skiriasi, bet procentinės vertės labai panašios. SPS veikimo nuo viso lokomotyvo darbo laiko procentai svyravo nuo 7,86 % iki 9,42 %. Apskaičiuota eksperimentiniame tyrime visų stebėtų lokomotyvų vidutinė SPS veikimo trukmė 37,2 h. Tai sudarė 8,6 % nuo viso lokomotyvų vidutinio darbo laiko. Gautų rezultatų panašumas parodo, kad sistema yra sumodeliuota ir pritaikyta tinkamai.

Norint įvertinti SPS sistemos naudingumą svarbu atsižvelgti ne tik į sumažintą VDV darbo laiką. Sustabdyto VDV darbo laikas parodo sistemos efektyvumą, o norint gauti sistemos sukuriamą naudą svarbu atsižvelgti ir į sustabdyto VDV darbo laiko trukmes. Sustabdžius VDV ilgesniam laikui, didėja ekonominė ir ekologinė nauda, o stabdyti trumpais intervalais gali būti neefektyvu, nenaudinga ir net kenksminga, jei trumpų VDV stabdymo pasikartojimai pasidaro dažni. Naudinga pakartoti, jog eksperimentinio tyrimo duomenų atskaitos taškai išskaidyti intervalais kas 30 s. Todėl, VDV stabdymo pasikartojimas apskaičiuotas atskirai sumuojant visus nuosekliai pasikartojančius SPS algoritmą tenkinančių signalų laikus ir tuos, kurių pasikartojimą skyrė netenkinantys SPS algoritmo laikai. VDV stabdymo pasikartojimai yra pavaizduoti 39 pav.

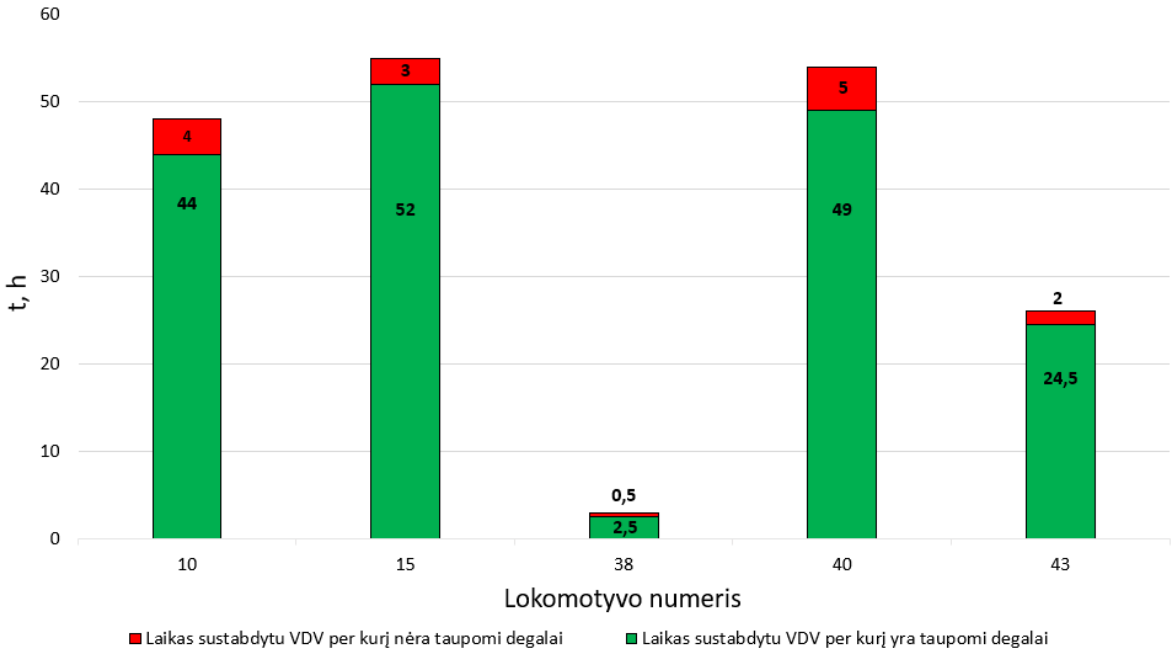


39 pav. VDV stabdymo pasikartojimai

Grafike pavaizduotas VDV sustabdymų skaičius kiekvienam lokomotyvui pagal skirtingas laiko intervalų trukmes. Nuo trumpesnių nei 31 s iki ilgesnių nei 480 s. Daugiausiai VDV

