



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

Liudas Valickas

**KELEIVINIŲ RIEDMENŲ ENERGIJOS ŠAUNAUDŲ MAŽINIMO
TYRIMAI
RESEARCH ON REDUCING OF ENERGY CONSUMPTION OF
PASSENGER ROLLING STOCK**

Baigiamasis magistro darbas

Transporto inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX058

Transporto priemonių inžinerijos specializacija

Transporto inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2024

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

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(Parašas)

Algimantas Danilevičius

(Vardas, pavardė)

(Data)

Liudas Valickas

KELEIVINIŲ RIEDMENŲ ENERGIJOS SĄNAUDŲ MAŽINIMO
TYRIMAI
RESEARCH ON REDUCING OF ENERGY CONSUMPTION OF
PASSENGER ROLLING STOCK

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)

(Parašas)

(Data)

Lietuvių kalbos konsultantas

lekt. Angelika Petrėtienė

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Vilnius, 2024

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

2024-05-26

MAGISTRO BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS

Nr. TPIfm-22-6373

Vilnius

Studentas (-ė): Liudas Valickas

Baigiamojo darbo tema: Keleivinių riedmenų energijos sąnaudų mažinimo tyrimai

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas pagal numatytą studijų kalendorinį grafiką.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

Baigiamojo darbo užduotis: Įvadas. Geležinkelio riedmenų energijos sąnaudų nagrinėjimas ir jų mažinimo galimybių analizė. Keleivinio traukinio "Pesa 730ML" judėjimo ir jo energetinių sąnaudų ruože "Vilnius - Turmantas" matematinis modeliavimas. Matematinio modeliavimo rezultatų pagrindimas eksperimentiniais duomenimis. Keleivinio traukinio, važiuojančio skirtingais valdymo planais, skaitiniai tyrimai ir gautų duomenų analizė. Tinkamiausio traukinio valdymo plano sudarymas numatytam kelio ruožui. Išvados ir pasiūlymai.

Vadovas docentas Stasys Steišūnas

<table border="1"> <tr> <td>Vilniaus Gedimino technikos universitetas</td> </tr> <tr> <td>Transporto inžinerijos fakultetas</td> </tr> <tr> <td>Mobiliųjų mašinų ir geležinkelių transporto katedra</td> </tr> </table>		Vilniaus Gedimino technikos universitetas	Transporto inžinerijos fakultetas	Mobiliųjų mašinų ir geležinkelių transporto katedra	<table border="1"> <tr> <td>ISBN</td> <td>ISSN</td> </tr> <tr> <td>Egz. sk.</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Data-.....-.....</td> <td></td> </tr> </table>	ISBN	ISSN	Egz. sk.		Data-.....-.....	
Vilniaus Gedimino technikos universitetas											
Transporto inžinerijos fakultetas											
Mobiliųjų mašinų ir geležinkelių transporto katedra											
ISBN	ISSN										
Egz. sk.											
Data-.....-.....											
<table border="1"> <tr> <td colspan="2">Antrosios pakopos studijų Transporto inžinerijos programos magistro baigiamasis darbas</td> </tr> <tr> <td>Pavadinimas</td> <td>Keleivinių riedmenų energijos sąnaudų mažinimo tyrimai</td> </tr> <tr> <td>Autorius</td> <td>Liudas Valickas</td> </tr> <tr> <td>Vadovas</td> <td>Stasys Steišūnas</td> </tr> </table>			Antrosios pakopos studijų Transporto inžinerijos programos magistro baigiamasis darbas		Pavadinimas	Keleivinių riedmenų energijos sąnaudų mažinimo tyrimai	Autorius	Liudas Valickas	Vadovas	Stasys Steišūnas	
Antrosios pakopos studijų Transporto inžinerijos programos magistro baigiamasis darbas											
Pavadinimas	Keleivinių riedmenų energijos sąnaudų mažinimo tyrimai										
Autorius	Liudas Valickas										
Vadovas	Stasys Steišūnas										
		<table border="1"> <tr> <td>Kalba: lietuvių</td> </tr> </table>	Kalba: lietuvių								
Kalba: lietuvių											
<table border="1"> <tr> <td> Anotacija Baigiamajame magistro darbe nagrinėjami keleivinių traukinių energijos sąnaudų mažinimo būdai. Pagrindinis darbo tikslas – atlikti keleivinių traukinių energijos sąnaudų priklausomybės nuo važiavimo charakteristikų tyrimą ir pasiūlyti efektyvų traukos riedmens valdymo planą. Nagrinėjant mokslinę literatūrą, apžvelgti įvairūs riedmenų energijos sąnaudų mažinimo metodai. Atlikta keleivinių traukinių DR1A ir PESA 730ML degalų sąnaudų statistinė analizė bei prognozė ruože Vilnius–Turmantas ir remiantis rezultatais pagrįsta tyrimo nauda. „Matlab / Simulink“ programoje sukurtas matematinis PESA 730ML traukinio važiavimo modelis. Juo naudojantis atlikta eksperimento metu įvykdytos eksperimentinės kelionės imitacija ir patobulinta jos greičio kreivė sumažinant degalų sąnaudas 14,5 %. Rezultatų analizė leido išskirti pagrindines aplinkybes ir traukinio valdymo technikas, leidžiančias sumažinti energijos sąnaudas. Pateiktos rekomendacijos, kaip būtų galima pagerinti optimizuojamos greičio kreivės rezultatus. Darbą sudaro 7 dalys: įvadas, mokslinės literatūros apžvalga, 3 tyrimo dėstymo dalys, išvados, literatūros sąrašas. Darbo apimtis – 83 p. teksto be priedų, 65 iliustracijos, 12 lentelių, 35 bibliografiniai šaltiniai. </td> </tr> </table>			Anotacija Baigiamajame magistro darbe nagrinėjami keleivinių traukinių energijos sąnaudų mažinimo būdai. Pagrindinis darbo tikslas – atlikti keleivinių traukinių energijos sąnaudų priklausomybės nuo važiavimo charakteristikų tyrimą ir pasiūlyti efektyvų traukos riedmens valdymo planą. Nagrinėjant mokslinę literatūrą, apžvelgti įvairūs riedmenų energijos sąnaudų mažinimo metodai. Atlikta keleivinių traukinių DR1A ir PESA 730ML degalų sąnaudų statistinė analizė bei prognozė ruože Vilnius–Turmantas ir remiantis rezultatais pagrįsta tyrimo nauda. „Matlab / Simulink“ programoje sukurtas matematinis PESA 730ML traukinio važiavimo modelis. Juo naudojantis atlikta eksperimento metu įvykdytos eksperimentinės kelionės imitacija ir patobulinta jos greičio kreivė sumažinant degalų sąnaudas 14,5 %. Rezultatų analizė leido išskirti pagrindines aplinkybes ir traukinio valdymo technikas, leidžiančias sumažinti energijos sąnaudas. Pateiktos rekomendacijos, kaip būtų galima pagerinti optimizuojamos greičio kreivės rezultatus. Darbą sudaro 7 dalys: įvadas, mokslinės literatūros apžvalga, 3 tyrimo dėstymo dalys, išvados, literatūros sąrašas. Darbo apimtis – 83 p. teksto be priedų, 65 iliustracijos, 12 lentelių, 35 bibliografiniai šaltiniai.								
Anotacija Baigiamajame magistro darbe nagrinėjami keleivinių traukinių energijos sąnaudų mažinimo būdai. Pagrindinis darbo tikslas – atlikti keleivinių traukinių energijos sąnaudų priklausomybės nuo važiavimo charakteristikų tyrimą ir pasiūlyti efektyvų traukos riedmens valdymo planą. Nagrinėjant mokslinę literatūrą, apžvelgti įvairūs riedmenų energijos sąnaudų mažinimo metodai. Atlikta keleivinių traukinių DR1A ir PESA 730ML degalų sąnaudų statistinė analizė bei prognozė ruože Vilnius–Turmantas ir remiantis rezultatais pagrįsta tyrimo nauda. „Matlab / Simulink“ programoje sukurtas matematinis PESA 730ML traukinio važiavimo modelis. Juo naudojantis atlikta eksperimento metu įvykdytos eksperimentinės kelionės imitacija ir patobulinta jos greičio kreivė sumažinant degalų sąnaudas 14,5 %. Rezultatų analizė leido išskirti pagrindines aplinkybes ir traukinio valdymo technikas, leidžiančias sumažinti energijos sąnaudas. Pateiktos rekomendacijos, kaip būtų galima pagerinti optimizuojamos greičio kreivės rezultatus. Darbą sudaro 7 dalys: įvadas, mokslinės literatūros apžvalga, 3 tyrimo dėstymo dalys, išvados, literatūros sąrašas. Darbo apimtis – 83 p. teksto be priedų, 65 iliustracijos, 12 lentelių, 35 bibliografiniai šaltiniai.											
<table border="1"> <tr> <td> Prasminiai žodžiai: Traukinių energijos sąnaudos, traukinių energijos sąnaudų mažinimas, SIMULINK traukinio matematinis modelis, SIMULINK traukinio imitacija, efektyvus traukinių valdymas, energijos sąnaudų priklausomybė nuo greičio, energijos sąnaudų priklausomybė nuo kelio profilio. </td> </tr> </table>			Prasminiai žodžiai: Traukinių energijos sąnaudos, traukinių energijos sąnaudų mažinimas, SIMULINK traukinio matematinis modelis, SIMULINK traukinio imitacija, efektyvus traukinių valdymas, energijos sąnaudų priklausomybė nuo greičio, energijos sąnaudų priklausomybė nuo kelio profilio.								
Prasminiai žodžiai: Traukinių energijos sąnaudos, traukinių energijos sąnaudų mažinimas, SIMULINK traukinio matematinis modelis, SIMULINK traukinio imitacija, efektyvus traukinių valdymas, energijos sąnaudų priklausomybė nuo greičio, energijos sąnaudų priklausomybė nuo kelio profilio.											

<table border="1"> <tr> <td>Vilnius Gediminas Technical University</td> </tr> <tr> <td>Faculty of Transport Engineering</td> </tr> <tr> <td>Department of Mobile Machinery and Railway Transport</td> </tr> </table>		Vilnius Gediminas Technical University	Faculty of Transport Engineering	Department of Mobile Machinery and Railway Transport	<table border="1"> <tr> <td>ISBN</td> <td>ISSN</td> </tr> <tr> <td>Copies No.</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Date-.....-.....</td> <td></td> </tr> </table>		ISBN	ISSN	Copies No.		Date-.....-.....								
Vilnius Gediminas Technical University																			
Faculty of Transport Engineering																			
Department of Mobile Machinery and Railway Transport																			
ISBN	ISSN																		
Copies No.																			
Date-.....-.....																			
<table border="1"> <tr> <td colspan="4">Master Degree Studies Transport Engineering study programme Master Graduation Thesis</td> </tr> <tr> <td>Title</td> <td colspan="3">Research on reducing of energy consumption of passenger rolling stock</td> </tr> <tr> <td>Author</td> <td colspan="3">Liudas Valickas</td> </tr> <tr> <td>Academic supervisor</td> <td colspan="3">Stasys Steišūnas</td> </tr> </table>				Master Degree Studies Transport Engineering study programme Master Graduation Thesis				Title	Research on reducing of energy consumption of passenger rolling stock			Author	Liudas Valickas			Academic supervisor	Stasys Steišūnas		
Master Degree Studies Transport Engineering study programme Master Graduation Thesis																			
Title	Research on reducing of energy consumption of passenger rolling stock																		
Author	Liudas Valickas																		
Academic supervisor	Stasys Steišūnas																		
		<table border="1"> <tr> <td>Thesis language: Lithuanian</td> </tr> </table>		Thesis language: Lithuanian															
Thesis language: Lithuanian																			
<table border="1"> <tr> <td> Annotation The final master's thesis examines ways of reducing the energy consumption of passenger trains. The main goal of the work is to conduct a study of the dependence of the energy consumption of passenger trains on the driving characteristics and to propose an effective train driving plan. When examining the scientific literature, various methods of reducing the energy consumption of rolling stock were reviewed. A statistical analysis and forecast of the fuel consumption of passenger trains DR1A and PESA 730ML in the section Vilnius-Turmantas was carried out, and the benefits of the study were based on the results. A mathematical PESA 730ML train model was developed in "Matlab / Simulink" software. A simulation of an experimental trip was carried out, as well as its speed curve was reshaped to reduce fuel consumption by 14.5 %. The analysis of the results made it possible to distinguish the main circumstances and train control techniques that allow saving energy costs. Recommendations are also given on ways to improve the results of the optimization of speed curve. The work consists of 7 parts: introduction, literature review, 3 research parts, conclusions, bibliography. The volume of work - 83 p. text without appendices, 65 illustrations, 12 tables, 35 bibliographic sources. </td> </tr> </table>				Annotation The final master's thesis examines ways of reducing the energy consumption of passenger trains. The main goal of the work is to conduct a study of the dependence of the energy consumption of passenger trains on the driving characteristics and to propose an effective train driving plan. When examining the scientific literature, various methods of reducing the energy consumption of rolling stock were reviewed. A statistical analysis and forecast of the fuel consumption of passenger trains DR1A and PESA 730ML in the section Vilnius-Turmantas was carried out, and the benefits of the study were based on the results. A mathematical PESA 730ML train model was developed in "Matlab / Simulink" software. A simulation of an experimental trip was carried out, as well as its speed curve was reshaped to reduce fuel consumption by 14.5 %. The analysis of the results made it possible to distinguish the main circumstances and train control techniques that allow saving energy costs. Recommendations are also given on ways to improve the results of the optimization of speed curve. The work consists of 7 parts: introduction, literature review, 3 research parts, conclusions, bibliography. The volume of work - 83 p. text without appendices, 65 illustrations, 12 tables, 35 bibliographic sources.															
Annotation The final master's thesis examines ways of reducing the energy consumption of passenger trains. The main goal of the work is to conduct a study of the dependence of the energy consumption of passenger trains on the driving characteristics and to propose an effective train driving plan. When examining the scientific literature, various methods of reducing the energy consumption of rolling stock were reviewed. A statistical analysis and forecast of the fuel consumption of passenger trains DR1A and PESA 730ML in the section Vilnius-Turmantas was carried out, and the benefits of the study were based on the results. A mathematical PESA 730ML train model was developed in "Matlab / Simulink" software. A simulation of an experimental trip was carried out, as well as its speed curve was reshaped to reduce fuel consumption by 14.5 %. The analysis of the results made it possible to distinguish the main circumstances and train control techniques that allow saving energy costs. Recommendations are also given on ways to improve the results of the optimization of speed curve. The work consists of 7 parts: introduction, literature review, 3 research parts, conclusions, bibliography. The volume of work - 83 p. text without appendices, 65 illustrations, 12 tables, 35 bibliographic sources.																			
<table border="1"> <tr> <td> Keywords: Train energy consumption, train energy consumption reduction, SIMULINK train mathematical model, SIMULINK train simulation, efficient train control, energy consumption dependence on speed, energy consumption dependence on track profile. </td> </tr> </table>				Keywords: Train energy consumption, train energy consumption reduction, SIMULINK train mathematical model, SIMULINK train simulation, efficient train control, energy consumption dependence on speed, energy consumption dependence on track profile.															
Keywords: Train energy consumption, train energy consumption reduction, SIMULINK train mathematical model, SIMULINK train simulation, efficient train control, energy consumption dependence on speed, energy consumption dependence on track profile.																			

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Liudas Valickas, 20173018

(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)

Transporto inžinerijos fakultetas

(Fakultetas)

Transporto inžinerija, TPIfm-22

(Studijų programa, akademinė grupė)

BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO)

SĄŽININGUMO DEKLARACIJA

2024 m. gegužės 28 d.

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema „Keleivinių riedmenų energijos sąnaudų mažinimo tyrimai“ yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

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).

Liudas Valickas

(Parašas)

(Vardas ir pavardė)

Turinys

Paveikslų sąrašas	8
Lentelių sąrašas.....	11
Santrumpos	12
Įvadas.....	13
1. Geležinkelių riedmenų energijos sąnaudų mažinimo galimybių analizė	15
1.1 Geležinkelių sistemos tobulinimas	15
1.2 Keleivinio traukinio valdymo plano sudarymas	20
1.3 Keleivinio traukinio valdymo modeliavimas realiu laiku	29
1.4 Mokslinės literatūros apžvalgos apibendrinimas.....	33
2. Keleivinių traukinių degalų sąnaudų analizė ruože Vilnius–Turmantas.....	35
2.1 Keleivinių traukinių statistinė degalų sąnaudų analizė ir palyginimas.....	35
2.2 Keleivinio traukinio PESA 730ML sąnaudų ir išlaidų degalams prognozė	41
2.3 Eksperimentinė kelionė ruožu Vilnius–Turmantas	42
2.4 Keleivinių traukinių degalų sąnaudų analizės apibendrinimas.....	44
3. Keleivinio traukinio judėjimo matematinis modelis	45
3.1 PESA 730ML modelio aprašymas	45
3.2 PESA 730ML modelio sudedamieji blokai	46
3.3 PESA 730ML modelio tinkamumo patikrinimas	52
4. Keleivinio traukinio greičio kreivės skaičiavimai ruože Vilnius–Turmantas	54
4.1 Skaičiavimų metodika	54
4.2 Skaičiavimų eiga.....	55
4.3 Skaičiavimo rezultatų apibendrinimas.....	76
Išvados.....	80
Literatūros sąrašas	82

Paveikslų sąrašas

1 pav. CAT 3512B–HD VDV valandinių sąnaudų pasiskirstymas kelionės metu (Lebedevas et al., 2015).....	16
2 pav. Hibridinės automotrisės principinė traukos jėgainės ir pavaros schema (Li et al., 2023)	17
3 pav. Optimali hibridinės traukos pavaros būsenų naudojimo priklausomybė pagal greitį ir pagreitį (Li et al., 2023).....	18
4 pav. Magnetų generuojama levitacinė jėga pagal traukinio greitį (Qadir et al., 2021)	19
5 pav. Tradicinės ir siūlomos MAGLEV sistemų energijos sąnaudų skirtumai (Qadir et al., 2021).....	20
6 pav. Vektorinė vėjo pasipriešinimo įtaka traukiniui (Trivella et al., 2021).....	21
7 pav. Judančio traukinio, reliatyvaus vėjui, vektorius vA ir traukinį veikiantis reliatyvus vėjo vektorius wA (Trivella et al., 2021).....	21
8 pav. Tvarkaraščio su ir be atsargos laiko grafinis pavyzdys (Xie et al., 2021)	23
9 pav. Esamo ir optimizuoto tvarkaraščio traukinių vėlavimų tikimybių palyginimas (Xie et al., 2021).....	24
10 pav. Energijos sąnaudų priklausomybė nuo pastovaus greičio (Jakubowski ir Jarzebowicz, 2021).....	25
11 pav. Energijos sąnaudų priklausomybė nuo greičio riedant (Jakubowski ir Jarzebowicz, 2021).....	25
12 pav. Išmatuotas ir optimizuotas greičio profilis ruože (Jakubowski ir Jarzebowicz, 2021).....	26
13 pav. Išmatuoto ir optimizuoto važiavimų energijos sąnaudos ruože (Jakubowski ir Jarzebowicz, 2021)	26
14 pav. Traukos pavaros efektyvumas pagal greitį ir važiavimo režimą	27
15 pav. Matematinio traukinio judėjimo modelio struktūrinė schema (Cismaru et al., 2014).....	27
16 pav. SIMULINK traukinio judėjimo modelio blokinė schema (Cismaru et al., 2014)	28
17 pav. Rekuperacinio stabdymo efektyvumas pagal greitį (Wang ir Rakha, 2017)	30
18 pav. Greičio, momentinių energijos sąnaudų ir bendrų energijos sąnaudų pasiskirstymas ruože (Wang ir Rakha, 2017)	31
19 pav. Riedmens greičio priklausomybė nuo pozicijos ruože esant skirtingiems valdymo būdams (Yin ir Chen, 2013)	32
20 pav. Kontrolerio naudojimo priklausomybė nuo pozicijos ruože (Yin ir Chen, 2013).....	32
21 pav. DR1A vidutinių sąnaudų histograma ir empirinė diferencialinė funkcija.....	38
22 pav. PESA 730ML vidutinių sąnaudų histograma ir empirinė diferencialinė funkcija.....	38