stabdymo pasikartojimų yra pirmame laiko intervale – iki 31 s. Šiame intervale pasikartojimų skaičius sudaro 36,4 % visų pasikartojimų skaičiaus (1522 pasikartojimai). Antrame ir trečiame intervaluose VDV stabdymų skaičius kartojosi atitinkamai 29,2 % bei 19,9 % visų pasikartojimų skaičiaus (1221 ir 831 pasikartojimai). Svarbu paminėti, jog šiose intervaluose SPS sistemos veikimas veikia optimaliausiai. Tai reiškia, kad galima sumažinti degalų sąnaudas neprarandant daug suspausto oro, AKB įtampos ir aušinimo skysčio temperatūros. Ketvirtame intervale pasikartojimų skaičius sumažėja dar daugiau nuo praeito intervalo. Iš visų pasikartojimų, šiame intervale VDV stabdymas pasikartoja tik 8,1 % (337 pasikartojimai). Paskutiniame intervale pasikartojimų skaičius sudaro tik 6,4 % visų pasikartojimų skaičiaus (267 pasikartojimai).

Siekiant būtų galima apskaičiuoti ekonominę SPS naudą, reikia apsibrėžti ribas, kuriose galima įvertinti SPS naudingumą. Pavyzdžiui, prieš tai paminėta, jog ER20CF taupo degalus tik jei VDV sustabdytas ilgiau nei 29,6 s, todėl jo paleidimo ir stabilizavimosi po paleidimo degalų sąnaudos yra prilyginamos pirmajam VDV stabdymo laiko intervalui (≤ 30 s) ir nėra vertinamos. Taip pat, pagal SPS įvesties parametrų kaitą, maksimalus laikas, kurį VDV gali būti sustabdytas yra 9 min, todėl penktasis intervalas (> 480 s), kuriame VDV gali būti sustabdytas ilgiau nei 8 min taip pat nėra vertinamas. Pašalinus VDV stabdymus trumpesnius nei 31 s ir ilgesnius nei 480 s apskaičiuotas SPS veikimo laikas per kurį yra taupomi degalai, arba kitaip, gaunama nauda. Skaičiavimas atliktas atimant laiką, per kurį nėra taupomi degalai iš viso SPS veikimo laiko. Tai apima ne tik pirmo ir paskutinio pasikartojimų laiko intervalų sumas, bet eliminuojant iš visų likusių SPS suveikimų laikų, nenaudingą laiką (30 s). Gautos vertės yra pateikiamos 40 pav.



40 pav. Naudingas SPS veikimo laikas

Lyginant šį grafiką su 39 pav. pateiktu grafiku, matomas nedidelis skirtumas. Tai parodo, kad SPS yra ir efektyvi, ir naudinga. Naudingas laikas sustabdytu VDV degalų taupymo atžvilgiu pagal lokomotyvus skyrėsi nuo 2,5 h iki 54 h. Išraiška procentais nuo viso SPS laiko svyravo nuo 88,3 % iki 94,6 %, sudarant vidutinę vertę – 90,9 %. Vidutinė naudingo SPS laiko trukmė 34,4 h, sudaranti lygiai 8 % nuo viso lokomotyvų darbo laiko vidurkio.

Šie rezultatai pagrindžia sumodeliuotos ir pagal realius duomenis patikrintos SPS efektyvumą ir naudingumą. Nemaža visų penkių lokomotyvų eksploatacijos kiekio atskirtis nesudaro didelio skirtumo bendrai eksploatacijos tendencijai, todėl gautos mažos variacijos procentinės vertės patvirtina, kad gautus rezultatus galima pritaikyti likusiam ER20CF parkui.