23 pav. DR1A vidutinių sąnaudų integralinė statistinė tikimybių funkcija ir teorinė pasiskirstymo funkcija.....	40
24 pav. PESA 730ML vidutinių sąnaudų integralinė statistinė tikimybių funkcija ir teorinė pasiskirstymo funkcija.....	40
25 pav. Naftos ir dyzelino kainų prognozė.....	41
26 pav. Greičio kreivė pagal atstumą iš KLUB–U saugumo sistemos.....	44
27 pav. Traukinio modelio schema SIMULINK programoje	46
28 pav. Traukinio valdymo blokas su susijusiais elementais	47
29 pav. Traukos riedmenis atitinkantis blokas	48
30 pav. PESA 730ML traukos ir stabdymo charakteristikos pagal greitį (730ML dokumentacija, 2016).....	48
31 pav. Pagrindinės judėjimo varžos blokas	49
32 pav. PESA 730ML traukinio pagrindinės judėjimo varžos charakteristika pagal greitį (730ML dokumentacija, 2016).....	50
33 pav. Papildomų kelio varžų jėgų skaičiavimo dalis	51
34 pav. Vidaus degimo variklio blokas	51
35 pav. PESA 730ML VDV sukimo momento charakteristika (MAN Truck and Bus AG, 2016)	52
36 pav. Imituotos traukinio greičio ir pagreičio kreivės prie skirtingų traukos koeficientų	54
37 pav. Greičio kreivių palyginimas ruože Vilnius–Naujoji Vilnia.....	57
38 pav. Traukinį veikiančios išorinės jėgos ruože Vilnius–Naujoji Vilnia.....	57
39 pav. Degalų sąnaudų palyginimas ruože Vilnius–Naujoji Vilnia	58
40 pav. Greičio kreivių palyginimas ruože Naujoji Vilnia–Bezdonys.....	59
41 pav. Traukinį veikiančios išorinės jėgos ruože Naujoji Vilnia–Bezdonys.....	60
42 pav. Degalų sąnaudų palyginimas ruože Naujoji Vilnia–Bezdonys.....	60
43 pav. Greičio kreivių palyginimas ruože Bezdonys–Pailgiai.....	61
44 pav. Traukinį veikiančios išorinės jėgos ruože Bezdonys–Pailgiai.....	62
45 pav. Degalų sąnaudų palyginimas ruože Bezdonys–Pailgiai	62
46 pav. Greičio kreivių palyginimas ruože Pailgiai–Pabradė.....	63
47 pav. Traukinį veikiančios išorinės jėgos ruože Pailgiai–Pabradė.....	64
48 pav. Degalų sąnaudų palyginimas ruože Pailgiai–Pabradė	64
49 pav. Greičio kreivių palyginimas ruože Pabradė–Švenčionėliai	65
50 pav. Traukinį veikiančios išorinės jėgos ruože Pabradė–Švenčionėliai	66
51 pav. Degalų sąnaudų palyginimas ruože Pabradė–Švenčionėliai.....	66

52 pav. Greičio kreivių palyginimas ruože Švenčionėliai–Ignalina.....	67
53 pav. Traukinį veikiančios išorinės jėgos ruože Švenčionėliai–Ignalina.....	68
54 pav. Degalų sąnaudų palyginimas ruože Švenčionėliai–Ignalina	69
55 pav. Greičio kreivių palyginimas ruože Ignalina–Dūkštas.....	70
56 pav. Traukinį veikiančios išorinės jėgos ruože Ignalina–Dūkštas.....	70
57 pav. Degalų sąnaudų palyginimas ruože Ignalina–Dūkštas	71
58 pav. Greičio kreivių palyginimas ruože Dūkštas–Visaginas	72
59 pav. Traukinį veikiančios išorinės jėgos ruože Dūkštas–Visaginas	73
60 pav. Degalų sąnaudų palyginimas ruože Dūkštas–Visaginas.....	73
61 pav. Greičio kreivių palyginimas ruože Visaginas–Turmantas.....	74
62 pav. Traukinį veikiančios išorinės jėgos ruože Visaginas–Turmantas.....	75
63 pav. Degalų sąnaudų palyginimas ruože Visaginas–Turmantas	75
64 pav. Degalų sąnaudų palyginimas pagal tarpstočius	77
65 pav. Siūlomos greičio kreivės degalų taupymo koeficientų rezultatai pagal tarpstočius	78

Lentelių sąrašas

1.1 lentelė. Degalų sąnaudų rezultatai pagal skirtingas skaičiavimo metodikas (Lebedevas et al., 2015).....	16
1.2 lentelė. Tiesinio modeliavimo ir euristinės analizės algoritmų rezultatų palyginimas (T. Xie ir kt., 2013)	28
1.3 lentelė. Skirtingų riedmens valdymo būdų kokybės palyginimas (Yin ir Chen, 2013).....	33
2.1 lentelė. DR1A traukinių degalų sąnaudų statistinė eilutė.....	37
2.2 lentelė. PESA 730ML traukinių sąnaudų statistinė eilutė	38
2.3 lentelė. DR1A integralinių tikimybių ir teorinės pasiskirstymo funkcijos reikšmės	39
2.4 lentelė. PESA 730ML integralinių tikimybių ir teorinės pasiskirstymo funkcijos reikšmės	39
2.5 lentelė. Prognozuojama išlaidų kitimo suvestinė	42
2.6 lentelė. Bandomosios kelionės metu užfiksuoti rezultatai.....	43
3.1 lentelė. MAN 2862 LE 633 variklio charakteristikos (730ML dokumentacija, 2016)	52
4.1 lentelė. Traukinio Nr. 662 2023–2024 m. tvarkaraščio informacija („LTG Link“, Metinis tvarkaraštis 2023–2024, 2024)	55
4.2 lentelė. Bendri eksperimentinės, imitacinės ir siūlomos kelionių rezultatai	76

Santrumpos

ES – Europos Sąjunga

EV – elektros variklis

DAS – mašinisto asistavimo sistema (angl. Driver Advisory System)

GPS – globali padėties nustatymo sistema (angl. Global Positioning System)

KLUB–U – kompleksinė lokomotyvo saugos sistema (rus. Комплексное локомотивное устройство безопасности)

KT – keleivinis traukinys

LTG – „Lietuvos geležinkeliai“

NN – šiaurė–šiaurė poliai

NS – šiaurė–pietūs poliai

PID – Proporcinis–integralinis išvestinis reguliatorius (angl. PID – Proportional-Integral Derivative)

VDV – vidaus degimo variklis

Ivadas

Geležinkelių transportas laikomas viena efektyviausių ir ekologiškiausių transporto rūšių pagal energijos sąnaudas vežamam kroviniui ar keleivių kiekiui. Energetiniai ištekliai 2023 metais sudarė 12,7 % „Lietuvos geležinkeliai“ įmonių grupės išlaidų. Per šį laikotarpį traukiniai į atmosferą išmetė 98 tūkst. tonų anglies dvideginio, iš kurių 16 565 t generavo keleiviniai traukiniai („Lietuvos geležinkeliai“, CO₂ emisijos, 2024). Efektyviai naudojant turimus resursus, galima sumažinti energijos sąnaudas ir pasiekti ne tik žymią ekonominę naudą, bet ir sumažinti aplinkos taršą. Tai leistų įgyvendinti ir Europos žaliojo kurso idėjas – iki 2050 m. sumažinti šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijas iki minimumo, iki 2030 m šių dujų kiekį sumažinti bent 55 % lyginant su 1990 m. (Europos Komisija, 2019b).

„LTG Link“ strategijoje numatyta, kad įsigijus naujus traukinius, bus aptarnautas ruožas Vilnius–Klaipėda vietoje šiuo metu jame naudojamų PESA 730ML traukinių. Tuo metu ruože Vilnius–Turmantas naudojamų DR1A tipo traukinių bus atsisakoma ir šios krypties maršrutus aptarnaus naujesni ir komfortiškesni PESA 730ML traukiniai („LTG Link“ strategija 2024–2050, 2023). Tyrimo metu atlikus DR1A ir PESA 730ML degalų sąnaudų statistinę analizę ruože Vilnius–Turmantas pastebėta, kad naujesnių traukinių vidutinių degalų sąnaudų rezultatai yra ne tokie pastovūs. Iš to padaryta išvada, kad ne visi mašinistai ruože šį riedmenį valdo efektyviai. Atliekant mokslinės literatūros analizę, apžvelgti straipsniai, kuriuose aprašomi įvairūs energijos sąnaudų mažinimo būdai, ir pastebėta, kad yra palyginti nedaug šaltinių, kuriuose nagrinėjami riedmens ekonomišką valdymo principai. Remiantis šia idėja, magistro darbe siekta ištirti, kokie riedmens valdymo principai padeda sumažinti energijos sąnaudas ir pasiūlyti gaires, kurios padėtų efektyviai naudoti turimus keleivinius traukinius.

Darbe, naudojant „Matlab / Simulink“ programinę įrangą, sukurtas matematinis traukinio judėjimo modelis. Atliekant jo tinkamumo pripažinimą, eksperimentinės kelionės metu užfiksuotos degalų sąnaudos lyginamos su šios kelionės imitacinio važiavimo skaičiavimo rezultatais. Gauta, kad modelis yra pakankamai tikslus vykdyti imitacinius važiavimus ir tirti jų rezultatus, neatliekant realių eksperimentų. Modelyje atsižvelgiama į pagrindinius traukinio parametrus, traukos, stabdymo charakteristikas, taip pat traukinį veikiančias išorines jėgas, bei kelio savybes. Šie dydžiai modelyje lengvai keičiami ir konfigūruojami, todėl juo galima atlikti įvairių traukinių tipų ir geležinkelio ruožų imitacinius važiavimus.

Paskutinėje tyrimo dalyje, naudojant sukurtą matematinį traukinio modelį, pagal literatūros analizėje pastebėtus energijos sąnaudų mažinimo principus, patobulinta

eksperimentinės kelionės greičio kreivė. Degalų sąnaudos sumažėjo 14,5 %. Įsitikinus, kad panaudoti traukinio valdymo būdai veiksmingai mažina energijos sąnaudas, jie siūlomi kaip gairės, kurias galima pritaikyti taupant energiją bet kokiam riedmenų tipui ir geležinkelio ruožui.

Darbo objektas – keleivinių traukinių energijos sąnaudų mažinimo būdai.

Darbo tikslas – atlikti keleivinių traukinių energijos sąnaudų priklausomybės nuo važiavimo būdo tyrimą ir pasiūlyti efektyvų riedmens valdymo planą.

Darbo uždaviniai:

1. Atlikti mokslinėje literatūroje siūlomų idėjų kaip minimizuoti traukinių energijos sąnaudas, analizę.
2. Atlikti bandomąją kelionę ir surinkti realius traukinio PESA 730ML degalų sąnaudų duomenis ruože Vilnius–Turmantas.
3. Atlikti skirtingų riedmenų degalų sąnaudų statistinę analizę ruože Vilnius–Turmantas.
4. Sukurti matematinį traukinio modelį energijos sąnaudoms skaičiuoti pagal greitį.
5. Atlikti matematinio traukinio modelio tinkamumo patikrinimą.
6. Analizuojant matematinio modelio gaunamus duomenis, pasiūlyti ruožo Vilnius–Turmantas važiavimo greičio kreivę, kurią naudojant sumažėtų keleivinių traukinių energijos sąnaudos.
7. Pateikti išvadas.

1. Geležinkelių riedmenų energijos sąnaudų mažinimo galimybių analizė

Transporto sektoriuje išmetama ketvirtadalis viso Europos Sąjungos šiltnamio efektą sukeliančių dujų kiekio (ES Taryba, 2020). Siekiant sumažinti aplinkos taršą Europos Komisija priėmė energetikos, transporto, ir mokesčių politikos pasiūlymų rinkinį, vadinamą „žaliuoju kursu“. Iškeltas tikslas iki 2030 m. į aplinką išmetamų šiltnamio efektą sukeliančių dujų kiekį sumažinti bent 55 % lyginant su 1990 m., o iki 2050 m. – 90 % (Europos Komisija, 2019a). 2021 m. paskelbus geležinkelių metais, imta ieškoti būdų kaip populiarinti keliavimą ir krovinių vežimą traukiniais. Šiuo metu 75 % viso sausumos transporto ES vyksta keliais (ES Taryba, 2020). Turint aiškiai numatytus tikslus dėl aplinkos taršos mažinimo ir ES kuriamą potencialą pervežimų geležinkeliais didinimui, reikia ieškoti būdų kaip efektyvinti veiklą ir sumažinti traukinių energijos sąnaudas, kurios tiesiogiai susiję su išmetamųjų dujų kiekiu. Kitas aspektas, skatinantis taupyti traukinių energijos resursus – įmonės išlaidų mažinimas. 2023 metais energijos sąnaudos sudarė 10,2 % bendrų „LTG Link“ keleivių vežimo įmonės išlaidų („LTG Link“ 2023 metinės ataskaitos, 2024). Iš viso įmonė pagrindinei ir kitoms veikloms išleido 67,2 mln. Eur („LTG Link“ 2023 metinės ataskaitos, 2024), todėl dyzelino ar elektros energijos sąnaudų sumažinimas sutaupytų ženklų pinigų sumą.

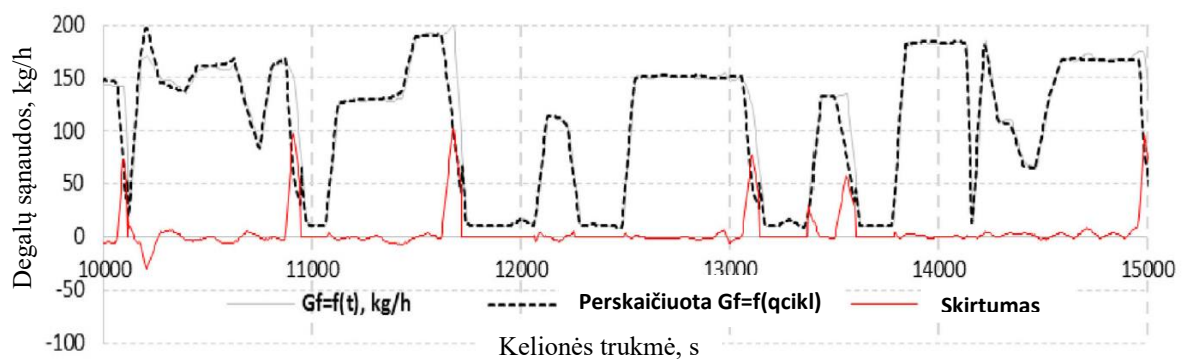
Kadangi „LTG Link“ įmonės siekiai yra pritraukti, motyvuoti ir išlaikyti aukštos kvalifikacijos bei kompetencijų darbuotojus; skatinti juos tobulėti („LTG Link“, 2021), riedmenų energijos sąnaudų mažinimo tyrimai bei pritaikymas praktikoje leidžia ugdyti mašinistų žinias, atsakingumą ir savimone. Nagrinėjant mokslinius straipsnius, kuriuose siekiama sumažinti riedmenų energijos sąnaudas, pastebėtos trys pagrindinės metodų grupės:

1. geležinkeliuose naudojamų technologijų tobulinimas;
2. traukinio optimalaus valdymo plano sudarymas;
3. traukinio optimalaus valdymo modeliavimas realiu laiku.

1.1 Geležinkelių sistemos tobulinimas

Siekiant sumažinti geležinkeliais judančių traukinių energijos sąnaudas, tobulinami visos sistemos komponentai – riedmenys, infrastruktūra ir eismo valdymas. Tradiciniuose lokomotyvuose su dyzeliniu vidaus degimo varikliu tiriamos variklio valdymo komponentų tobulinimo galimybės (Lebedevas et al., 2015). Atliekant technologinius bandymus tirta kaip degalų sąnaudas lemia dyzelinių variklių valdymo sistemos pereinamųjų režimų metu. Pereinamasis režimas variklyje pasireiškia didelio dažnio variklio greičio amplitudės bei

apkrovos pokyčiu per sąlyginai trumpą laiko periodą. Pereinamieji režimai sudaro nemažą dalį variklio darbo laiko ir dažniausiai vyksta greitėjimo ir lėtėjimo fazėmis. LTG atliktų tyrimų metu lyginant seno tipo 2M62 lokomotyvus su modernizuotais 2M62M, degalų sąnaudos pereinamųjų režimų metu sumažėjo 15–20 %. Degalų sąnaudų mažinimas vyksta dėl variklio darbo valdymo kompiuterių naudojimo, kurie atsižvelgiant į įvairius parametrus leidžia padidinti VDV efektyvumą. Nėgana to, valdant degimo procesą cilindre, galima sumažinti angliavandenilių, anglies monoksido ir azoto oksidų koncentraciją išmetamosiose dujose. Kadangi lokomotyvo valdymo įrenginių parametrų reikšmės iš bandomųjų kelionių buvo įrašomos tik grafiniu būdu, autoriai pritaikė būdą gautus grafinius rezultatus konvertuoti į skaitines reikšmes pagal pikselių kiekį ekrane ir atitinkamų taškų padėtį koordinatinių ašyse. Šios reikšmės naudotos darant pereinamųjų procesų skaitinį modeliavimą AVL BOOST programa. Taip pat šias reikšmes išfiltravus iš pastovių ir kintamų režimų, buvo galima palyginti skirtingus parametrus kelionėje. 1 pav. vaizduojami CAT 3512B–HD dyzelinio variklio valandinių sąnaudų duomenys kelionės metu, surinkti naudojant lokomotyvo valdymo sistemą ir grafiškai palyginti su variklio charakteristikomis, įvertintomis esant pastoviam režimui.



1 pav. CAT 3512B–HD VDV valandinių sąnaudų pasiskirstymas kelionės metu (Lebedevas et al., 2015)

Integravus degalų sąnaudų reikšmes, skirtumai neviršija 2–3 %. Bendros degalų sąnaudos kelionėje pateikiamos 1.1 lentelėje.

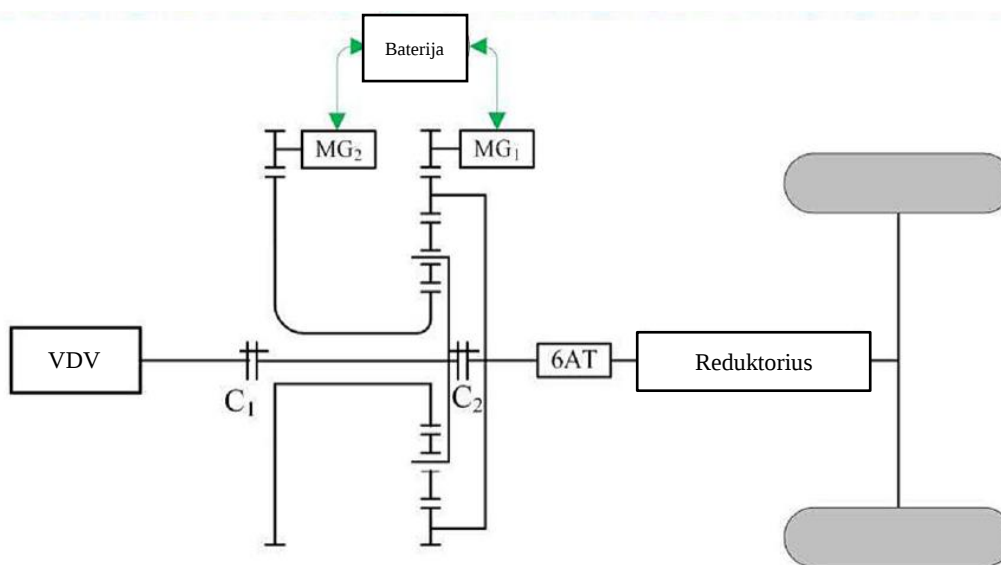
1.1 lentelė. Degalų sąnaudų rezultatai pagal skirtingas skaičiavimo metodikas (Lebedevas et al., 2015)

Nr.	Degalų sąnaudų nustatymo metodas	Degalų sąnaudos (kg)
1	„Lietuvos geležinkelių“ statistiniai duomenys	1209
2	Matematinis modeliavimas naudojant dyzelio pastovaus režimo veikimo charakteristikas	1268
3	Elektroninė valdymo sistema (remiantis lokomotyvo charakteristikomis pastoviu režimu)	1196
4	Elektroninė valdymo sistema (remiantis darbo režimais)	1212

Nustatyta, kad dėl lokomotyvo variklio valdymo sistemų darbo, tiriamų CAT 3512B–HD ir MTU 4000 R41 variklių degalų sąnaudos pereinamųjų režimų metu padidėja ne daugiau

kaip 3 %, lyginant su nusistovėjusiais režimais. Iš čia galima daryti išvadą, lokomotyvų valdymo sistemos efektyviai valdo dyzelinį variklį pereinamųjų režimų metu.

Hibridinės traukos technologijos vis dažniau naudojamos geležinkelių transporte. Kinijos mokslininkai atliko tyrimą, kurio tikslas buvo pasiūlyti efektyvią hibridinio traukinio energijos valdymo strategiją, atsižvelgiant į skirtingų komponentų efektyvumo rodiklius (Li et al., 2023). Autoriai teigia, kad jų pasiūlytas modelis leidžia ne tik sumažinti energijos sąnaudas, bet ir važiuojančio traukinio triukšmo lygį, išlaikant keliamus dinامينius reikalavimus. Tyrime sukurtas automotrisės hibridinės traukos jėgainės ir pavaros modelis. Jos principinė schema pateikta 2 pav.



2 pav. Hibridinės automotrisės principinė traukos jėgainės ir pavaros schema: $MG_{1,2}$ – elektros varikliai, galintys veikti generatorių režimu; $C_{1,2}$ – jėgos perdavimo keitimo elementai; 6AT – 6 pavarų automatinė pavarų dėžė (Li et al., 2023)

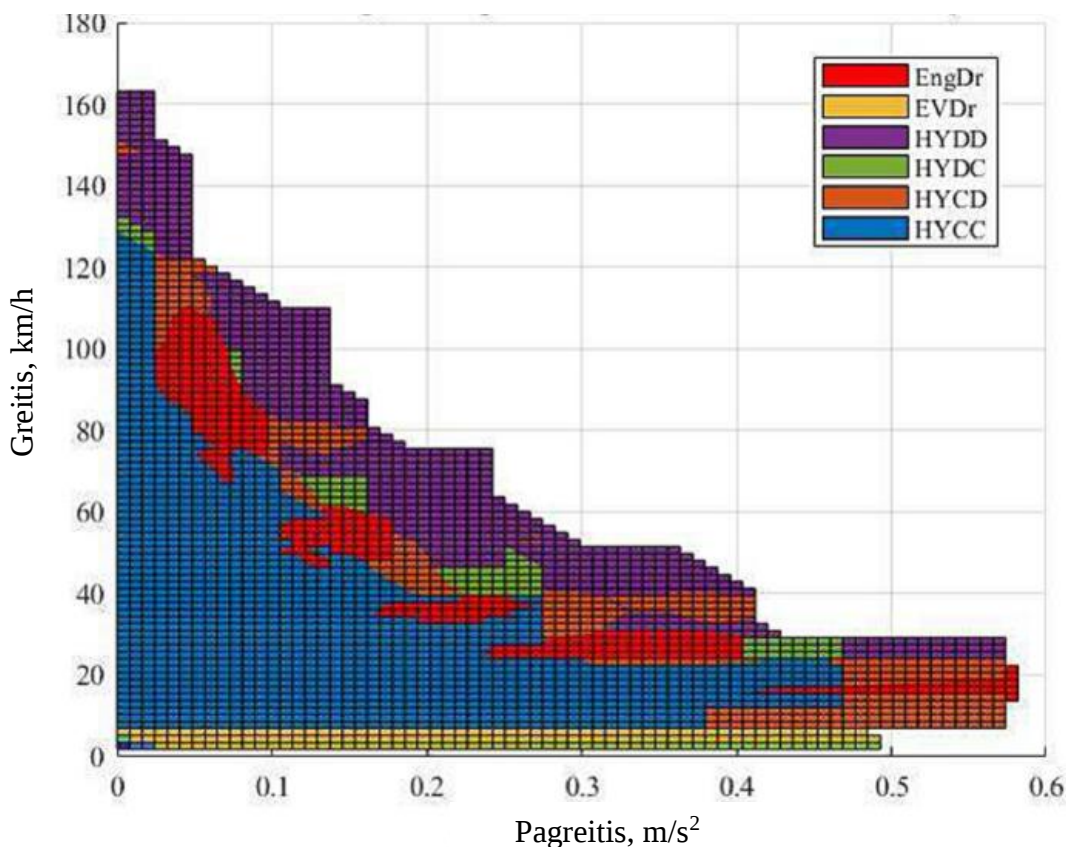
Modelyje panaudoti duomenys iš vidaus degimo variklio ir elektros variklių eksperimentų rezultatų – efektyvumo ir galios priklausomybės pagal sukimosi greitį ir sukimo momentą. Taip pat tirta baterijos įkrovos būsenos (angl. SOC - State of Charge) priklausomybė nuo aplinkos temperatūros. Baterijos įkrovos būseną yra santykinis dydis, kuris parodo galimos atiduoti energijos kiekį realiuoju laiku, lyginant su visu galimu sukaupti energijos kiekiu (MathWorks, Battery State of Charge, 2022). Atsižvelgiant į tai, siūlomas hibridinės jėgainės valdymo modelis kinta priklausomai nuo aplinkos sąlygų.

Ieškant optimalios hibridinės pavaros valdymo strategijos, tirti traukos pavaros naudingumo rodikliai esant skirtingoms būsenoms. Išskirtos šešios būsenos:

1. judėjimas naudojant tik VDV, toliau vadinamas EngDr;
2. judėjimas naudojant tik abu EV, toliau vadinamas EVDr;

3. hibridinis judėjimas naudojant VDV, ir abu EV traukai, toliau vadinamas HyDD;
4. hibridinis judėjimas naudojant VDV, kai 1-asis EV naudojamas traukai, o 2-asis baterijai krauti, toliau vadinamas HyDC;
5. hibridinis judėjimas naudojant VDV, kai 1-asis EV naudojamas baterijai krauti, o 2-asis traukai, toliau vadinamas HyCD;
6. hibridinis judėjimas naudojant VDV, ir abu EV baterijos krovimui, toliau vadinamas HyCC.

Šių būsenų naudingumo koeficientų rodikliai sudėti į lygčių sistemą ir ieškota maksimali sistemos naudingumo reikšmė visame traukinio greičio ir pagreičio diapazone. Taip nustatyta, kokią traukos jėgainės būseną naudoti efektyviausia, priklausomai nuo nustatytos greičio ir pagreičio komandos. Optimali hibridinės traukos pavaros būsenų naudojimo priklausomybė pagal greitį ir pagreitį pateikiama 3 pav.

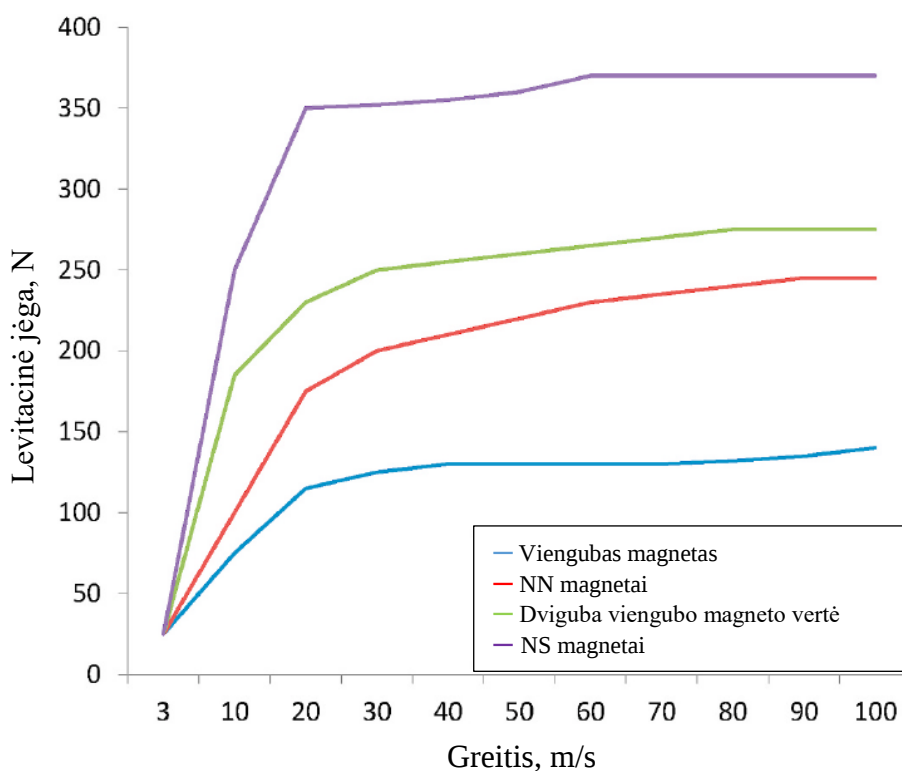


3 pav. Optimali hibridinės traukos pavaros būsenų naudojimo priklausomybė pagal greitį ir pagreitį (Li et al., 2023)

Siekdami patikrinti siūlomos hibridinės pavaros valdymo strategijos efektyvumą, autoriai atliko automotrisės imitacinį važiavimą. Pasirinktas 220 km ilgio ruožas su 11 sustojimų. Visuose tarpstočiuose pasirinktas 115 km/h greičio tikslas, taip pat siekta, kad baterijos įkrovos lygis nenusileistų žemiau 30 % lygio. Apskaičiavus gauta, kad vidutinės

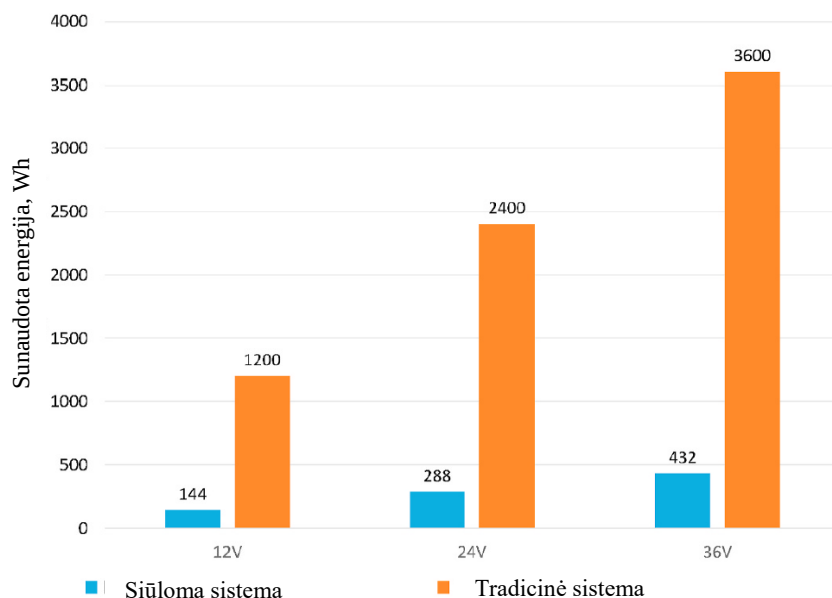
degalų sąnaudos hibridiniu režimu buvo 50,1 l/100 km, o tai yra 35,6 % mažiau nei naudojant vien VDV. Tokį rezultatą pavyko pasiekti efektyviai valdant elektros motorų darbą, kurie leido naudoti VDV tik ekonomiškiose jo režiuose. Įveikus visą ruožą baterijos įkrovos būseną buvo 65,7 %, o tai įrodo, kad traukos jėgainės valdymo strategija efektyviai palaiko balansą tarp energijos kaupimo baterijoje ir naudojimo. Iš tyrimo galima daryti išvadą, kad traukiniuose su hibridine pavara, energijos sąnaudos priklauso nuo traukos jėgainės būsenų valdymo efektyvumo.

Riedmenų energijos sąnaudas bandoma sumažinti net ir sąlyginai inovatyviose, nedaug paplitusiose geležinkelių šakose. Magnetinės levitacijos principu veikiantys traukiniai MAGLEV šiuo metu yra eksploatuojami tik trijose šalyse – Kinijoje, Japonijoje ir Pietų Korėjoje. Tai lemia labai didelę riedmenų ir jiems skirtos infrastruktūros kainą. Šie traukiniai pasižymi ypač dideliu konstrukciniu greičiu ir yra komfortiški keleiviams. Jie yra labai efektyvūs, nes nenaudojami ratai, skirtingai nuo tradicinių riedmenų, kuriuose susidaro trintis tarp rato ir bėgio. Tačiau mokslinėje literatūroje randama straipsnių, kuriais siekiama sumažinti MAGLEV traukinių energijos sąnaudas (Qadir et al., 2021). Tam pasiekti pasiūlytas sprendimas su elektrodinamine pagalve, naudojantis nuolatinius magnetus levitacijai kurti ir elektromagnetus traukai generuoti. Traukos jėgai generuoti pasiūlyta naudoti šiaurės (N) – pietų (S) polių konfigūraciją, nes pastebėta (4 pav.), kad tuomet kuriama jėga didesnė nei kitų – vieno polio magneto, šiaurė–šiaurė polių konfigūracijos ir sudvigubinto vieno polio magneto.



4 pav. Magnetų generuojama levitacinė jėga pagal traukinio greitį (Qadir et al., 2021)

Taip pat sistema tobulinama panaudojant elektromagnetų valdymo modelį, juos jungiant ne visus iš karto, bet tik reikalingus traukai palaikyti esamuoju laiko momentu. Mokslininkų pasiūlytas netradicinių magnetų ir jų valdymo naudojimas leidžia sumažinti sistemos energijos sąnaudas. Autoriai bandymus atliko pagaminę miniatiūrinį modelį, o gautų rezultatų diagrama pateikta 5 pav.



5 pav. Tradicinės ir siūlomos MAGLEV sistemų energijos sąnaudų skirtumai (Qadir et al., 2021)

Atlikti praktiniai bandymai parodė, kad naudojant pasiūlytą elektromagnetų valdymo modelį, energijos sąnaudos sumažintos iki 8,3 karto.

1.2 Keleivinio traukinio valdymo plano sudarymas

Traukos riedmens sąnaudas sumažinti padeda ir valdymo plano sudarymas atsižvelgiant į vieną ar kelis traukinį ir jo judėjimą veikiančius parametrus (Trivella et al., 2021). Atsižvelgiama į galiojančius apribojimus, tokius kaip tvarkaraštį, leistiną greitį, riedmenų technines charakteristikas. Toks planas padeda taupyti energijos resursus, tačiau pasikeitus sistemos veiksniams, gali tapti netinkamas. Viena iš aplinkybių, nuolat veikiančių traukinį yra oro sąlygos. 2021 m. atliktas tyrimas, smulkiai nagrinėjantis vėjo įtaką traukiniui. Jo pagrindu paimta riedmens pagrindinės lyginamosios varžos formulė (Bureika, 2021):

$$w_0 = a + b \cdot v + c \cdot v^2, \quad (1.1)$$

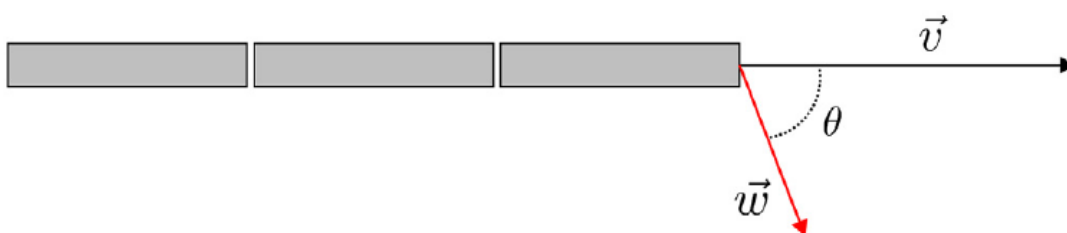
čia: a – empirinis koeficientas, įvertinantis mechaninės trinties nuostolių dalį;

b – empirinis koeficientas, įvertinantis ratų slydimo bėgiais ir energijos sklaidos dėl nuostolių dalį;

c – empirinis koeficientas, įvertinantis oro varžos dalį;

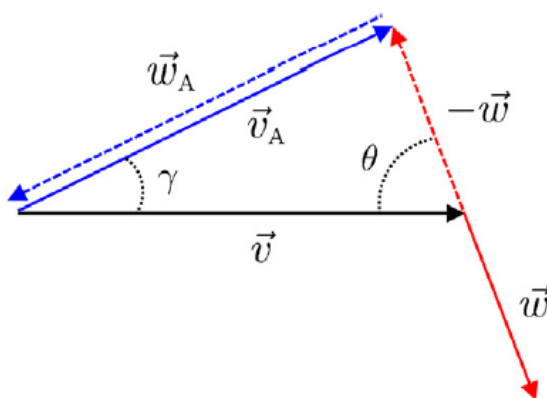
v – traukinio greitis, m/s.

1.1 formulėje oro pasipriešinimą vertinantis narys papildytas vėjo stiprumą ir kryptį bei traukinį veikiančią vėjo projekciją vertinančiais kintamaisiais. 6 pav. pateikiama vektorinė vėjo projekcija į traukinį:



6 pav. Vektorinė vėjo pasipriešinimo įtaka traukiniui: $\vec{v}$ – traukinio greičio vektorius, $\vec{w}$ – vėjo greičio vektorius, θ – vėjo atakos kampas (kampas tarp traukinio ir vėjo greičio vektorių) (Trivella et al., 2021)

Toliau gaunamas traukinio greičio reliatyvaus orui vektorius 7 pav.



7 pav. Judančio traukinio, reliatyvaus vėjui, vektorius $\vec{v}_A$ ir traukinį veikiantis reliatyvus vėjo vektorius $\vec{w}_A$ (Trivella et al., 2021)

Jo skaliarinė reikšmė gaunama iš formulės:

$$v_A = v_A(v, w, \theta) = \sqrt{(v - w \cos \theta)^2 + (w \sin \theta)^2}. \quad (1.2)$$

Vektorius $\vec{v}_A$ apibrėžiamas kaip traukinio ir vėjo greičių vektorių skirtumas ir gali būti suprantamas kaip judančio traukino patiriamo vėjo pasipriešinimas. Toliau aprašoma vėjo veikiamo traukinio šoninė projekcija:

$$\gamma = \gamma(v, w, \theta) = \arcsin\left(\frac{w \sin \theta}{v_A}\right). \quad (1.3)$$

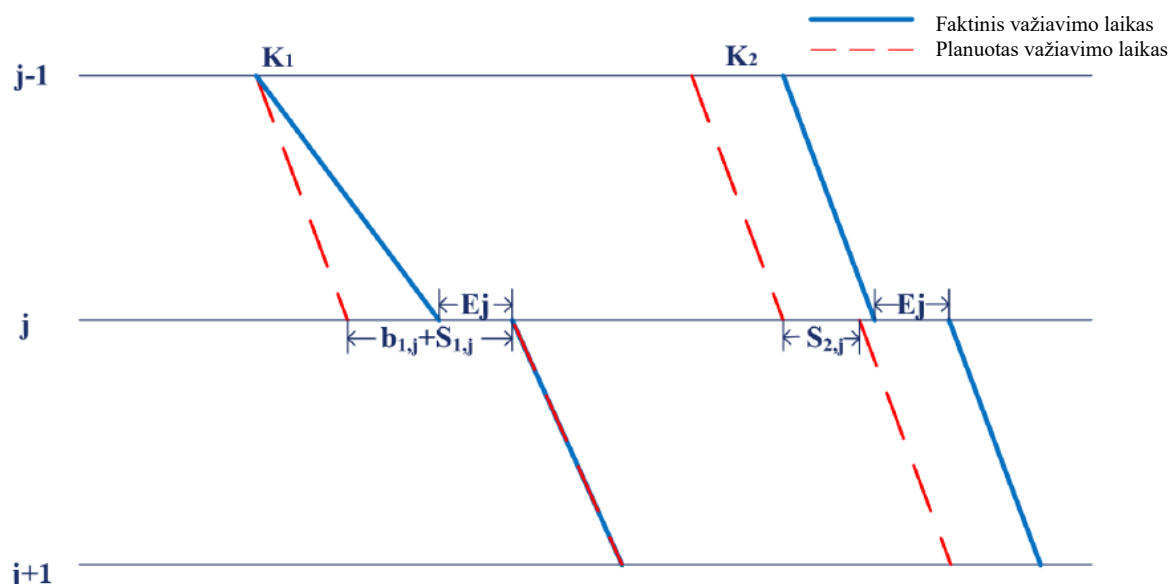
Panaudojus šias formules, 1.1 formulėje naudojamas oro varžos koeficientas modifikuojamas į lygtį:

$$c'(\gamma) = \frac{c}{hl} (\xi_1 hl |\cos \gamma| + \xi_2 hl |\sin \gamma|), \quad (1.4)$$

čia: h – traukinio aukštis, m;
 l – traukinio plotis, m;
 L – traukinio ilgis, m;
 ξ_1, ξ_2 – krypties parametrai.

Pagal 1.4 lygtį sukūrus matematinį modelį ir atlikus imitacinius važiavimus skirtingais važiavimo režimais ir vėjo parametrais gauta, kad energijos taupymas gali siekti 0-2 % esant silpniems ir iki 10 % esant priešpriešiniams stipriems vėjams. Autoriai pripažįsta, kad modelį galima tobulinti aprašant ir kitas oro sąlygas bei kurti valdymo plano atnaujinimą realiu laiku ir atvaizduojant riedmens valdymo komandas mašinisto asistavimo sistemose (angl. DAS – driver-advisory systems).

Riedmenų energijos sąnaudas galima sumažinti ir tobulinant traukinių važiavimo tvarkaraštį. Kinijos mokslininkai (Xie et al., 2021) publikuotame straipsnyje pateikia tvarkaraščio optimizavimo modelį, kurio pagrindinis tikslas sumažinti energijos sąnaudas, traukinių vėlavimo tikimybę ir kartu pervežti kuo daugiau keleivių. Geležinkelių keleivių pervežimo kompanijoms norint gauti didžiausią pelną reikia užtikrinti tvarkaraščio vykdymą, kad būtų efektyviausiai išnaudojami infrastruktūros pajėgumai. Mokslininkų žodžiais, gerai suplanuotas, dinamiškas tvarkaraštis gali sutrumpinti kelionės trukmę ir padidinti komercinę vertę. Taip pat, kadangi didžiausia energijos sąnaudų dalis tenka greitėjimui, sumažinus sustojimų skaičių, galima sumažinti didelę jos dalį. Tvarkaraštis planuojamas ieškant optimalaus sustojimų skirtingose stotyse skaičiaus atsižvelgiant į keleivių srautus ir efektyviai išnaudojant atsargos laiką stotyse, skirtą grafiko pasivijimui. Atsargos laiko ir jos sąryšio su vėlavimu grafinė išraiška pateikiama 8 pav.