5.2 Sumodeliuotos sistemos ekonominis ir ekologinis vertinimas

SPS efektyvumas ir nauda šiais laikais yra beveik neginčijama, tačiau modeliuojant ir pritaikant individualią sistemą reikia įvardyti naudą pagal aplinkybes. Tyrimo tikslas – įvertinti SPS energijos sąnaudų sumažinimo galimybę. Vienas iš vertinimo kriterijų yra sumažintos degalų sąnaudos eliminavus nereikalingą tuščiąją eigą, kurios, kaip ir prieš tai minėta, yra 18 kg/h. Atlikus eksperimentinį tyrimą nustatyta, kad vidutiniškai per šį laikotarpį (2 mėn.) lokomotyvai tuščiąja eiga dirbo 37,2 h, bet iš jų tik 34,4 h buvo galimybė taupyti degalus. Suskaičiuoti, kiek degalų vidutiniškai buvo galima sutaupyti vienam lokomotyvui per eksperimentinio tyrimo laikotarpį su SPS, galima pagal (5.1) formulę:

$$S_{SPSd/2mėn} = t_{SPSd} \cdot E_{mom}; \tag{5.1}$$

čia: $S_{SPSd/2mėn}$ – vidutinis sutaupytų degalų kiekis vienam lokomotyvui per eksperimentinio tyrimo laikotarpį;

t_{SPSd} – laikas su SPS per kurį buvo taupomi degalai;

E_{mom} – ER20CF momentinės degalų sąnaudos tuščiąja eiga.

Skaičiuojant galimą degalų sutaupymą per minėtą laikotarpį, galima teigti, kad sustabdžius VDV per 34,4 h būtų sutaupyta 619,2 kg dyzelino. Sutaupyta degalų dalis nuo viso suvartoto kiekio eksperimentinio tyrimo metu yra skaičiuojama pagal (5.2) formulę:

$$S_{procd} = \frac{S_{SPSd/2mėn}}{E_{2mėn}} \cdot 100\%; \tag{5.2}$$

čia: S_{procd} – vidutinis sumažinamų degalų naudojant SPS procentas vienam lokomotyvui;

$E_{2mėn}$ – vidutinis vieno lokomotyvo suvartotų degalų kiekis per eksperimentinio tyrimo laikotarpį.

Tai sumažina bendras lokomotyvo degalų sąnaudas 2 %. Ekonominė nauda iš sutaupytų degalų skaičiuojama pagal (5.3) formulę:

$$N_{deg/2mėn} = \frac{S_{SPSd/2mėn}}{\rho} \cdot k_{dyz}; \quad (5.3)$$

čia: $N_{deg/2mėn}$ – vidutinė ekonominė nauda iš sutaupytų degalų vienam lokomotyvui per eksperimentinio tyrimo laikotarpį;

ρ – dyzelino tankis – 0,82;

k_{dyz} – Dyzelino kaina Lietuvoje eksperimentinio tyrimo atlikimo metu – 1,42 Eur.

Sutaupoma suma vienam lokomotyvui per 2 mėn. – 1058 Eur. Nors degalų taupymas yra galimas per 34,4 h tuščiąja eiga, per visą SPS veikimo laiką – 37,2 h yra skaičiuojama vieno lokomotyvo eksploatacijos ekonominė nauda per eksperimentinio tyrimo laikotarpį. Ji yra skaičiuojama pagal (5.4) formulę:

$$N_{motoh/2mėn} = t_{SPS} \cdot k_{ekspl/1h}; \quad (5.4)$$

čia: $N_{motoh/2mėn}$ – vidutinė ekonominė nauda iš sumažinto VDV darbo laiko vienam lokomotyvui per eksperimentinio tyrimo laikotarpį;

t_{SPS} – vidutinis SPS veikimo laikas tyrimo laikotarpiu;

$k_{ekspl/1h}$ – ER20CF variklio valandos darbo įkainis nevertinant degalų – 20 Eur/h.

Apskaičiavus gaunama, kad vidutinė vieno lokomotyvo ekonominė nauda iš sutaupyto VDV darbo laiko per eksperimentinio tyrimo laikotarpį yra 744 Eur. Įmonė „LTG Cargo“ taip pat patiria išlaidų dėl lokomotyvų taršos. Nauda, gaunama sumažinus taršą vienam lokomotyvui per tyrimo laikotarpį yra skaičiuojama pagal (5.5) formulę:

$$N_{teršl/2mėn} = S_{SPSd/2mėn} \cdot k_{mokest}; \quad (5.5)$$

čia: $N_{teršl/2mėn}$ – vidutinė ekonominė nauda iš sumažinto teršalų kiekio vienam lokomotyvui per eksperimentinio tyrimo laikotarpį;

k_{mokest} – Lietuvos Respublikos įstatymų numatyta tvarka mokestis geležinkelio riedmenims už aplinkos teršimą – 11 Eur už 1000 kg sunaudoto dyzelino.

Sumažinus suvartojamus degalus, šis mokestis sumažėtų beveik 7 Eur vienam lokomotyvui per 2 mėn. Tolesnių ekonominių skaičiavimų rezultatai visam ER20CF parkui per metus yra pateikiami 5.1 lentelėje.

5.1 lentelė. SPS ekonominė nauda

Rodiklis	**1 lok. per 2 mėn.**	**1 lok. per metus**	**44 lok. per metus**
Sutaupyta sumažinus VDV darbo laiką, Eur	744	4464	196 416
Sutaupyta sumažinus degalų sąnaudas, Eur	1058	6348	279 312
Sutaupyta taršos mokesčių, Eur	7	42	1848
Iš viso, Eur		10 854	477 576

Remiantis eksperimentinio tyrimo duomenimis apskaičiuota, kad vienam „LTG Cargo“ eksploatuojamam lokomotyvui ER20CF įdiegus sumodeliuotą SPS per metus galima sutaupyti 10 854 Eur, o įdiegus visam parkui – 477 576 Eur. Įvertinus SPS naudą, svarbu paminėti aspektus, kurie gali turėti neigiamą įtaką lokomotyvo eksploatacijai. VDV paleidimo ciklas sukelia didesnes jėgas, kurios pagreitina dėvėjimąsi. Taip pat per tyrimo laikotarpį visi lokomotyvai paleido VDV 872 kartus, o naudojant SPS šis skaičius siektų 4178. Paleidimų skaičius per tyrimo laikotarpį nenaudojant SPS apskaičiuotas sumuojant tenkinančių signalų kiekį sąlygai, kuri pateikia signalą, kai lokomotyvo VDV pakeičia sūkių parametrą nuo 0 iki bet kokios vertės. Paleidimų kiekis naudojant SPS apskaičiuotas susumuojant visus 39 pav. grafike pavaizduotus sistemos suveikimo pasikartojimus. Tai reiškia, kad VDV paleidimų skaičius naudojant SPS padidėja 4,8 karto. Tai ženkliai padidintų VDV, starterio bei AKB dėvėjimąsi. VDV paleidimo metu dėvisi greičiau dėl nutraukiamo aušinimo bei tepimo sistemų darbo. Taip pat starterių ilgalaikiškumas yra tiesiogiai priklausomas nuo VDV paleidimų skaičiaus, o AKB, aprūpindama lokomotyvą elektros energija neveikiant generatoriui, greičiau pasieks savo maksimalų įkrovos ir iškrovos ciklų skaičių. Finansiškai įvertinti šių neigiamų aspektų nėra įmanoma, nes gamintojai nėra nurodę konkrečių dalių veikimo laiko ar ciklų skaičiaus. Taip pat, taikant planinę prevencinę remonto sistemą, visi šie mazgai yra keičiami iki gedimo. Svarbu paminėti, kad šiuos aspektus iš dalies įvertina prieš tai minėtas ER20CF eksploatacijos įkainis. Nes sumažinus VDV darbo laiką, padidėja laiko intervalai tarp techninės priežiūros ir kitų agregatų ilgaamžiškumas, kurių pastoviam darbui VDV paleidimas įtakos neturi.