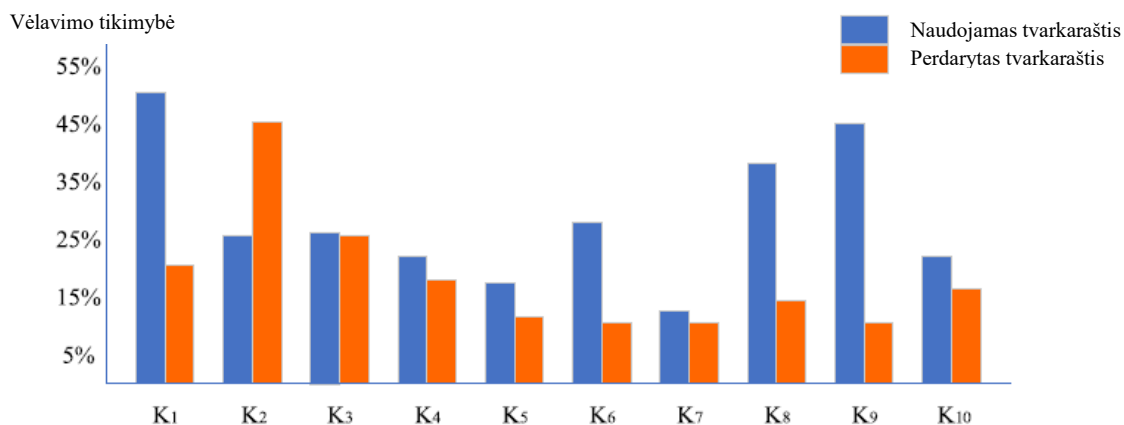


8 pav. Tvarkaraščio su ir be atsargos laiko grafinis pavyzdys: j – sustojimai, $K_{1,2}$ – traukiniai, $S_{1,2}$ – sustojimo laikai, b_1 – tvarkaraščio atsargos laikas, E – energija, sunaudota sustojimo metu (Xie et al., 2021)

Iš paveikslo matyti, kad naudojant atsargos laiką, užtikrinamas stabilesnis tvarkaraščio vykdymas, tačiau pailgėja bendras kelionės laikas. Planuojant tvarkaraštį, turi būti suderinti sustojimų kiekiai keleivių srautų poreikiams užtikrinti, tvarkaraščio vykdymo stabilumui užtikrinti ir sumažinti traukinių energijos sąnaudas. Optimizuojant tvarkaraštį išsikelti tikslai:

- sustojimų pasiskirstymas ir pervežimo galimybės turi atitikti keleivių srautus, kad būtų išvengiama situacijų, kai traukiniai atvažiuoja į stotį per dažnai arba per retai;
- sustojimo laikas turi būti nustatomas pagal keleivių srautus, kad bendra kelionės trukmė kuo mažiau prailgtų;
- to paties maršruto traukiniams sustojimų skaičius turi būti kuo panašesnis;
- kai numatytas sustojimas, keleiviui turi būti užtikrinama persėdimo galimybė;
- tolygiai paskirstyti tvarkaraščio atsargos laikus maršrute;
- mažinant sustojimų kiekį mažinti traukinių energijos sąnaudas greitėjimui ir stabdymui.

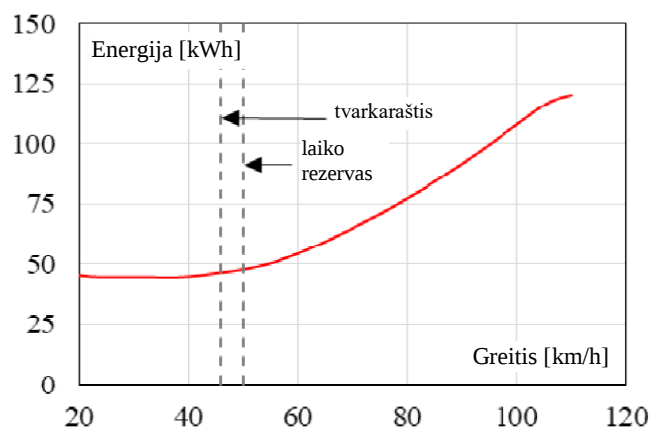
Mažinant sustojimų kiekį svarbu tinkamai įvertinti keleivių įlaipinimo/išlaipinimo užtikrinimą, kad jie turėtų galimybes persėsti į kitą traukinį ir kartu neturėtų jo ilgai laukti. Autoriai visas šias sąlygas išreiškia matematinėmis lygtimis ir jas sprendė paralelių genų metodu, kuris yra atsitiktinės atrankos metodas, ieškantis geresnio sprendimo per atranką, kryžminimą ir mutaciją. Naudojant pasiūlytą metodą sudarytas optimalus traukinių tvarkaraštis. Traukinių vėlavimo tikimybės pagal naujai sudarytą tvarkaraštį pateiktos 9 pav.



9 pav. Esamo ir optimizuoto tvarkaraščio traukinių vėlavimų tikimybių palyginimas (Xie et al., 2021)

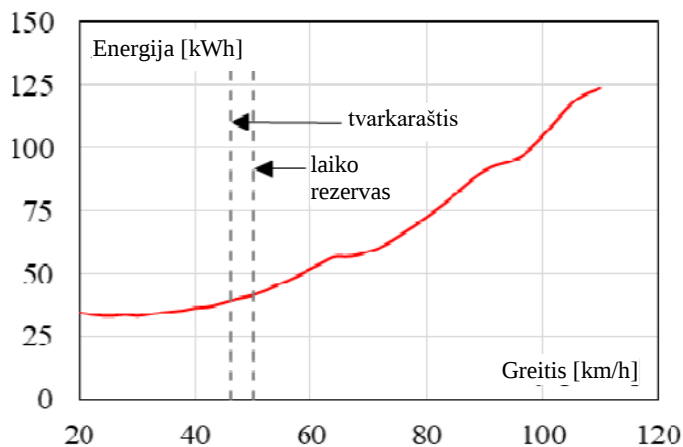
Bendrai punktualumas padidėjo 12,55 %, o energijos sąnaudos sumažėjo 8,16 %. Iš keleivio perspektyvos dėl punktualumo tikimybės padidėjimo bendra kelionės trukmė padidėjo vidutiniškai 3,1 min.

Gdansko technologijų universiteto mokslininkai energijos sąnaudas bandė sumažinti kurdami dalinį Tripolio geležinkelio ruožo modelį (Jakubowski ir Jarzebowicz, 2021). Pasirinktoje 5,8 km ilgio greitoje atkarpoje, mieste, įrengtas 3kV DC srovės kontaktinis tinklas. Juo važinėja trijų vagonų elektriniai traukiniai su indukciniais varikliais, leidžiančiais stabdyti rekuperaciniu būdu. Traukinio modelis sukurtas naudojantis „Matlab / Simulink“ programa, o jame panaudoti sisteminiai moduliai gali veikti nepriklausomai vienas nuo kito su pakankamai duomenų. Imitacinis važiavimas projektuotas išskiriant keturias važiavimo fazes – greitėjimą, pastovaus greičio palaikymą, riedėjimą bei stabdymą ir sustojimą. Didėjantis greičio palaikymo sistemos panaudojimas geležinkeliuose leidžia užtikrintai sumažinti energijos sąnaudas parenkant optimalaus greičio ribą. Atliktos simuliacijos parodė, kad naudojant pastovaus greičio palaikymo sistemą, energijos sąnaudos tiesiogiai priklauso nuo greičio, todėl mažesnis greitis padeda taupyti resursus. Energijos sąnaudų priklausomybės nuo greičio grafikas pateikiamas 10 pav.



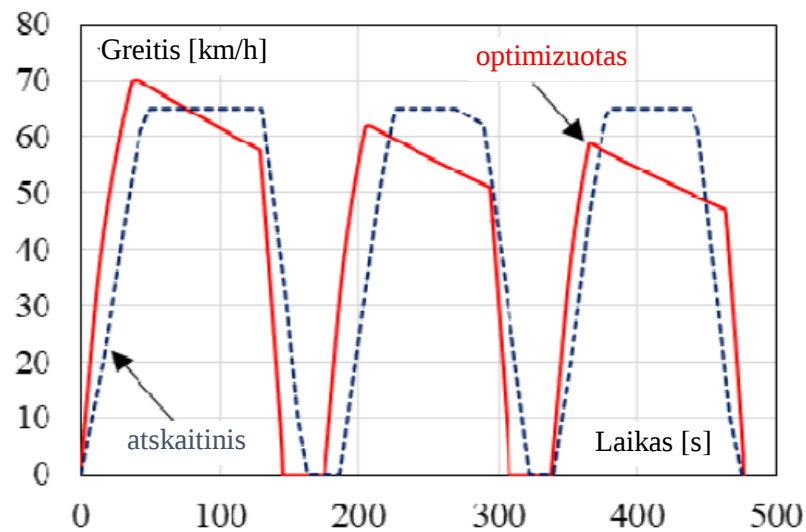
10 pav. Energijos sąnaudų priklausomybė nuo pastovaus greičio (Jakubowski ir Jarzebowicz, 2021)

Imitacinio važiavimo metu nustatyta, kad mažiausias energijos sąnaudas galima pasiekti važiuojant 46 km/h greičiu. Tačiau reikia atsižvelgti ir laikytis mažiausio greičio ribos, kuri atsiranda dėl tvarkaraščio apribojimų, todėl priimta, kad mažiausias galimas greitis turėtų būti 50 km/h. Padidinus greitį iki maksimalaus 105 km/h, ruožo įveikimo laikas sutrumpėja iki 6 min, tačiau energijos sąnaudos padidėja 2,5 karto. Ieškant optimalaus ruožo įveikimo būdo, pastebėta, kad energijos sąnaudas galima sumažinti taikant riedėjimo režimą. Imitaciniame važiavime priimta, kad traukinio greičiui sumažėjus 7 km/h nuo numatytos ribos, jis vėl didinamas. Energijos sąnaudų grafikas taikant riedėjimo taktiką pateikiamas 11 pav.



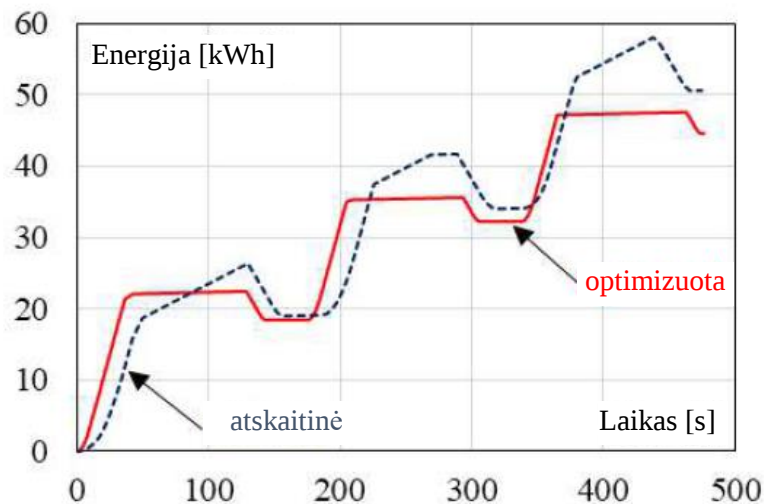
11 pav. Energijos sąnaudų priklausomybė nuo greičio riedant (Jakubowski ir Jarzebowicz, 2021)

Iš pateiktų grafikų matyti, kad riedant energijos sąnaudos yra mažesnės ~35 %. Nustatyta, kad išvengiant pastovaus greičio palaikymo, sumažinami pavaros mechaniniai bei inverterių nuostoliai, tačiau esant didesniai greičiui efektyviau išnaudojama variklių galia. Skaičiuojant optimalų ruožo įveikimo greičio profilį, naudota technika išsibėgėjus iki didesnio greičio traukiniui leisti riedėti iki stabdymo režimo. Autoriai siūlo optimalius važiavimo fazių taškus nurodyti kelio ženklais. Optimizuotas greičio profilis ruože pateikiamas 12 pav.



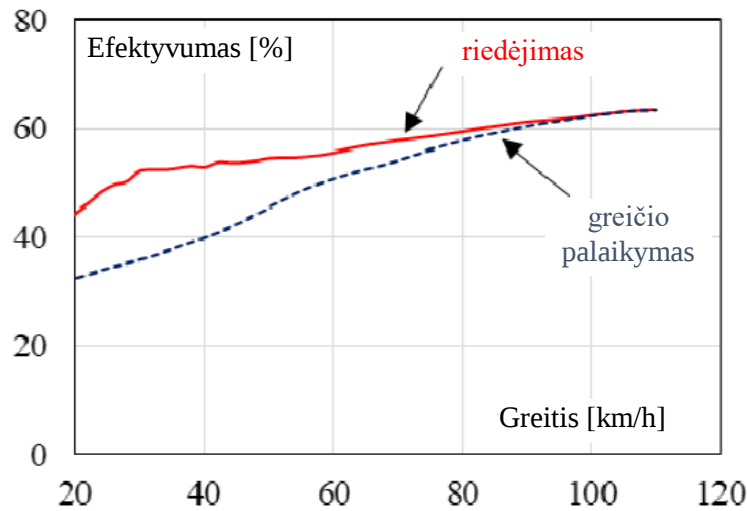
12 pav. Išmatuotas ir optimizuotas greičio profilis ruože (Jakubowski ir Jarzebowicz, 2021)

Taip pat energijos sąnaudos esant optimizuotam greičio profiliui pateikiamos 13 pav.



13 pav. Išmatuoto ir optimizuoto važiavimų energijos sąnaudos ruože (Jakubowski ir Jarzebowicz, 2021)

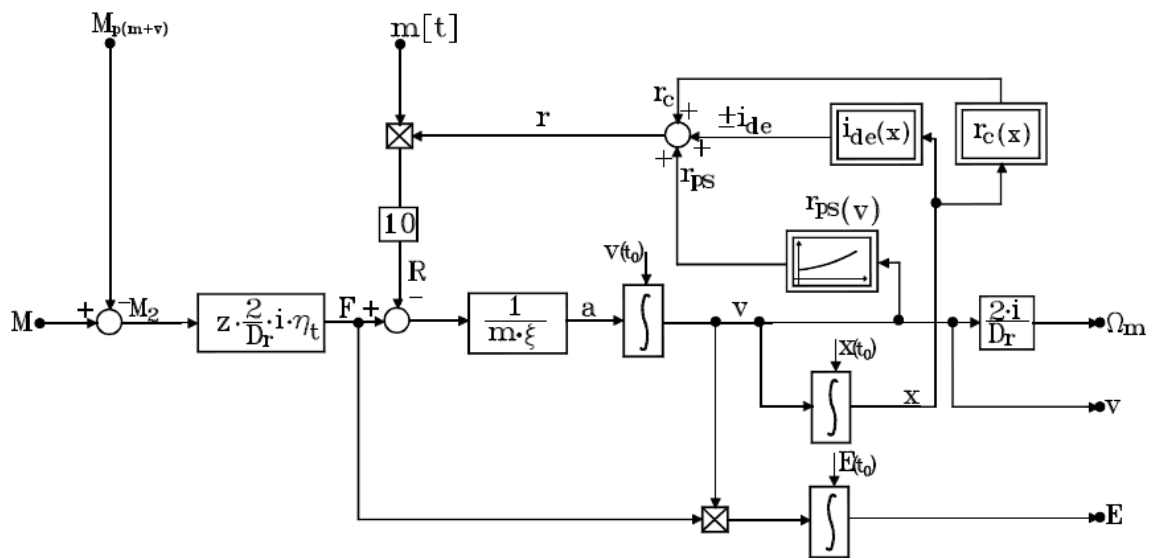
Dėl didesnio traukinio efektyvumo riedant ruože buvo stebimas iki 12 % energijos sąnaudų sumažėjimas lyginant su pastoviu greičio palaikymu. Taip pat gauta traukos pavaros efektyvumo priklausomybė nuo greičio pagal važiavimo fazę, kuri pateikiama 14 pav.



14 pav. Traukos pavaros efektyvumas pagal greitį ir važiavimo režimą

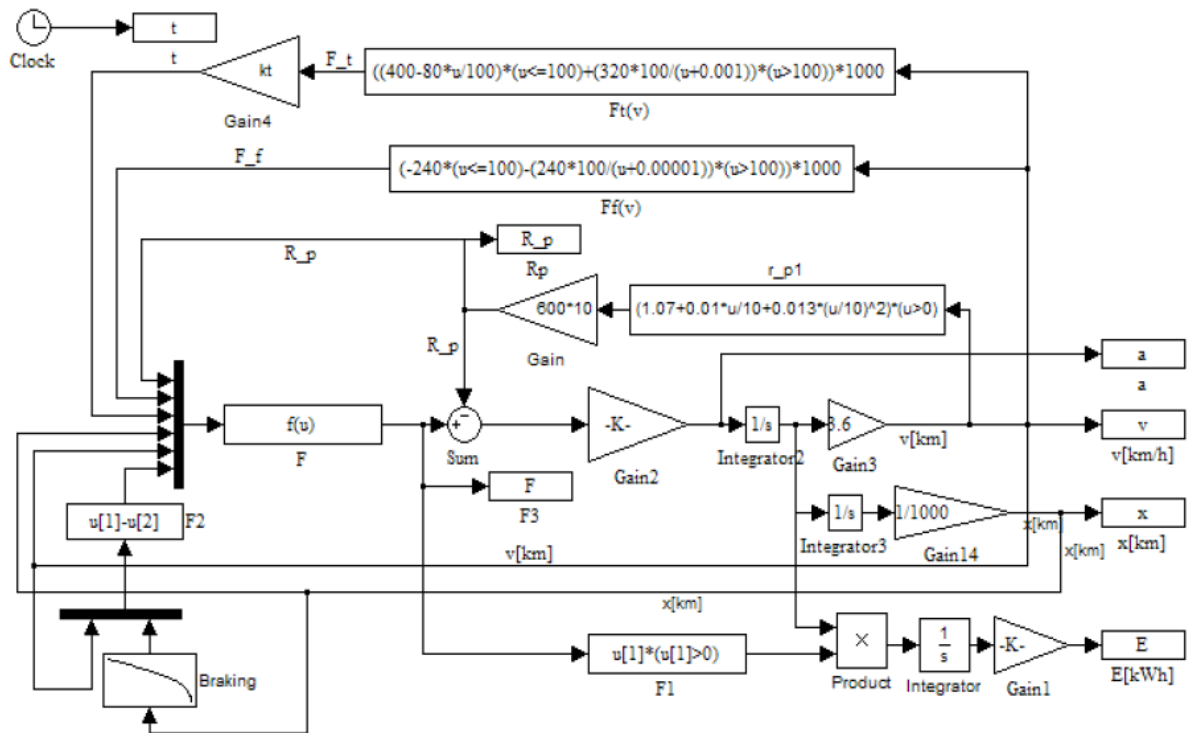
Riedėjimo technika ypač efektyvi esant 30–60 km/h greičiams. Straipsnyje aprašytas „Matlab / Simulink“ traukinio modelis rodo, kad energijos sąnaudų mažinimas galimas optimizuojant riedmens greitį ruožuose.

Rumunijos Krajojovos universiteto mokslininkai taip pat tyrinėja riedmenų energijos sąnaudų mažinimo būdus (Cismaru et al., 2014). Tyrimams sukurtas matematinis traukinio judėjimo modelis. Jo struktūrinė schema pavaizduota 15 pav.



15 pav. Matematinio traukinio judėjimo modelio struktūrinė schema (Cismaru et al., 2014)

Pagal matematines judėjimo lygtis imitacinio važiavimo tyrimams sukurtas „Matlab / Simulink“ modelis. Jo blokinė schema pavaizduota 16 pav.



16 pav. SIMULINK traukinio judėjimo modelio blokinė schema (Cismaru et al., 2014)

Įvairūs parametrai apskaičiuojami modeliui pateikiant duomenis apie riedmens kuriamas traukos, stabdymo ir varžos jėgas greitėjant, riedant, palaikant pastovų greitį ir stabdant. Koreguojant šių jėgų kreivę įveikiant ruožą galima daryti imitacinius važiavimus ir skaičiuoti įvairius parametrus, o tarp jų ir energijos sąnaudas.

Ieškant optimalaus ruožo įveikimo varianto išbandyti tiesinio modeliavimo ir Euristinės analizės (angl. Simulated Annealing) metodai (T. Xie ir kt., 2013). Tiesiniame modeliavime traukinio judėjimo kreivė nuolat keičiama (keičiama pastovaus greičio reikšmė, riedėjimo ir stabdymo pradžių momentai) stebint, kad ruožo įveikimo laikas nebūtų didesnis už numatytąjį ir ieškoma idealios vertės. Euristinėje analizėje apsibrėžiamas skaičiavimų skaičius, bet nesistengiama rasti idealios vertės. Generuojama nauja ruožo įveikimo diagrama, o energijos sąnaudos lyginamos su gautomis prieš tai ir nuolat ieškoma reikšmė mažėjimo kryptimi Algoritmų palyginimas pateiktas 1.2 lentelėje.