Lokomotyvų paruošimas SPS įdiegimui be papildomų sunkumų gali būti įvykdytas „LTG Cargo“ dirbančių inžinierių ir mechanikų pastangomis, tačiau pačios įrangos gamyba ir jos pritaikymas lokomotyvui – perkama paslauga. Atlikus rinkos analizę konkrečiai šiam tyrimui, gauta informacija, jog užsakius SPS visam ER20CF parkui, vienos sistemos gamybos ir pritaikymo kaina siektų 19 799 Eur. Visam, 44 lokomotyvus apimančiam, ER20CF parkui tai kainuotų 871 156 Eur. Per metus sutaupant 477 576 Eur, SPS įranga atsipirktų per 22 mėn. Po SPS įdiegimui reikalingų investicijų atsipirkimo, pagal (5.6) formulę skaičiuojama kokią įtaką SPS turės „LTG Cargo“ metinėms išlaidoms:

$$N_{proc\,i} = \frac{S_{sum\,i}}{S_{sąn\,i}} \cdot 100\%; \tag{5.6}$$

čia: $N_{proc}\ i$ – sumažintos išlaidos;

$S_{sum\,i}$ – per metus sutaupoma suma: degalams – 279 312 Eur; eksploatacinėms ir taršos išlaidoms – 198 264 Eur; iš viso – 477 576 Eur.

$S_{sąn\,i}$ – metinės išlaidos: energijai – 36,47 mln. Eur; eksploatacijai – 39,1 mln. Eur.; suminės – 260,5 mln. Eur.

Po įrangos atsipirkimo, SPS sutaupyti degalai leistų sumažinti „LTG Cargo“ metines energijos išlaidas 0,77 %. Sumažėjus taršai ir VDV darbo laikui tai metines eksploatacijos išlaidas sumažintų 0,51 %. Tai reiškia, kad visa sugeneruota SPS nauda bendras įmonės metines išlaidas sumažintų 0,18 %.

Geležinkelių transportas išmeta didelį kiekį taršos. Lietuva, kaip ES narė, yra įsipareigojusi mažinti emisijas pagal Europos žaliąjį kursą. Ekologiški sprendimai geležinkelių transporto sektoriuje padėtų gerinti oro kokybę ir Lietuvos įvaizdį tarptautiniu mastu. Išmetamų teršalų kiekis, kurį galima sumažinti naudojant SPS yra apskaičiuotas pagal (5.7) formulę:

$$K_i = P_{SPS} \cdot m_i; \tag{5.7}$$

čia: K_i – sumažintas teršalų kiekis vienam lokomotyvui per tyrimo laikotarpį;

P_{SPS} – sumažintas degalų vienam lokomotyvui per tyrimo laikotarpį;

m_i – ER20CF suvartojant 1000 kg dyzelino išmetamas teršalų kiekis tuščiosios eigos režimu: anglies dioksido – 3170 kg; anglies monoksido – 1,5 kg; azoto oksidų – 9 kg; angliavandenilių – 0,4 kg; kietųjų dalelių – 0,9 kg.

Atlikus skaičiavimus tolesni jų rezultatai visam ER20CF parkui yra pateikti 5.2 lentelėje.

5.2 lentelė. Sumažinta tarša naudojant SPS

Teršalai	**Sumažinamas kiekis 1 lok. tyrimo laikotarpiu, kg**	**Sumažinamas kiekis 1 lok. per metus, kg**	**Sumažinamas kiekis 44 lok. per metus, kg**
Anglies dioksidas (CO_2)	1965	11 792	518 866
Anglies monoksidas (CO)	0,93	5,6	246
Azoto oksidai (NOx)	5,6	33,5	1473
Angliavandeniliai (HC)	0,25	1,5	65
Kietosios dalelės (PM)	0,56	3,3	147

Lentelėje matomi duomenys aiškiai parodo naudą, kurią galima pasiekti naudojant SPS. Apskaičiuotas bendras teršalų kiekis visam ER20CF parkui per metus parodo, kad ilgalaikėje perspektyvoje SPS galėtų padėti tvirtą žingsnį tvaraus geležinkelių transporto link.

5.3 Penktojo skyriaus išvados

1. Sumodeliuotos SPS efektyvumas patvirtintas eksperimentinių tyrimų duomenimis. Sistema leidžia sumažinti VDV darbo laiką 8,6 %, nesumažinant lokomotyvo parengtumo eksploatacijai.
2. Sumodeliuotos SPS naudingumas patvirtintas eksperimentinių tyrimų duomenimis. Sistema yra naudinga 90,9 % viso veikimo metu. Tai leidžia sutaupyti vidutiniškai 2,0 % suvartojamų degalų.
3. Po SPS atsipirkimo laikotarpio, per metus visam ER20CF parkui SPS sutaupytų daugiau nei 477 576 Eur. Tai sumažintų bendras „LTG Cargo“ metines sąnaudas 0,18 %.
4. Naudojant SPS sumažėtų emisijos. Per metus visam ER20CF parkui tai leistų išmesti 519 000 kg mažiau CO_2, 246 kg anglies monoksido, 1473 kg azoto oksidų, 65 kg angliavandenilių ir 147 kg kietųjų dalelių.

IŠVADOS

1. Išanalizavus mokslinę literatūrą aptarti įvairūs transporto priemonių energijos sąnaudų mažinimo būdai, kuriuos galima pritaikyti ir geležinkelių transportui. Plačiausiai naudojamas būdas – SPS. Remiantis moksliniais tyrimais pastebėta, kad SPS efektyviau veikia TP, turinčiose didelio darbinio tūrio variklį, tačiau mažai kalbama apie šių sistemų pritaikymą traukos riedmenyse įvertinant būtiną ir nereikalingą tuščiąją eigą. Neįvertinus reikalingos tuščiosios eigos parametrų, nėra įmanoma pamatuoti SPS efektyvumo.
2. Atliktas eksperimentinis tyrimas, per kurį stebėti penki ER20CF lokomotyvai su nuotoline diagnostikos sistema. Pagal gautus duomenis išanalizuoti lokomotyvų darbo režimai. Nustatyta, kad magistraliniai lokomotyvai vidutiniškai 61,5 % viso darbo laiko neatlieka traukos. Atliekant trauką, daugiau nei pusę traukos laiko – 54 % yra dirbama maksimaliu VDV režimu. Vidutinė darbo trukmė per tyrimo laikotarpį – 429 h. Tyrimo metu vidutinis įveiktas atstumas – 12 878 km, suvartotas degalų kiekis – 31,3 t.
3. Sumodeliuotas ER20CF SPS valdymo algoritmas ir nustatytos jo sąlygas tenkinančios parametrų vertės: maksimalus SPS veikimo laikas – 9 min; aušinimo skysčio temperatūra – ≥ 60 °C; AKB įtampa – > 21,5 V; laikas nuo paskutinio VDV paleidimo – ≥ 5 min; stabdžių magistralės slėgis – 0,85 - 1 MPa; VDV sūkiai – ≤ 650 aps./min; trauka – -0,02 - 0,01 kN; stabdžiai – signalas 2.
4. Teoriškai ir praktiškai įrodytas SPS efektyvumas remiantis realių eksploatacijos duomenų analize. Atlikus skaičiavimus gauta, kad VDV darbo laikas sumažėja vidutiniškai 37,2 h arba 8,6 %, o degalų sąnaudos – 619,2 kg arba 20 %, nepakenkiant lokomotyvo parengtumui eksploatacijai. Tai reiškia, kad sistema gali būti diegiama nekeičiant įprastų eksploatacijos sąlygų.
5. Įvertintas SPS įdiegimo atsipirkimo laikotarpis ir finansinė nauda. Po 22 mėn. nuo SPS įdiegimo į visą ER20CF parką per metus „LTG Cargo“ būtų sutaupoma 477 576 Eur. Tai sumažintų metines įmonės energijos sąnaudų išlaidas 0,77 %, eksploatacijos sąnaudų išlaidas 0,51 %, o bendras metines išlaidas 0,18 %.
6. Pagal sutaupytą degalų kiekį apskaičiuota ekologinė nauda. Su SPS per metus visas ER20CF parkas sumažintų išmetamų teršalų kiekį: 518 866 kg anglies dioksido, 246 kg anglies monoksido, 1473 kg azoto oksidų, 65 kg angliavandenilių ir 147 kg kietųjų dalelių.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