1.2 lentelė. Tiesinio modeliavimo ir euristinės analizės algoritmų rezultatų palyginimas (T. Xie ir kt., 2013)

Algoritmas	Žingsnių skaičius	Simuliacijos laikas (s)	Energijos sąnaudos (kWh)	Didžiausias greitis (km/h)
Tiesinis modeliavimas	2100	292	772,54	160
Euristinė analizė	1001	147	773,19	162

Euristinės analizės metodas leidžia išvengti sudėtingų matematinių skaičiavimų ir juos atlieka du kartus greičiau nei tiesinis modeliavimas, o gaunami rezultatai labai panašūs.

1.3 Keleivinio traukinio valdymo modeliavimas realiu laiku

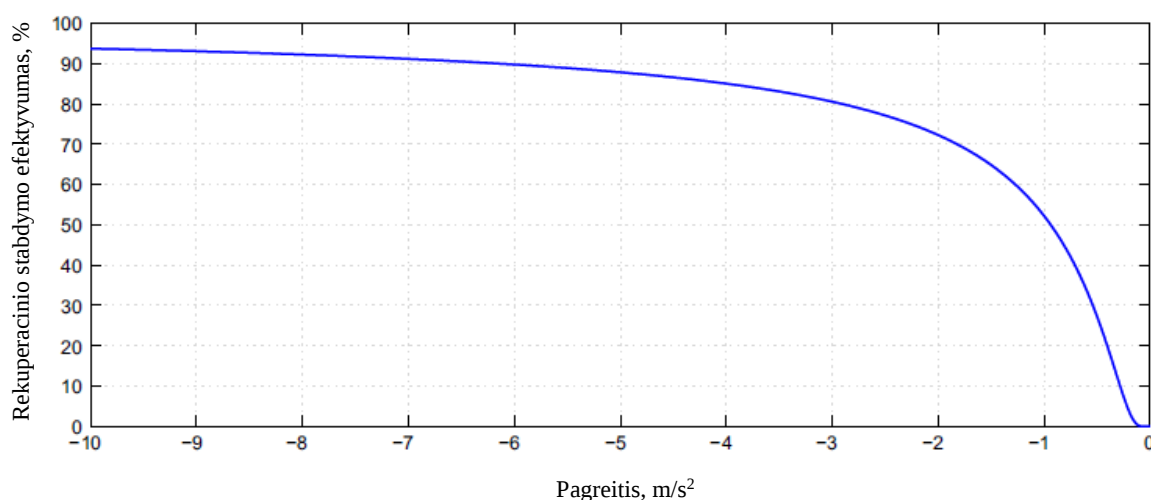
Efektyviai naudoti riedmens resursus ir mažinti energijos sąnaudas važiuojant pagal optimaliai sudarytą kelionės modelį gali padėti mašinisto asistavimo sistemos (angl. DAS – driver-assistance systems). Mašinisto asistavimo sistema, tai traukinyje veikianti sistema, pagal esamus parametrus pateikianti informaciją kaip užtikrinti tvarkaraščio laikymąsi pasirenkant tinkamą greitį ir išvengiant nereikalingo stabdymo (Darlington, 2019). Jos realiu laiku perskaičiuoja modelį, kad šis visuomet būtų optimalus. Sistemose atsižvelgiama į pagrindinius traukinio sistemą veikiančius parametrus.

Italijos mokslininkai savo moksliniame darbe (Montrone et al., 2017) iškėlė mintį, kad traukiniui nukrypus nuo tvarkaraščio, turi būti skaičiuojamas naujas važiavimo planas, tačiau dažniausiai nėra atsižvelgiama į energijos sąnaudas. Jų sukurtame modelyje atsižvelgiama į infrastruktūrą, eismo valdymą, didžiausią leidžiamą nukrypimą nuo planinio tvarkaraščio, riedmens parametrus, kelio parametrus ir siūlomas optimalus ruožo įveikimo algoritmas sudarytas iš keturių važiavimo režimų – greitėjimo, greičio palaikymo, riedėjimo ir stabdymo. Imitaciniame važiavime pasirinkta infrastruktūra iš 19 ruožų su 5 stotimis. Kiekvienas ruožas suskirstytas į 4 sektorius, skirtus keturiems važiavimo režimams. Priešingomis kryptimis paleisti traukiniai turi užduotį sustoti numatytose stotyse 20 s suplanuotu laiku. Taip modelis numato optimalius sustojimo laikus stotyse, taip pat nurodo kiekvieno ruožo įveikimo algoritmą skirtingais važiavimo režimais. Visa tai atliekama atsižvelgiant į traukinių energijos sąnaudų mažinimą. Modelis leidžia realiuoju laiku perdaryti tvarkaraštį pagal esamą situaciją ir mašinistui siūlyti optimalų riedmens valdymo režimą vykdant traukinio tvarkaraštį.

Ispanijos mokslininkai savo straipsnyje (Fernández-Rodríguez et al., 2018) taip pat sprendė traukinio tvarkaraščio vykdymo kokybės problemą, atsižvelgiant į mažiausias energijos sąnaudas. Jų pasiūlytas greitojo traukinio imitacinio važiavimo modelis įvertina parametrus, nuolat svyruojančius aplink nominaliąją vertę, pavyzdžiui numatytojo greičio išlaikymą pasirinktoje kelio apkarpoje. Tokiu būdu autoriai pasiūlo dydį, įvertinantį vėlavimo tikimybę, kuris, pasirinkus siūlomą važiavimo algoritmą, leidžia balansuoti tarp mažesnės vėlavimo rizikos arba riedmens energijos sąnaudų. Modelyje atliekamas traukinio imitacinis važiavimas prieš reisą, kuri kelionės metu optimizuojama pagal realius įvykius. Atliekant

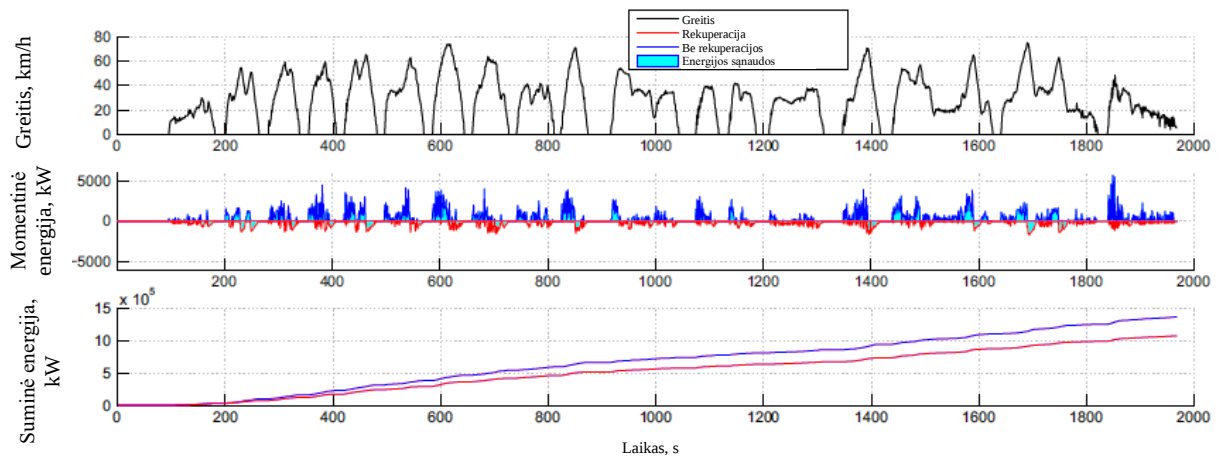
imitacijas, energijos sąnaudos buvo sumažintos iki 6,9 %, tačiau pabrėžiama, kad šis dydis labai priklauso nuo vežėjo tolerancijos vėlavimų rizikai.

Mokslininkų Wang ir Rakha publikuotas straipsnis (Wang ir Rakha, 2017) aprašo elektrinio traukinio modelio kūrimą, kuriame tiksliai nustatoma rekuperacinio stabdymo įtaka energijos sąnaudoms. Šis modelis naudodamas tik traukinio greitį leidžia realiu laiku stebėti elektros sąnaudas ir gali būti integruotas į ekonomišką vairavimo sistemas. Taip pat jį galima pritaikyti atliekant važiavimų imitacijas ir taip numatant energijos sąnaudų priklausomybę nuo greičio. Autoriai teigia, kad atlikus modelio validaciją, imituotos momentinės sąnaudos buvo 1,87 % didesnės kilometrui ir 2,31 % mažesnės keleivio vietos kilometrui. Taip pat tiksliau nustatyta rekuperacinio stabdymo efektyvumo kreivė pagal greitį, pateikiama 17 pav.



17 pav. Rekuperacinio stabdymo efektyvumas pagal greitį (Wang ir Rakha, 2017)

Iš priklausomybės matyti, kad rekuperacinio stabdymo efektyvumas mažėja eksponentiškai, esant pagreičiams, mažesniems nei 2 m/s^2 . Bendras greičio, momentinės ir sunaudotos energijų pasiskirstymai ruože pateikiami 18 pav.



18 pav. Greičio, momentinių energijos sąnaudų ir bendrų energijos sąnaudų pasiskirstymas ruože (Wang ir Rakha, 2017)

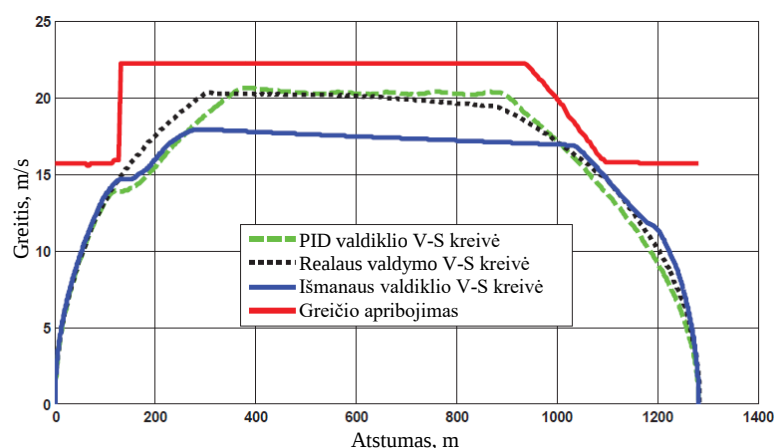
Iš grafikų matyti, kad taikant šį modelį tiriamame Čikagos metro ruože rekuperacinis stabdymas padeda iki 20 % sumažinti riedmens energijos sąnaudas. Modeliui veikti ir numatyti energijos sąnaudas nereikia momentinių parametrų iš riedmens, užtenka GPS koordinatų ir momentinio greičio, todėl jis gali būti lengvai panaudojamas DAS sistemose.

Pekino Jiatong universiteto mokslininkai atkreipė dėmesį į savivaldžių riedmenų trūkumus – siekiant užtikrinti optimalią greičio kreivę ruože, neatsižvelgiama į kontrolerio naudojimą (Yin ir Chen, 2013). Dažnas ir staigus kontrolerio padėčių keitimas lemia išaugusias sąnaudas ir mažina keleivių komfortą. Siūlomas sprendimas remiasi duomenų analize ir renkasi geriausių mašinistų riedmenų valdymo praktikas nenaudojant užsibrėžto greičio tikslo ruože. Didinant duomenų imtį modelis tobulėja ir gali geriau ir efektyviau susidoroti su užduotimi. Siekiant pagerinti keleivių komfortą, ir efektyvinti traukinio valdymą nustatytas taisyklių paketas, apibrėžiantis riedmens traukos naudojimą:

- pagreitis neturi viršyti $0,6 \text{ m/s}^2$ ribos;
- komfortui padidinti, kontrolerio padėčių pokytis neturėtų būti didelis, kaip ir periodas tarp padėčių keitimo;
- esant dideliui greičiui, traukinys turi būti paliekamas riedėti, stengiantis kaip įmanoma vengti traukos ar stabdžių naudojimo;
- traukos naudojimą turėtų reguliuoti tvarkaraščio vykdymo punktualumas – kol spėjama atvykti į stotį su laiko atsarga, riedėjimas turi būti išlaikytas, jei imama vėluoti arba važiuojama per greit, gali būti naudojama trauka ar stabdžiai. Tai padeda sutaupyti energijos;
- važiuojant reikia numatyti kito ruožo greičio apribojimus, kad būtų galima atitinkamai sumažinti ar padidinti greitį;

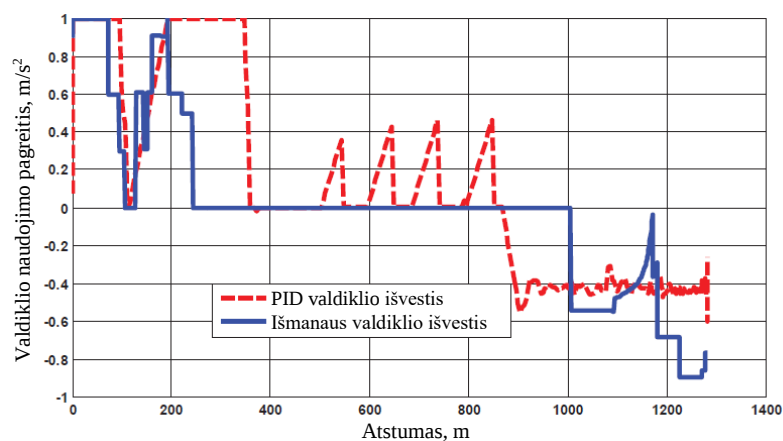
- stotyje siūloma sustoti kuo arčiau numatytos vietos, kad būtų išvengta vėlavimo įlaipinant/išlaipinant keleivius.

Matematinis modelis aprašytas naudojant „Matlab / Simulink“ programinę įrangą. Įtraukus riedmens, kelio, greičio ir infrastruktūros apribojimus galima daryti imitacinius važiavimus ir skaičiuoti energijos sąnaudas bei autorių išvestą dydį, randantį pagreičio pokyčių skaičių, komforto vertinimui. Atlikus imitacinį važiavimą pasirinktame ruože, palyginamos dažniausiai naudojamos proporcinio–integralinio kontrolerio reguliavimo (angl. PID – Proportional-Integral Derivative), realaus riedmens valdymo ir siūlomo optimizuoto kontrolerio reguliavimo greičio priklausomybės nuo traukinio pozicijos ruože, 19 pav.



19 pav. Riedmens greičio priklausomybė nuo pozicijos ruože esant skirtingiems valdymo būdams (Yin ir Chen, 2013)

Iš čia matyti, kad optimizuotas kontrolerio naudojimas palyginus su likusiais atvejais leido pasiekti mažesnę didžiausią greitį ruože, tačiau jį palaikė ilgesnį laiką. Kontrolerio naudojimo priklausomybė nuo traukinio pozicijos ruože pateikiama 20 pav.



20 pav. Kontrolerio naudojimo priklausomybė nuo pozicijos ruože (Yin ir Chen, 2013)

Vizualiai optimizuotas kontrolerio naudojimo modelis rečiau keičia padėtis taip užtikrindamas sklandesnį važiavimą. Skaitinėmis išraiškomis palyginama riedmens valdymo kokybė pateikiama 1.3 lentelėje.

1.3 lentelė. Skirtingų riedmens valdymo būdų kokybės palyginimas (Yin ir Chen, 2013)

Dydis	Proporcinis– integralinis valdymas	Realus važiavimas	Optimizuotas valdymas (kWh)
Važiavimo laikas (s)	97,6	96,2	98,6
Traukos/stabdymo perjungimų skaičius	12	4	4
Poveikio rodiklis (m/s^3)	0,115	0,083	0,065
Energijos sąnaudos	208,72	199,76	160,42

Lyginant su dažniausiai naudojamu proporcinio–integralinio reguliavimo (angl. PID) arba rankiniu riedmens valdymo režimu, pasiūlytas modelis energijos sąnaudas padėjo sumažinti atitinkamai 4,5 % ir 30,1 %, o komfortas pagerėjo 38,5 % ir 76,9%. Taigi siūlomas optimizuotas valdymo modelis naudojant efektyviausių mašinistų duomenų analizę leidžia pagerinti keleivių komfortą ir sumažinti energijos sąnaudas.

Mokslininkai atkreipia dėmesį, kad pagrindiniai faktoriai, lemiantys saugumą, tvarkaraščio vykdymo patikimumą, komfortą ir energijos sąnaudas yra žmogiškųjų sprendimų ir veiksmų pasekmė (Yurenko et al., 2018). Todėl geležinkelių valdymo strategija artimiausiu metu turėtų pradėti orientuotis į autonominį traukinio valdymą. Tokiam valdymui išbandyti mokslininkai sukūrė struktūrinį, matematinį ir simuliacijų modelius, kad būtų galima optimizuoti traukinių valdymo būdus. Renkantis valdymo strategiją, turi būti atsižvelgiama į eismo tvarkaraštį, greičio apribojimus, kelio profilį, kontaktinio tinklo įtampą, o valdymą lemiantys veiksniai yra tvarkaraščio tikslumas, traukos poreikis, išilginės dinaminės traukinio jėgos ir ratų sukibimo koeficiento dydis. Kurdami modelį mokslininkai pasiūlė išskirtinį bruožą – traukinys susideda iš kelių blokų, mechaniniai ir elektriniai procesai sprendžiami tolydziais modeliais, o valdymo procesai diskrečiais. Sprendinio ieškoma naudojant atsitiktinės ieškos metodus. Rezultatai patvirtina keleivinio traukinio modelio stochastinio optimizavimo efektyvumą, kuris paremtas kelių pradžių ir atkaitinimo modeliavimo procedūromis.

1.4 Mokslinės literatūros apžvalgos apibendrinimas

Mokslinėje literatūroje randami įvairūs riedmenų energijos sąnaudų mažinimo būdai. Vieni jų siūlo ieškoti naujų technologijų gaminant efektyvesnius riedmenis, tobulinti variklių valdymo sistemas. Kiti – optimizuoti tvarkaraštį ir riedmens valdymą važiuojant ruožu iš anksto

atsižvelgiant į apsibrėžtus parametrus. Tretieji siūlo optimizuoti važiavimo būdą nuolat sekant apsibrėžtus parametrus ir esamuoju laiku siūlant mašinistui efektyviausią valdymo būdą.

Literatūroje mažai užsimenama apie bendruosius energijos taupymo būdus valdant riedmenį. Palyginus su kitų straipsnių kiekiu, sunkiai randama informacijos, kokią valdymo planą galima pritaikyti ruože, kuris nėra gerai žinomas mašinistui ar esant kitoms, iš anksto nenumatytoms, sąlygoms. Ištyrus pagrindinius riedmens valdymo principus ir energijos sąnaudų priklausomybę nuo jų, šias žinias būtų galima pritaikyti mokant mašinistus važiuoti naujuose ruožuose ar valdant naujus riedmenis.

2. Keleivinių traukinių degalų sąnaudų analizė ruože Vilnius–Turmantas

Pagrindinis degalų sąnaudų analizės ruože Vilnius–Turmantas tikslas – palyginti vidutines DR1A ir PESA 730ML traukinių sąnaudas, ir atlikti išlaidų dyzelinui prognozę. Ši prognozė naudinga norint įvertinti papildomas eksploatacines išlaidas, kurios atsirastų, kai nuo 2026 metų ruožą Vilnius–Turmantas pradės aptarnauti modernesni ir patogesni traukiniai PESA 730ML („LTG Link“ strategija 2024–2050, 2023).

2.1 Keleivinių traukinių statistinė degalų sąnaudų analizė ir palyginimas

Statistinės degalų sąnaudų analizės imčiai naudoti traukinių sąnaudų rezultatų duomenys iš kelionių maršrute Vilnius–Turmantas–Vilnius. Naudoti DR1A ir PESA 730ML traukinių kelionių duomenys. Duomenys apie kelionių metu sunaudojamą degalų kiekį traukinių mašinistų įrašomi į *Microsoft PowerApps* pagrindu sukurtą aplikaciją T-44 ir saugomi *Microsoft SharePoint Online* duomenų bazėje. Atliekant statistinę analizę, duomenys naudoti iš ataskaitos, sukurtos naudojant *Microsoft PowerBI* įrankį. Ataskaitoje pateikiami tokie kiekvienos kelionės duomenys:

- data;
- traukinio serija;
- vagonų skaičius;
- įveiktas atstumas, km;
- kelionės maršrutas;
- sunaudotų degalų kiekis, l;
- sąnaudų vidurkis, l/km.

Tyrimui naudojami DR1A ir PESA 730ML traukinių kelionių duomenys nuo 2023-01-01 iki 2024-01-31. Siekiant nagrinėti dažniausiai naudojamą vagonų kompozicijas, į imtį atrinkti tik 3 vagonų dyzeliniai traukiniai. DR1A traukinių sąnaudų rezultatų imtį sudarė 2410 reikšmių, o PESA 730ML – 183 reikšmės. Skirtumas tarp imčių dydžių atsiranda, nes pagrindinis traukinių tipas, aptarnaujantis Vilnius–Turmantas ruožą yra DR1A, o PESA 730ML traukiniai naudojami tik išimtiniais atvejais.

Statistinė degalų analizė atliekama naudojant transporto mašinų patikimumo teoriją (Vestartas ir Nagurnas, 2004), vidutines traukinių sąnaudas prilyginant atsitiktiniams dydžiams. Darbo pradžioje surašoma variacinė eilutė – pradiniai duomenys apie atsitiktinius dydžius (surašoma reikšmių didėjimo tvarka). Šiuo atveju tai traukinių kelionių metu užfiksuotos

vidutinės degalų sąnaudos. Variacinė eilutė rodo atsitiktinio dydžio kitimo ribas. Iš šių duomenų sudaroma statistinė eilutė.

Statistinė eilutė sudaroma lentelės forma, kurioje nurodomas intervalo dydis, intervalo vidurio reikšmė T_{Vi} , atsitiktinio dydžio dažnis m_i , atsitiktinio dydžio statistinė tikimybė p_i ir integralinė statistinė tikimybė $\sum p_i$ (dar vadinama empyrine tikimybė). Dažnis m_i rodo, koks atsitiktinio dydžio reikšmių skaičius (iš bendro skaičiaus N) patenka į i – ajį intervalą.

Statistinė tikimybė p_i nustatoma kaip santykis atsitiktinio dydžio atsiradimo atvejų skaičiaus kiekviename intervale (m_i) su bendru informacijos (atsitiktinio dydžio reikšmių) skaičiumi (N):

$$p_i = \frac{m_i}{N}; \quad (2.1)$$

Toliau apskaičiuojame pasiskirstymo skaitines charakteristikas. Pirmiausiai apskaičiuojame degalų sąnaudų vidutinę matematinę reikšmę, arba vidutinės sąnaudas T_{vid} , pagal formulę:

$$T_{vid} = \sum_{i=1}^n T_{Vi} \cdot \frac{m_i}{N}; \quad (2.2)$$

čia: T_{Vi} – vidutinių sąnaudų reikšmė, atitinkanti i – ojo intervalo vidurį;
 n – statistinės eilutės intervalų skaičius.

Naudojant šią formulę vidutinės sąnaudos iš turimų duomenų DR1A traukiniams $T_{vid\ DR1A} = 0,9913$ l/km, o PESA 730ML – $T_{vid\ 730ML} = 1,2007$ l/km.

Sąnaudų nukrypimo (išsisklaidymo) laipsnis vidutinės reikšmės atžvilgiu charakterizuojamas vidutiniu kvadratinu nukrypimu σ , kuris apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n (T_{Vi} - T_{vid})^2 \cdot \frac{m_i}{N}}. \quad (2.3)$$

Naudojant šią formulę sąnaudų nuokrypis iš turimų duomenų DR1A traukiniams $\sigma_{DR1A} = 0,1156$ l/km, o PESA 730ML – $\sigma_{730ML} = 0,1541$ l/km.

Atsitiktinio dydžio išsisklaidymas charakterizuojamas ir santykinio dydžio – variacijos koeficientu v :

$$v = \frac{\sigma}{T_{vid} - T_p}; \quad (2.4)$$

čia: T_p – pradinis informacijos pasislinkimas, lygus pirmo intervalo pradžiai.

Paprastai pradinė informacija apima ribotos prabos duomenis apie atsitiktinio dydžio kitimą. Todėl pasiskirstymo eilutė atspindi realius reiškinius su tam tikra paklaida. Paklaidas

galima panaikinti, panaudojant teorinius pasiskirstymo dėsnius, kurie charakterizuoja santykį tarp galimų atsitiktinio dydžio reikšmių ir jų tikimybių.

Teorinį pasiskirstymo dėsnį galima parinkti pagal variacijos koeficiento dydį:

- jeigu variacijos koeficientas yra $v \leq 0,33$, parenkamas normalusis (Gauso) pasiskirstymo dėsnis;
- jeigu variacijos koeficientas $0,33 < v < 1,0$, parenkamas Veibulo pasiskirstymo dėsnis;
- jeigu variacijos koeficientas $v = 0,33$ ir vadinamasis pasiskirstymo dėsnio formos parametras $b=1$, parenkamas eksponentinis pasiskirstymo dėsnis.

Pagal 2.4 formulę, variacijos koeficientas DR1A traukiniams $v_{DR1A} = 0,24$, o PESA 730ML – $v_{730ML} = 0,30$, todėl abiem atvejais toliau naudojamas normalusis (Gauso) pasiskirstymo dėsnis.

Normaliajam (Gauso) pasiskirstymo dėsniui diferencialinei kreivei $f(T)$ sudaryti kiekvienam intervalui apskaičiuojamos teorinės tikimybės. Normaliojo pasiskirstymo diferencialinė funkcija, arba tikimybės tankis išreiškiamas lygtimi:

$$f(T) = \frac{A}{\sigma} \varphi_0 \left(\frac{T_{vid} - T_p}{\sigma} \right); \quad (2.5)$$

čia: A – intervalo plotis.

Skaičiuojant teorines tikimybes, $f_0(T)$ reikšmė nustatoma iš 2 priedo.

Iš turimų degalų sąnaudų duomenų apskaičiavus statistinius dydžius sudaromos statistinės eilutės atskirai DR1A ir PESA 730ML tipo traukiniams. DR1A tipo traukinių degalų sąnaudų statistinė eilutė pateikiama 2.1 lentelėje.

2.1 lentelė. DR1A traukinių degalų sąnaudų statistinė eilutė

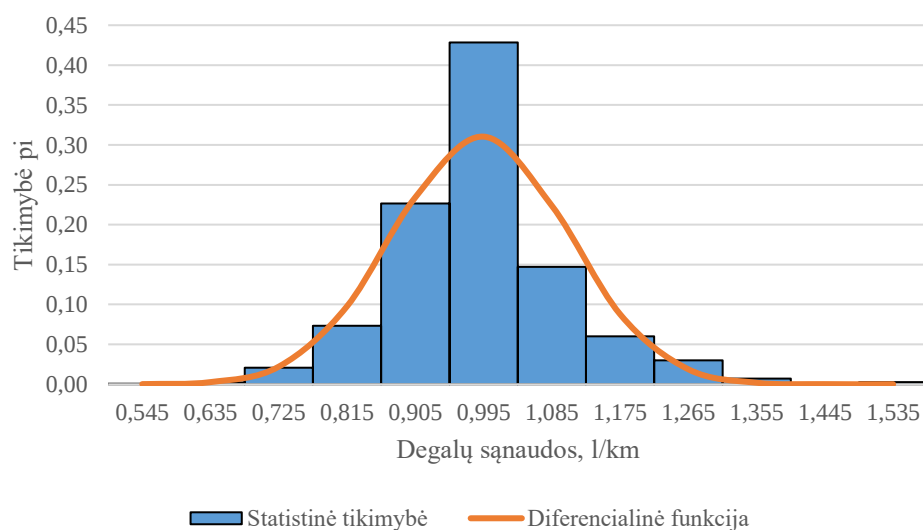
Intervalai (Sąnaudos, l/km)	0,5 –	0,59 –	0,68 –	0,77 –	0,86 –	0,95 –	1,04 –	1,13 –	1,22 –	1,31 –	1,40 –	1,49 –
Intervalo vidurys T_{vi}	0,59	0,68	0,77	0,86	0,95	1,04	1,13	1,22	1,31	1,40	1,49	1,58
Intervalo vidurys T_{vi}	0,545	0,635	0,725	0,815	0,905	0,995	1,085	1,175	1,265	1,355	1,445	1,535
Dažnis m_i	2	5	50	176	544	1029	353	144	72	17	3	6
Statistinė tikimybė p_i	0,0008	0,0021	0,0208	0,0733	0,2266	0,4286	0,1470	0,0600	0,0300	0,0071	0,0012	0,0025
Diferencialinė funkcija $f(T)$	0,0002	0,0027	0,0220	0,0978	0,2343	0,3104	0,2237	0,0877	0,0187	0,0019	0,0002	$5 \cdot 10^{-6}$

Tokiu pačiu principu PESA 730ML tipo traukinių degalų sąnaudų statistinė eilutė pateikiama 2.2 lentelėje.

2.2 lentelė. PESA 730ML traukinių sąnaudų statistinė eilutė

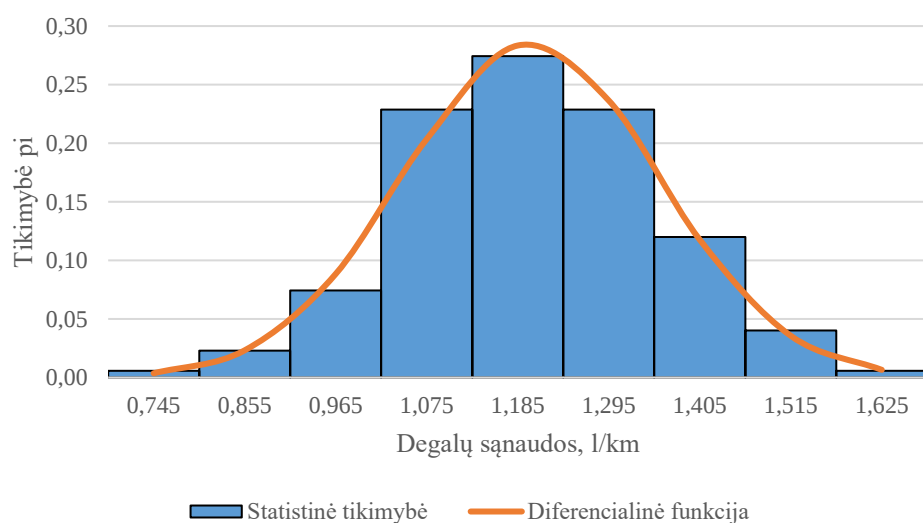
Intervalai (Sąnaudos, l/km)	0,69 –	0,8 –	0,91 –	1,02 –	1,13 –	1,24 –	1,35 –	1,46 –	1,58 –
	0,80	0,91	1,02	1,13	1,24	1,35	1,46	1,57	1,68
Intervalo vidurys T_{vi}	0,745	0,855	0,965	1,075	1,185	1,295	1,405	1,515	1,625
Dažnis m_i	1	4	13	40	48	40	21	7	1
Statistinė tikimybė p_i	0,0057	0,0229	0,0743	0,2286	0,2743	0,2286	0,1200	0,0400	0,0057
Diferencialinė funkcija $f(T)$	0,0036	0,0232	0,0884	0,2034	0,2834	0,2364	0,1176	0,0355	0,0065

Iš statistinės eilutės duomenų sudaroma histograma ir diferencialinė funkcija. DR1A vidutinių sąnaudų histograma ir empirinė diferencialinė funkcija pavaizduotos 21 pav.



21 pav. DR1A vidutinių sąnaudų histograma ir empirinė diferencialinė funkcija

PESA 730ML vidutinių sąnaudų histograma ir empirinė diferencialinė funkcija pavaizduotos 22 pav.



22 pav. PESA 730ML vidutinių sąnaudų histograma ir empirinė diferencialinė funkcija

Integralinė funkcija arba pasiskirstymo funkcija $F(T)$ gaunama, integravus diferencialinę funkciją $f(T)$ pagal formulę:

$$F(T_g) = F_0 \left(\frac{T_g - T_{vid}}{\sigma} \right); \quad (2.6)$$

čia: T_g – statistinės eilutės intervalo pabaigos reikšmė.

Integralinei kreivei $F(T)$ sudaryti apskaičiuojamos ordinatų reikšmės intervalų pabaigoje. Skaičiuojant teorines tikimybes, $F_0(T)$ reikšmė nustatoma iš 3 priedo. DR1A integralinių statistinių tikimybių reikšmės ir teorinės pasiskirstymo funkcijos reikšmės pateikiamos 2.3 lentelėje.

2.3 lentelė. DR1A intergalinių tikimybių ir teorinės pasiskirstymo funkcijos reikšmės

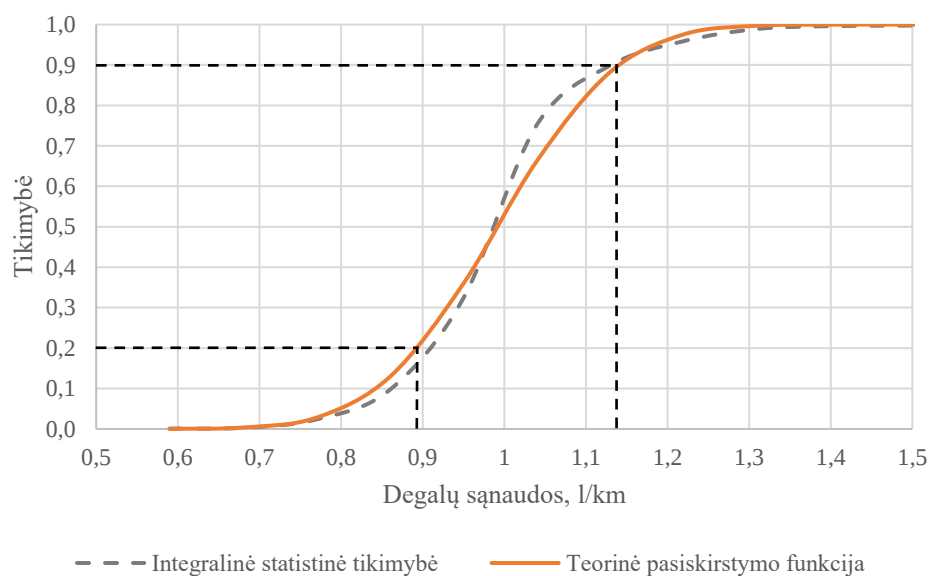
Intervalai (Sąnaudos, l/km)	0,5 –	0,59 –	0,68 –	0,77 –	0,86 –	0,95 –	1,04 –	1,13 –	1,22 –	1,31 –	1,40 –	1,49 –
	0,59	0,68	0,77	0,86	0,95	1,04	1,13	1,22	1,31	1,40	1,49	1,58
Integralinė statistinė tikimybė $\sum p_i$	0,0008	0,0029	0,0237	0,0970	0,3236	0,7522	0,8992	0,9592	0,9892	0,9963	0,9975	1
Teorinė pasiskirstymo funkcija $F(T)$	0,0001	0,0010	0,0107	0,0643	0,2266	0,5120	0,7910	0,9441	0,9911	0,9992	0,9999	1

PESA 730ML integralinių statistinių tikimybių reikšmės ir teorinės pasiskirstymo funkcijos reikšmės pateikiamos 2.4 lentelėje.

2.4 lentelė. PESA 730ML intergalinių tikimybių ir teorinės pasiskirstymo funkcijos reikšmės

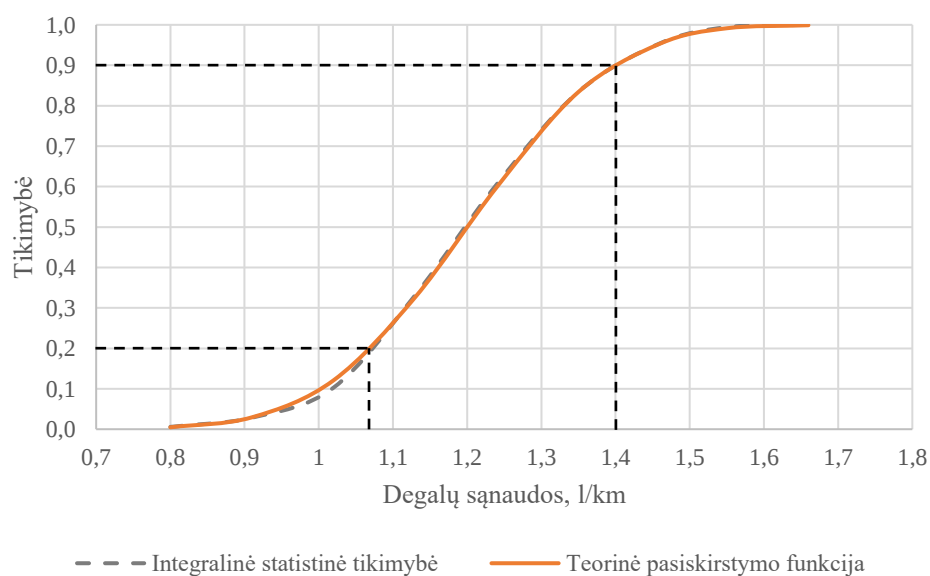
Intervalai (Sąnaudos, l/km)	0,69 –	0,8 –	0,91 –	1,02 –	1,13 –	1,24 –	1,35 –	1,46 –	1,58 –
	0,80	0,91	1,02	1,13	1,24	1,35	1,46	1,57	1,68
Integralinė statistinė tikimybė $\sum p_i$	0,0057	0,0286	0,1029	0,3314	0,6057	0,8343	0,9543	0,9943	1
Teorinė pasiskirstymo funkcija $F(T)$	0,0015	0,0126	0,0630	0,2061	0,4602	0,7291	0,9082	0,9793	0,9970

Iš 2.3 lentelės ir 2.4 lentelės duomenų sudaroma histograma ir diferencialinė funkcija. DR1A vidutinių sąnaudų integralinė statistinė tikimybių funkcija ir teorinė pasiskirstymo funkcija pavaizduotos 23 pav.



23 pav. DR1A vidutinių sąnaudų integralinė statistinė tikimybių funkcija ir teorinė pasiskirstymo funkcija

PESA 730ML vidutinių sąnaudų integralinė statistinė tikimybių funkcija ir teorinė pasiskirstymo funkcija pavaizduotos 24 pav.



24 pav. PESA 730ML vidutinių sąnaudų integralinė statistinė tikimybių funkcija ir teorinė pasiskirstymo funkcija

Iš teorinės pasiskirstymo funkcijos grafiko matyti, kad 70 % DR1A traukinių vidutinių degalų sąnaudų reikšmių ruože Vilnius–Turmantas svyruoja nuo 0,89 l/km iki 1,14 l/km arba 0,25 l/km režyje, o PESA 730ML – nuo 1,07 l/km iki 1,40 l/km, arba 0,33 l/km režyje. Platesnis vidutinių sąnaudų intervalas rodo, kad PESA 730ML vidutinės sąnaudos yra mažiau pastovios

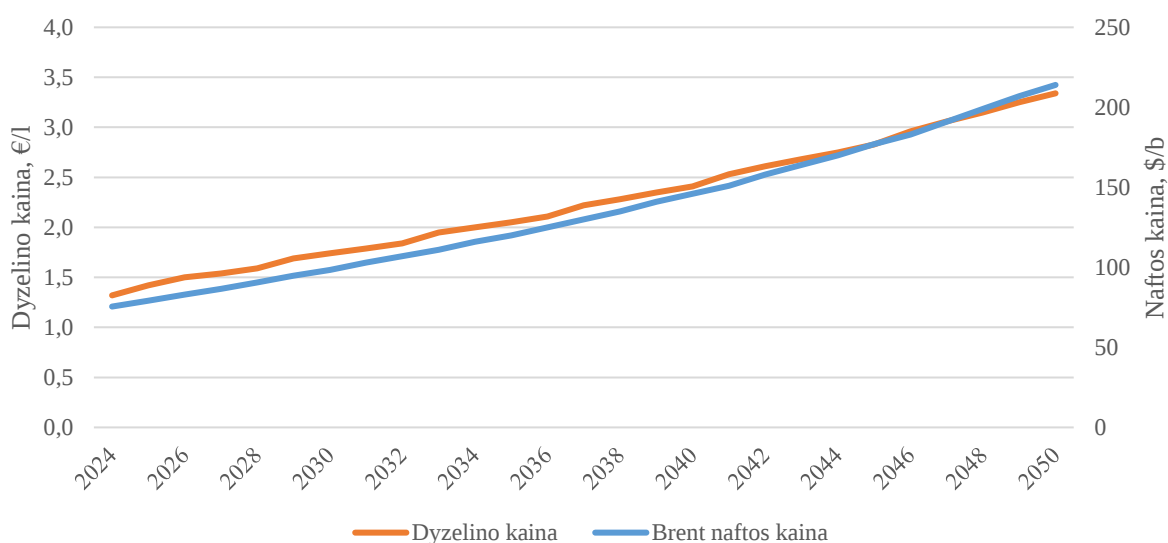
ir leidžia daryti prielaidą, kad dauguma mašinistų šiame ruože traukinį valdo neefektyviai. Efektyvus traukinio valdymo modelis leistų sumažinti vidutinių sąnaudų sklaidą ir vidurkį.

2.2 Keleivinio traukinio PESA 730ML sąnaudų ir išlaidų degalams prognozė

2026 Lietuvoje turėtų būti pradėti eksploatuoti nauji elektriniai ir elektriniai–bateriniai traukiniai („Nauji elektriniai traukiniai“, 2023). Pagal „LTG Link“ strategiją, jais bus aptarnaujamas Vilnius–Klaipėda ruožas, kuriame šiuo metu naudojami PESA 730ML traukiniai. Taip pat strategijoje numatyta, kad Vilnius–Turmantas ruožas, kuriame keleiviai vežami maršrutais Vilnius–Turmantas–Vilnius ir Vilnius–Ignalina–Vilnius, nuo 2026 bus aptarnaujamas naujesniais, modernesniais ir patogesniais PESA 730ML traukiniais, vietoje technologiškai ir morališkai pasenusių DR1A serijos traukinių („LTG Link“ strategija 2024–2050, 2023). Taip numatyta, nes DR1A traukinių resursas yra išnaudotas ir jie nebeatitinka keliamų komforto ir ergonomikos reikalavimų.