Argonne National Laboratory. (2015). *Idle reduction technology for heavy-duty diesel vehicles*. U.S. Department of Energy. https://afdc.energy.gov/files/u/publication/hdv_idling_2015.pdf

Baltrėnas, P., Paliulis D., & Vaiškūnaitė, R. (2014). Experimental investigations and evaluation of pollutant emissions into ambient air by rolling stock engines. *Polish Journal of Environmental Studies*, *23*(3), 673–680.

Brodrick, C.J., Lipman, T. E., Farshchi, M., Lutsey, N. P., Dwyer, H. A., Sperling, D., Gouse, S. W., Harris, D. B., & King Jr., F. G. (2002). Evaluation of fuel cell auxiliary power units for heavy-duty diesel trucks. *Transport and Environment*, *7*(4), 303–315. https://doi.org/10.1016/S1361-9209(01)00028-5

Bureika, G. (2011). Multicriteria evaluation of operational effectiveness of freight diesel locomotives on Lithuanian railways. *Transport*, *26*(1), 61–68. https://doi.org/10.3846/16484142.2011.561947

Cieslik, W., Siuta, D., & Stanislawski, L. (2015). *Effects of start-stop system on the operation of drive system in urban traffic conditions*. Silesian University of Technology. https://www.researchgate.net/publication/279183080

European Commission, Directorate-General for Mobility and Transport. (2020). *EU transport in figures: Statistical pocketbook 2020*. Publications Office of the European Union. https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/da0cd68e-1fdd-11eb-b57e-01aa75ed71a1

Europos Komisija. (2019). *Veiksmingas, saugus ir aplinką tausojantis transportas*. https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal/transport and-green-deal_lt 9.

Europos Komisija. (2020). *Komisijos komunikatas*: *Europos žaliasis kursas.* https://eur lex.europa.eu/legal-content/LT/TXT/HTML/?uri=CELEX:52019DC0640

Fonseca, N., Casanova, J., & Puig, V. (2011). Assessment of fuel consumption reduction in a gasoline urban car by using a stop–start system. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *16*(2), 194–200. https://doi.org/10.1016/j.trd.2010.08.009

Formato, G., Carbone, L., Grassi, F., Divano, R., & Segarich, P. (2023). Energy efficiency driving strategy with Connected-Driving Advisory System (C-DAS). *Transportation Research Procedia*, *72*, 263–270. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.403

Fridrichova, K., Drapal, L., Vopařil, J., & Dlugoš, J. (2021). Overview of the potential and limitations of cylinder deactivation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *146*, 111196. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111196

Frey, H. C., Kuo, P.Y., & Villa, C. (2008). Methodology for characterization of long-haul truck idling activity under real-world conditions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *13*(8), 516–523. https://doi.org/10.1016/j.trd.2008.09.010

Gaines L. (2013). *Reduction of impacts from locomotive idling*. Argonne National Laboratory. https://www.researchgate.net/publication/255201914_Reduction_of_impacts_from_locomotive_idling

Gaines, L., Vyas, A., & Anderson, J. (2015). *Which is greener: Idle, or stop and restart?* Argonne National Laboratory. https://afdc.energy.gov/files/u/publication/which_is_greener.pdf

Gupta, A., & Verma, J. P. (2015). Sustainable bio-ethanol production from agro-residues: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *41*, 550–567. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.032

Yi, S. (2018). Chapter 2 – Traction calculation. In *Principles of railway location and design*. *274*, 73–157. Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813487-0.00002-0