Strategijoje skaičiuojama, kad iki 2040 metų Vilnius–Turmantas–Vilnius ir Vilnius–Ignalina–Vilnius maršrutuose kasmet bus nuvažiuojama vidutiniškai 657 tūkst. km, o keleivių skaičius palaipsniui išaugti nuo 625 tūkst. iki 1,45 mln. („LTG Link“ strategija 2024–2050, 2023).

Vykstant šio vystymosi procesams ir mažėjant iškastinio degalų resursams, prognozuojama, kad iškastinės naftos, o kartu ir dyzelinio degalų kainos kils. Šių produktų prognozuojamas kainos pokytis iki 2040 metų („LTG Link“ strategija 2024–2050, 2023) pateikiamas 25 pav.



25 pav. Naftos ir dyzelino kainų prognozė

Naudojant 2.1 skyriuje apskaičiuotas vidutinę PESA 730ML degalų sąnaudų reikšmę – 1,2007 l/km ir strategijoje numatytą traukinių ridą ruože Vilnius–Turmantas bei prognozuojamas dyzelino kainas iki 2040 metų, apskaičiuojamos išlaidos dyzelinui. Jų suvestinė pateikiama 2.5 lentelėje.

2.5 lentelė. Prognozuojama išlaidų kitimo suvestinė

	Traukinių darbas, km	Dyzelino kainos prognozė, €/l	Išlaidos dyzelinui, 730ML, €
2026	657 022	1,50	1 183 329
2027	657 022	1,54	1 214 885
2028	657 022	1,59	1 254 329
2029	657 022	1,69	1 333 218
2030	657 022	1,74	1 372 662
2031	657 022	1,79	1 412 107
2032	657 022	1,84	1 538 328
2033	657 022	1,95	1 577 773
2034	657 022	2,00	1 617 217
2035	657 022	2,05	1 664 550
2036	657 022	2,11	1 751 328
2037	657 022	2,22	1 798 661
2038	657 022	2,28	1 853 883
2039	657 022	2,35	1 853 883
2040	657 022	2,41	1 901 216
Iš viso:			22 925 036

Iš suvestinės matyti, kad nuo 2026 iki 2040 metų vien PESA 730ML traukinių išlaidos degalams gali siekti maždaug 23 000 000 €. Išlaidų dyzelinui prieaugis tiesiogiai koreliuoja su dyzelino kainos kitimu ir traukinių dyzelino sąnaudomis, nes traukinių darbo pokytis pagal strategiją nenumatomas. Todėl, dyzelino sąnaudų sumažinimas sutaupytų ženklų pinigų sumą.

2.3 Eksperimentinė kelionė ruožu Vilnius–Turmantas

Viena iš tyrimo dalių – atlikta eksperimentinė kelionė ruože Vilnius–Turmantas. Jos metu surinkti duomenys apie degalų sąnaudas kiekviename tarpstotyje ir saugumo sistemos KLUB–U kasetėje įrašyta greičio kreivė, kuri vėliau naudojama palyginime su imitaciniais traukinio važiavimais.

Bandomoji kelionė atlikta 2024-01-02, keleiviniu traukiniu Nr. 662. Pagal tvarkaraštį jis išvyksta iš Vilniaus stoties 5,35 val. ir atvyksta į galinę stotį, Turmantą, 7,56 val. Kelionės metu atliekami sustojimai 9 stotyse, įveikiamas atstumas – 147 km. Reiso maršrutinis laikas 2,21 val., maršrutinis greitis 62,55 km/h, taip pat techninis laikas 2,03 val., techninis greitis

77,71 km/h. Vasaros laikotarpiu traukinys papildomai stoja Santakos, Pažeimenės, Žeimenos ir Pakretuonės stotyse.

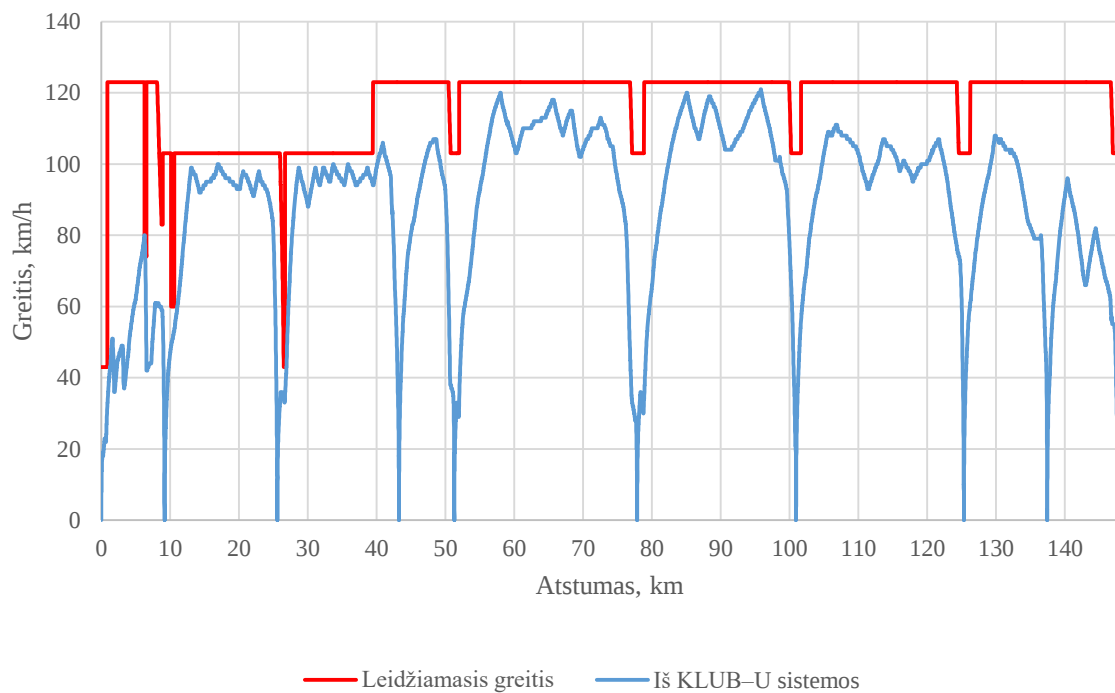
Trijų vagonų dyzeliniame traukinyje PESA 730ML yra trys degalų bakai. Du pagrindiniai, talpinantys po 1 500 l, sumontuoti galiniuose vagonuose su valdymo kabinomis, o trečias viduriniame vagone, 200 l tūrio, naudojamas tik autonominiam salono šildytuvui (730ML dokumentacija, 2016). Eksperimento metu, atvykus į kiekvieną stotį, pagal traukinio pagrindinio valdymo kompiuterio rodmenis nurašyti kuro likučiai pagrindiniuose degalų bakuose. Tuo tarpu autonominis šildytuvas nebuvo įjungtas. Apskaičiavus skirtumus tarp užfiksuotų reikšmių, gauti suminių ir vidutinių degalų sąnaudų rezultatai visuose tarpstočiuose. Taip pat nustatyti važiavimų tarpstočiais laikai, atitinkantys techninį laiką. Bandomosios kelionės metu užfiksuoti rezultatai pateikiami 2.6 lentelėje.

2.6 lentelė. Bandomosios kelionės metu užfiksuoti rezultatai

Tarpstotis	Atstumas, km	Tvark. laikas, s	Važiavimo laikas, s	Vid. greitis, km/h	Deg. sąnaudos, l	Vid. deg. sąnaudos, l/km
Vilnius–Naujoji Vilnia	9,2	660	771	42,88	17	1,85
Naujoji Vilnia–Bezdonys	16,4	720	777	75,90	23	1,40
Bezdonys–Pailgiai	17,6	1 080	839	75,85	26	1,48
Pailgiai–Pabradė	8,1	420	422	68,49	16	1,98
Pabradė–Švenčionėliai	26,6	1 440	1148	83,34	37	1,39
Švenčionėliai–Ignalina	23,0	1 080	992	83,78	35	1,52
Ignalina–Dūkštas	24,4	960	996	88,12	33	1,35
Dūkštas–Visaginas	12,3	600	573	76,09	20	1,63
Visaginas–Turmantas	10,4	480	575	63,92	13	1,25
Iš viso:	147,0	7 440	7093	73,15	220	1,49

Iš rezultatų matyti, kad bandomojoje kelionėje vidutinės degalų sąnaudos buvo 24 % didesnės už statistinį vidurkį. Taip pat galima pastebėti, kad techninis važiavimo laikas buvo 347 s mažesnis už numatytą tvarkaraštyje, o tarpstočių įveikimo laikai ženkliai skyrėsi Vilnius–Naujoji Vilnia, Bezdonys–Pailgiai, Pabradė–Švenčionėliai ir Visaginas–Turmantas ruožuose.

Svarbiausi eksperimento rezultatai kelionės metu išsaugoti traukinio saugumo sistemos KLUB–U kasetėje. Joje saugomi įvairūs parametrai, kintantys visos kelionės metu. Iš šios kasetės eksportuota greičio kreivė pagal atstumą, kuri pateikta 26 pav.



26 pav. Greičio kreivė pagal atstumą iš KLUB–U saugumo sistemos

Tyrimo metu saugumo sistemos greičio kreivė naudota matematinio traukinio judėjimo modelio validacijai ir lyginimui su atliktais imitaciniais važiavimais.

2.4 Keleivinių traukinių degalų sąnaudų analizės apibendrinimas

Užbaigus DR1A ir PESA 730ML traukinių dyzelino sąnaudų statistinę analizę ruože Vilnius–Turmantas galima išskirti kelis ypatumus. Iš pasiskirstymo teorinės integralinės funkcijos grafiko gauta, kad 70 % DR1A traukinių degalų sąnaudos ruože Vilnius–Turmantas svyruoja 0,25 l/km režyje, o PESA 730ML – 0,33 l/km. Platesnis PESA 730ML vidutinių sąnaudų intervalas leidžia daryti prielaidą, kad šio traukinio sąnaudų rezultatai yra išsidėstę mažiau pastoviai nei DR1A. Tai rodo, kad mašinistai naujesnį traukinį šiame kelyje valdo mažiau efektyviai, todėl optimalus riedmens valdymo planas būtų naudingas.

Pagal statistinę analizę sudarius išlaidų degalams prognozę, gauta, kad nuo 2026 iki 2040 metų PESA 730ML traukinių išlaidos degalams gali siekti maždaug 23 000 000 €. Todėl, degalų sąnaudų sumažinimas leistų sutaupyti ženklią pinigų sumą.

Atlikus eksperimentinę kelionę ruože Vilnius–Turmantas gauta keleivinio traukinio greičio kreivė, o užfiksuotos realios vidutinės degalų sąnaudos buvo 1,50 l/km.

3. Keleivinio traukinio judėjimo matematinis modelis

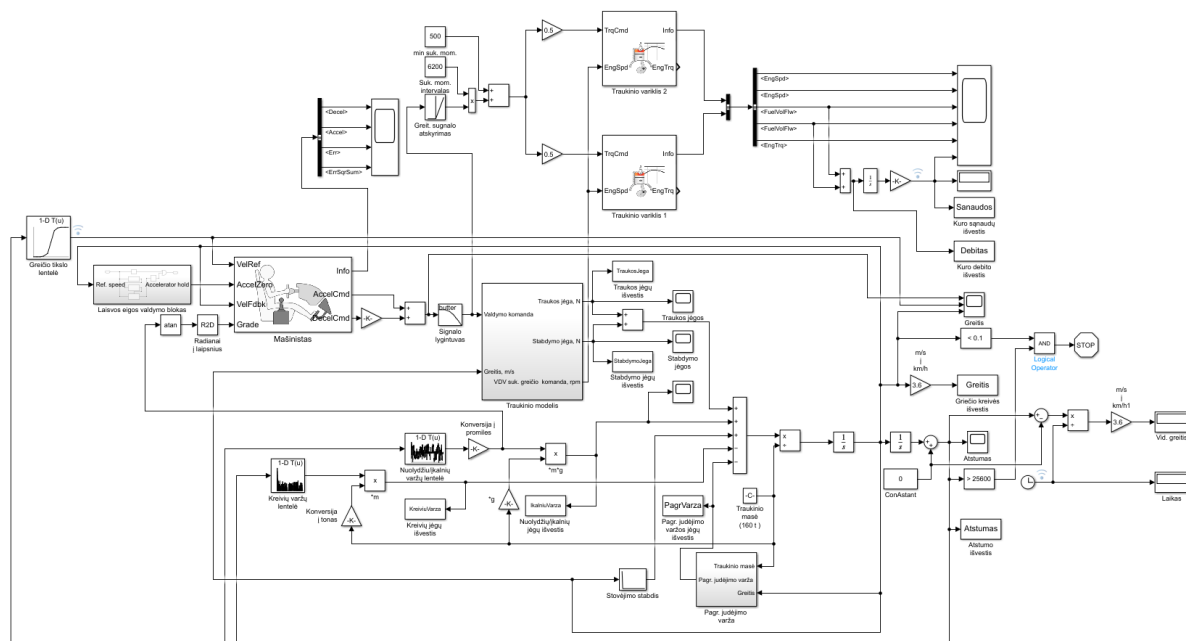
3.1 PESA 730ML modelio aprašymas

Baigiamojo magistro darbo metu sukurtas matematinis traukinio judėjimo modelis, skirtas modeliuoti ir įvertinti įvairius važiavimo metu kintančius parametrus. Modelio kūrimui naudotas „Matlab“ programinės įrangos modulis „Simulink“. Jis leidžia naudotis įvairių sistemų sudedamųjų dalių blokais, kurie yra matematiškai aprašyti, todėl vartotojui nereikia sudarinėti modelį aprašančių lygčių. Vartotojas renkasi, kokio detalumo modelį kurti ir kokius parametrus keisti.

Kuriant traukinio judėjimo matematinį modelį, panaudotas „Simulink“ bendruomenės nario Colin Cole pasidalintas traukinio modelis išilginės dinamikos tyrimui „Figure6_19_Locomotive_Vehicle_withGradesCurves“ (Cole, 2020). Jis labiausiai tinkamas magistro darbo tyrimui, nes turi galimybę vertinti kelio išilginį profilį bei kreives, o tai daro didelę įtaką traukos jėgai, kurią turi išvystyti traukos riedmuo, ir, atitinkamai, energijos sąnaudoms. Interneto autorius patalpinti modeliai yra viešai prieinami naudoti. Autorius nurodo, kad modeliai kurti pagal 2014 knygos „Design and Simulation of Rail Vehicles“ 6 skyrių „Longitudinal Train Dynamics“ (Spiryagin et al., 2014). Toliau šis modelis buvo modifikuojamas keičiant jo funkcinius blokus, kad jie būtų ekvivalentūs atitinkančio traukinio elementams bei charakteristikoms, taip pat blokuose būtų galima naudoti turimus duomenis. Taip pat pridėtas traukinio valdymo blokas, kuriuo sekama nustatyta greičio kreivė, ir VDV blokas, kuris leidžia skaičiuoti traukos riedmens degalų debitą ir sąnaudas.

Darbo metu sukurtas traukinio modelis imituoja judėjimą atsižvelgiant į jį veikiančias jėgas ir pagal tai skaičiuoja degalų sąnaudas. Jis tinkamas tirti su greitėjimu, lėtėjimu, riedėjimu ir kitais tiesiaieigio judėjimo tipais susijusius uždavinius. Modelyje įtraukti kelio įkalnės ir nuolydžius bei kreives simuliuojantys blokai, todėl juo galima tirti traukinio dinamines savybes konkrečiuose geležinkelių ruožuose, taip pat infrastruktūros savybių įtaką riedmenų judėjimui ir greičiui. Kurtas pagal PESA 730ML traukinio modelis, o kelio parametrai atitinka geležinkelio ruožą Vilnius–Turmantas.

SIMULINK programoje sukurtas PESA 730ML traukinio modelio schema pateikiama 27 pav.



27 pav. Traukinio modelio schema SIMULINK programoje

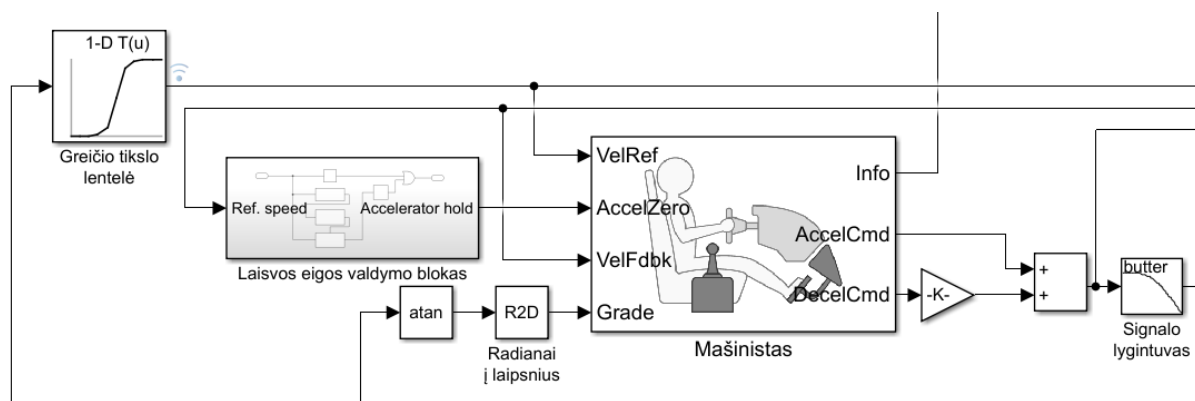
Iš schemos matyti, kad modelis yra sudarytas iš atskirų sisteminių blokų. Juose galima keisti objektą aprašančius parametrus. Tyrimų rezultatams stebėti po sisteminių blokų yra sukurti analizatoriai, o duomenų eksportui – įdėti blokai, registruojantys informaciją pagrindiniame darbalaukyje.

3.2 PESA 730ML modelio sudedamieji blokai

Bendras traukinio judėjimo modelis susideda iš atskirų sisteminių blokų, susietų veikimui būtiniais ryšiais. Šie sudedamieji blokai yra:

Traukinio greičio valdymo blokas – SIMULINK keleivinio traukinio valdymo blokas (schemoje „Mašinistas“), kurio pagrindinė užduotis yra sekti nustatytą greičio kreivę (MathWorks, „Longitudinal Driver“, 2017).

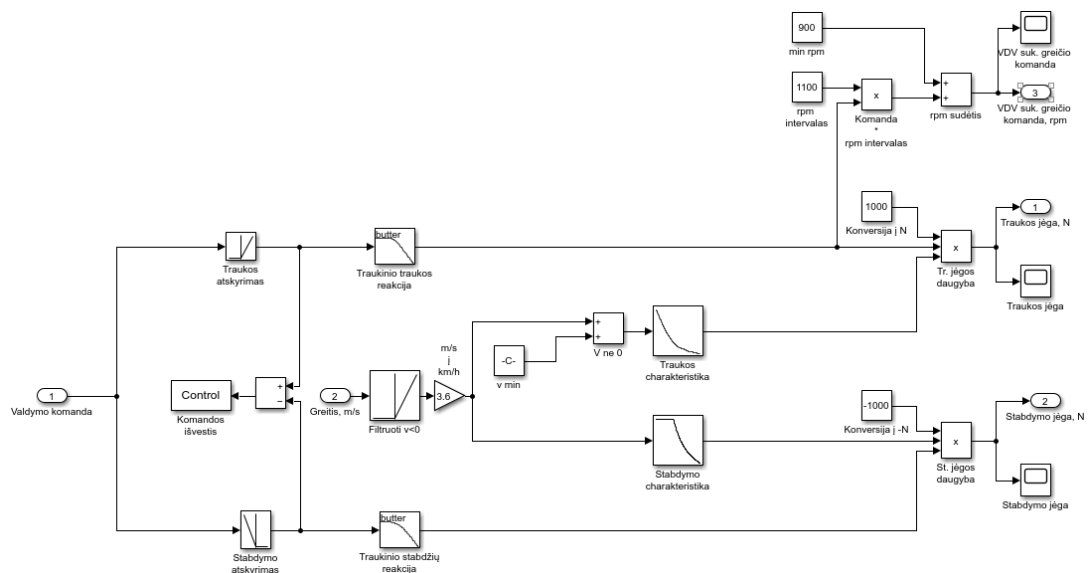
Greičio kreivė pateikiama lentelės pavidalu. Kartu į bloką ateina greičio grįžtamojo ryšio signalas, kuris naudojamas skirtumui tarp esamos ir nustatytos reikšmių rasti. Taip pat galima jungti ir esamą kelio įkalnę ar nuolydį, kurie modelyje paimami iš išilginio kelio profilio lentelės. Gaunamas rezultatas – greitėjimo ir lėtėjimo signalai, pateikiami intervalu nuo 0 iki 1. Traukinio valdymo blokas su susijusiais elementais pateikiamas 28 pav.