Karrouchi, M., Rhiat, M., Nasri, I., Atmane, I., Hirech, K., Messaoudi, A., Melhaoui, M., & Kassmi, K. (2023). Practical investigation and evaluation of the Start/Stop system's impact on the engine's fuel use, noise output, and pollutant emissions. *e-Prime – Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, *6*, 100310. https://doi.org/10.1016/j.prime.2023.100310

Kaluza, A., & Kucharski, R. (2018). Locomotive diesel engine idle time distributions: Case studies from Poland, 2009–2013. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *62*, 524–535. https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.02.019

Lebedevas, S., Dailydka, S., Jastremskas, V., & Rapalis, P. (2015). The influence of locomotive diesel engine transient operating modes on energy usage. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *34*, 219–229. https://doi.org/10.1016/j.trd.2014.10.011

Lietuvos Respublikos susisiekimo ministerija. (2021). *Dėl lokomotyvų ir motorinių traukinių energijos naudojimo apskaitos ir kontrolės tvarkos aprašo patvirtinimo*. https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalAct/TAR.FFF9AE9162EE/asr

Lietuvos Respublikos susisiekimo ministerija. (2021). *Geležinkelio riedmenų eksploatacijos nuostatai*. https://eseimasx.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/ea2bcc61efda11eb866fe2e083228059?jfwid=-pd71fhbks

Mattetti, M., Beltramin, A., Perez Estevez, M. A., Varani, M., Renzi, M., & Alberti, L. (2022). Start and stop systems on agricultural tractors as solution for saving fuel and emissions. *Biosystems Engineering*, *216*, 108–120. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.02.006

Mattetti, M., Maraldi, M., Sedoni, E., & Molari, G. (2019). Optimal criteria for durability test of stepped transmissions of agricultural tractors. *Biosystems Engineering*, *178*, 145–155. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.11.014

Molari, G., Mattetti, M., Lenzini, N., & Fiorati, S. (2019). An updated methodology to analyse the idling of agricultural tractors. *Biosystems Engineering*, *187*, 160–170. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.09.001

Perozzi, M., Cantore, G., Tumino, A., & Neri, P. (2016). Fuel consumption and exhaust emissions of agricultural tractors during road and field operations. *Journal of Biosystems Engineering*, *151*, 59–67. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.08.023

Saetti, M., Mattetti, M., Varani, M., Lenzini, N., & Molari, G. (2021). On the power demands of accessories on an agricultural tractor. *Biosystems Engineering*, *206*, 109–122. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.03.015

UAB „LTG Cargo“ 2023 metinė ataskaita (p. 97). (2024)

Urbančič J., Bothos E., Magoutas B., Bradesko L., Schrammel J., & Mentzas G. (2020). From mobility patterns to behavioural change: Leveraging travel behaviour and personality profiles to nudge for sustainable transportation. *Journal of Intelligent Information Systems*, *54*, 157–178. https://doi.org/10.1007/s10844-018-0528-1

Vaičiūnas, G., Liudvinavičius, L., Bureika, G., Subačius, R., Petrenko, V., Butkevičius, J., Černiauskaitė, L., Gailienė, I., Podagėlis, I., & Sakalauskas K. (2018). *Geležinkeliai. Bendrasis kursas.* Technika. 618 p.

Valickas L. (2024). *Keleivinių riedmenų energijos sąnaudų mažinimo tyrimai* [Baigiamasis magistro darbas, Vilniaus Gedimino technikos universitetas].

Weaver, C. S. (2006). *Start-up and idling emissions from two locomotives* (Report No. EPA420-R-06-008). U.S. Environmental Protection Agency. https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/P1000M0C.PDF

Zammit, J. P., McGhee, M. J., Shayler, P. J., & Pegg, I. (2013). Benefits of cylinder deactivation on a diesel engine and restrictions due to low boost. In *Internal combustion engines: Performance, fuel economy and emissions 241*, 95–108. Woodhead Publishing. https://doi.org/10.1533/9781782421849.3.95