28 pav. Traukinio valdymo blokas su susijusiais elementais

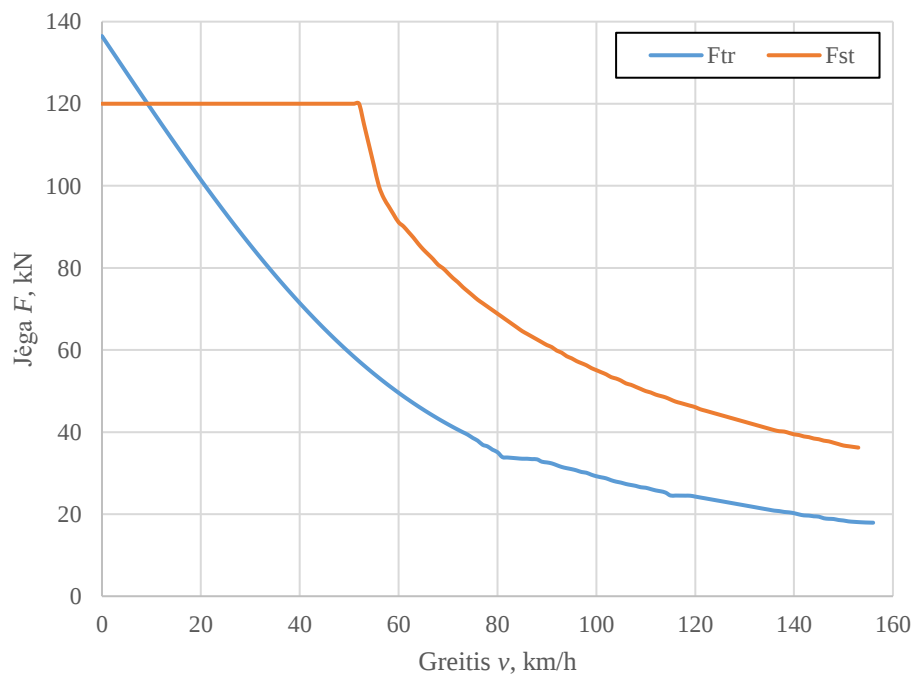
„Mašinisto“ bloke galima keisti įvairius parametrus, kurie keičia KT valdymo stilių. Matematiniam modelyje naudojamas greitį nuspėjantysis valdiklis. SIMULINK svetainėje rašoma: „Nustačius parametą „valdymo tipas“, į „Nuspėjantysis“, blokas įgyvendins optimalų valdymo modelį, kuris peržiūri vieną kelio tašką į priekį, sukurtą pagal C. C. MacAdam metodą. Modelis parodo mašinisto elgseną sekant kelią ir siekiant išvengiant kliūčių. Mašinistas peržiūri artėjantį kelią, kad galėtų sekti iš anksto nustatytu keliu.“ (MathWorks, „Longitudinal Driver“, 2017). Nagrinėjant traukinio modelio skaičiavimo rezultatus pastebėta, kad didžiausią įtaką greitėjimo ir lėtėjimo signalo charakteristikoms daro nustatyti peržiūrimo į priekį atstumo dydis ir mašinisto reakcijos laikas. Taip pat, tyrimui naudotas laisvos eigos valdymo blokas, kuriuo reguliuojamas greičio intervalas, kai traukinys rieda laisvąja eiga. Pagal šio bloko logiką keleivinis traukinys ima riedėti pasiekus numatytą viršutinę greičio ribą ir įjungia traukos režimą, kai greitis sumažėja iki apatinės nustatytos reikšmės.

Traukos riedmenis atitinkantis blokas – matematiniais sąryšiais aprašytas blokas, kuris iš greitėjimo ir stabdymo charakteristikų pagal esamą greitį ir valdymo komandą skaičiuoja traukos riedmenų sukuriamą jėgą. Taip pat, šis blokas pagal greitėjimo komandą sukuria VDV sukimosi greitį. Traukos riedmenis atitinkantis blokas pateikiamas 29 pav.



29 pav. Traukos riedmenis atitinkantis blokas

Kaip matoma iš schemos, signalas gaunamas iš valdymo bloko. Šis signalas išskiriamas į greitėjimo, kurio intervalas nuo 0 iki 1, ir lėtėjimo, kurio intervalas nuo 0 iki -1. Abu šie signalai pereina per filtrą, kuris atitinką realiame traukinyje atsirandančią komponentų reakcijos delsą. Taip pat, šis blokas gauna faktinę greičio reikšmę iš bendrų skaičiavimo rezultatų. Tuomet, pagal tai ar signalas greitinantis, ar lėtinantis, atitinkamai iš traukos arba stabdymo charakteristikų parenkama traukinio sukuriama jėgos reikšmė. PESA 730ML traukos ir stabdymo charakteristikos pagal greitį pateikiamos 30 pav.

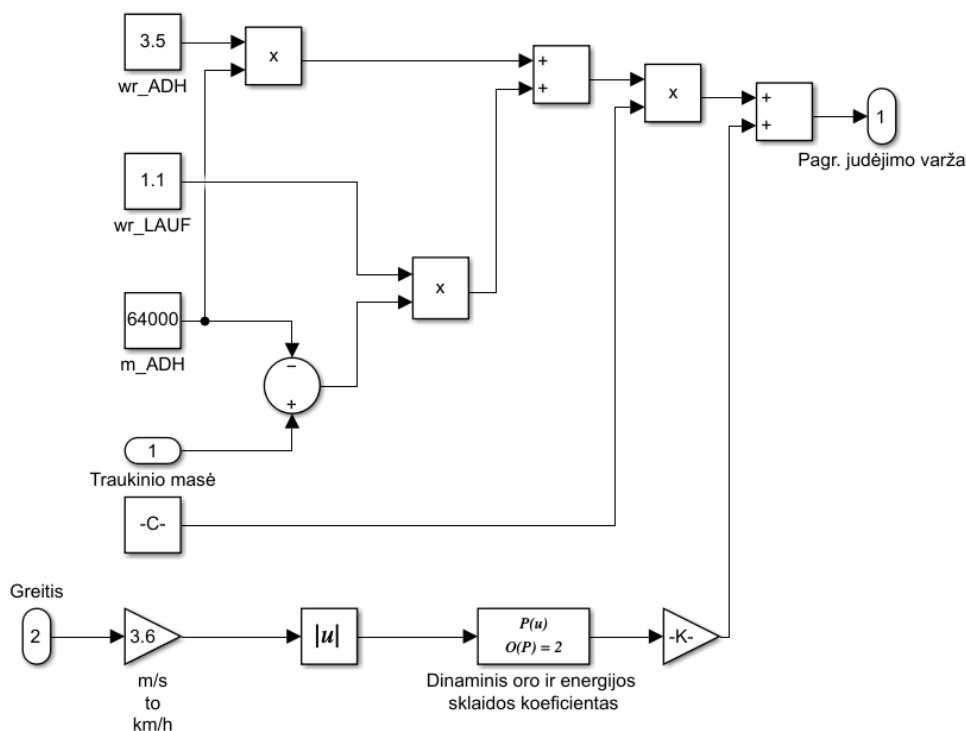


30 pav. PESA 730ML traukos ir stabdymo charakteristikos pagal greitį (730ML dokumentacija, 2016)

Atlikus matematinius konvertavimo veiksmus, šis blokas perduoda traukinio sukuriamų jėgų signalą kitiems skaičiavimams.

Pagrindinės judėjimo varžos blokas – matematinėmis formulėmis aprašytas blokas, pagal esamą greitį skaičiuojantis pagrindinės traukinio varžos sukuriamą jėgą, kurią sudaro trinties jėga ir energijos sklaida dėl nuostolių tarp bėgių ir ratų, taip pat oro pasipriešinimas.

Pagrindinės judėjimo varžos blokas pateikiamas 31 pav.



31 pav. Pagrindinės judėjimo varžos blokas

Jame naudojamos dvi matematinės formulės. Riedėjimo pasipriešinimą įvertinanti formulė (730ML dokumentacija, 2016):

$$a = (wr_{adh} \cdot m_{adh} + wr_{lauf} \cdot (m - m_{adh})) \cdot (0,001 \cdot g); \quad (3.1)$$

čia: wr_{adh} – lyginamoji riedėjimo ir ašidėžių varža, $wr_{adh} = 3,5$ N/kN;

m – traukinio masė, $m = 160$ t;

m_{adh} – traukinio sankibio masė, $m_{adh} = 4 \cdot 16$ t;

wr_{lauf} – lyginamoji pajudėjimo iš vietos varža, $wr_{lauf} = 1,1$ N/kN.

Oro pasipriešinimą įvertinanti formulė (730ML dokumentacija, 2016):

$$c = \frac{\frac{1}{2} cw \cdot A \cdot (b + v)^2}{0,1 \cdot g}; \quad (3.2)$$

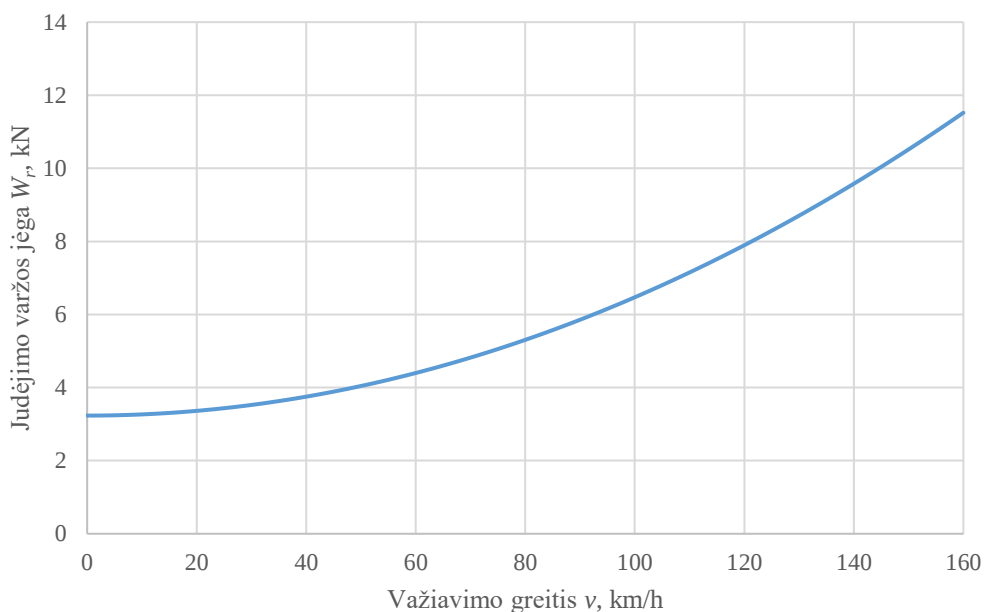
čia: cw – traukinio pasipriešinimo orui koeficientas, $c = 0,6$;

A – traukinio priekio projekcijos plotas, $A = 11 \text{ m}^2$;

b – empirinis koeficientas, įvertinantis ratų slydimo bėgiais ir energijos sklaidos dėl nuostolių dalį, $b = 0$;

v – judėjimo greitis, km/h.

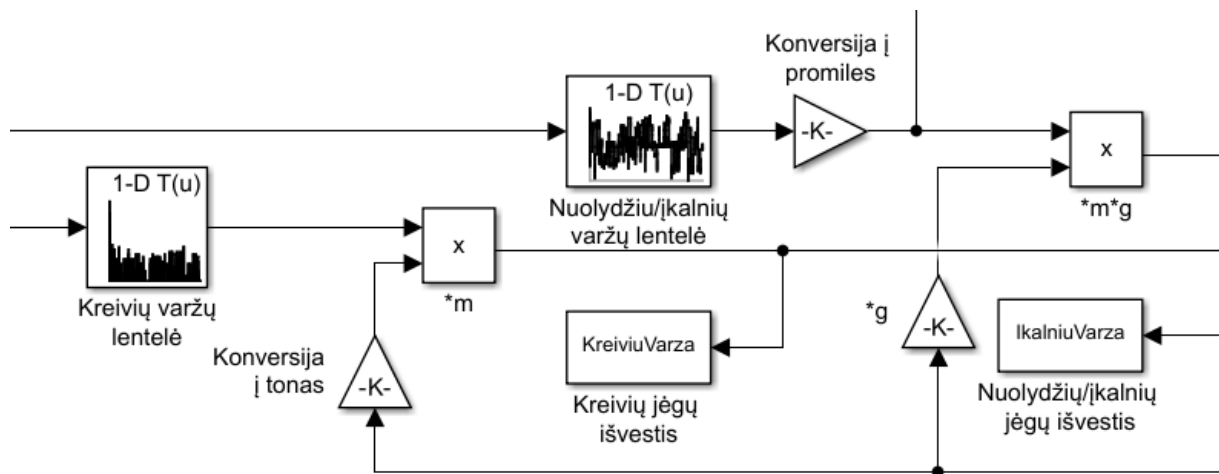
Naudojant šias formules, gaunama PESA 730ML traukinio pagrindinės judėjimo varžos charakteristika pagal greitį, kuri pateikiama 32 pav.



32 pav. PESA 730ML traukinio pagrindinės judėjimo varžos charakteristika pagal greitį (730ML dokumentacija, 2016)

Pagrindinės judėjimo varžos bloke ši charakteristika dinamiškai kinta pagal esamą traukinio greitį ir pridedama prie kitų vagonus veikiančių pasipriešinimo jėgų.

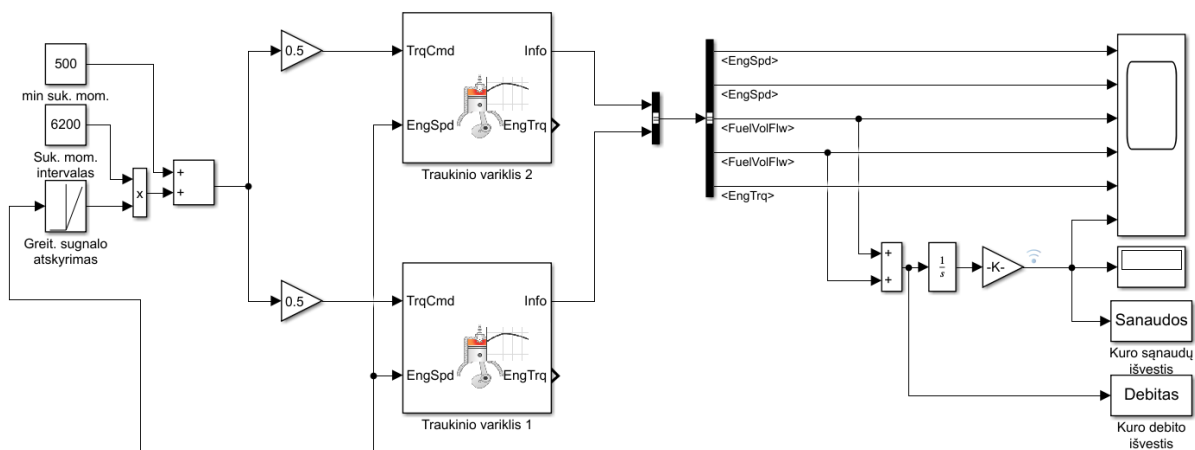
Papildomų kelio varžų skaičiavimo dalis – matematinėmis lygtimis aprašyti elementai, kurie pagal nuvažiuotą kelio atstumą (esamą koordinatę) skaičiuoja papildomų traukinio varžų jėgą. Papildomų kelio varžų jėgų skaičiavimo dalis pateikiama 33 pav.



33 pav. Papildomų kelio varžų jėgų skaičiavimo dalis

Papildomos kelio varžos skaičiuojamos atsižvelgiant į Vilnius–Turmantas geležinkelio ruožo išilginį profilį ir kreives („LTG Infra“, 2021). Varžų lentelės su koordinatėmis įkeliamos į modelį – tuomet pagal kelio koordinatę nuolat žinoma veikianti kelio varža.

Vidaus degimo variklio blokas – (schemoje *Traukinio variklis 1–2*) SIMULINK blokas, kuris pagal esamą variklio sukimosi greitį ir nustatytą reikiamą sukimo momentą skaičiuoja sunaudojamą momentinį degalų kiekį ir sumines sąnaudas KT apimtyje (MathWorks, „Simple Engine“, 2021). Vidaus degimo variklio blokas pateikiamas 34 pav.



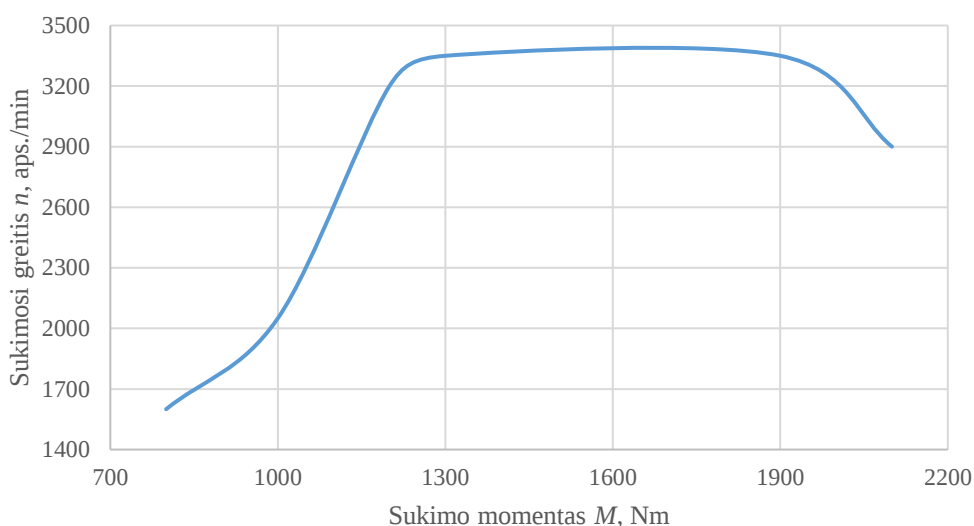
34 pav. Vidaus degimo variklio blokas

Modelyje naudojami du variklio blokai, veikiantys lygiagrečiai lygiomis apkrovomis. Tai padaryta atsižvelgiant į tai, kad dyzelinis traukinys PESA 730ML turi du variklinius vagonus. Juose naudojami V formos 12 cilindrų dyzeliniai varikliai MAN 2862 LE 633, kurių pagrindinės charakteristikos pateikiamos 3.1 lentelėje.

3.1 lentelė. MAN 2862 LE 633 variklio charakteristikos (730ML dokumentacija, 2016)

Parametras	Reikšmė
Nominali galia P_M (kW)	588
Nominalus sukimosi greitis n_M (aps./min)	1800
Sukimosi greitis laisvais sūkliais n_0 (aps./min)	900
Darbinis tūris V_D (l)	24,2
Lyginamosios degalų sąnaudos b_e (g/kWh)	211

Šios charakteristikos ir VDV sukimo momento kreivė pagal sukimosi greitį naudojamos variklio simuliacijos bloke skaičiuojant susijusius parametrus (MathWorks, Simple Engine, 2021). PESA 730ML variklio sukimo momento charakteristika pagal sukimosi greitį pateikiama 35 pav.



35 pav. PESA 730ML VDV sukimo momento charakteristika (MAN Truck and Bus AG, 2016)

Imitacinio važiavimo metu variklio blokas pateikia sunaudojamų degalų debitą. Šį dydį integravus gaunama sunaudoto degalų kiekio suma.

Atliekant važiavimo imitaciją, visi traukinio modelio blokai tarpusavyje perduoda skaičiavimų rezultatus. Tai leidžia tirti, kaip ir kokie skirtingų blokų parametrai lemia važiavimų rezultatus.

3.3 PESA 730ML modelio tinkamumo patikrinimas

Siekiant įsitikinti, kad analitinis traukinio judėjimo modelis „Matlab / Simulink“ programoje veikia teisingai, atlikta duomenų validacija – traukinio važiavimo ruožu Vilnius–Turmantas imitacija, remiantis 2024-01-02 atliktos bandomosios kelionės, traukinio Nr. 662,

saugumo sistemos KLUB–U kasetėje užfiksuotais duomenimis. Faktiniai greičio duomenys lyginami su imitaciniu kelionės važiavimu. Koreguojant įvairius modelio parametrus siekta, kad imitacinė kreivė kuo labiau atitiktų užfiksuotas faktinio greičio reikšmes, o apskaičiuotos bendros degalų sąnaudos taip pat būtų kuo artimesnės realioms. Bandomosios kelionės ir imitacinio važiavimo greičio kreivės pateikiamos 1 priede. Iš grafikų matyti, kad didžiojoje diapazono dalyje imitacija atitinka eksperimentinę dalį.

Skaičiavimų rezultatai lyginami su eksperimentinės kelionės:

- faktinės degalų sąnaudos – 220 l;
- apskaičiuotos degalų sąnaudos – 214,03 l;
- degalų sąnaudų skirtumas nuo realių – 2,8 %.

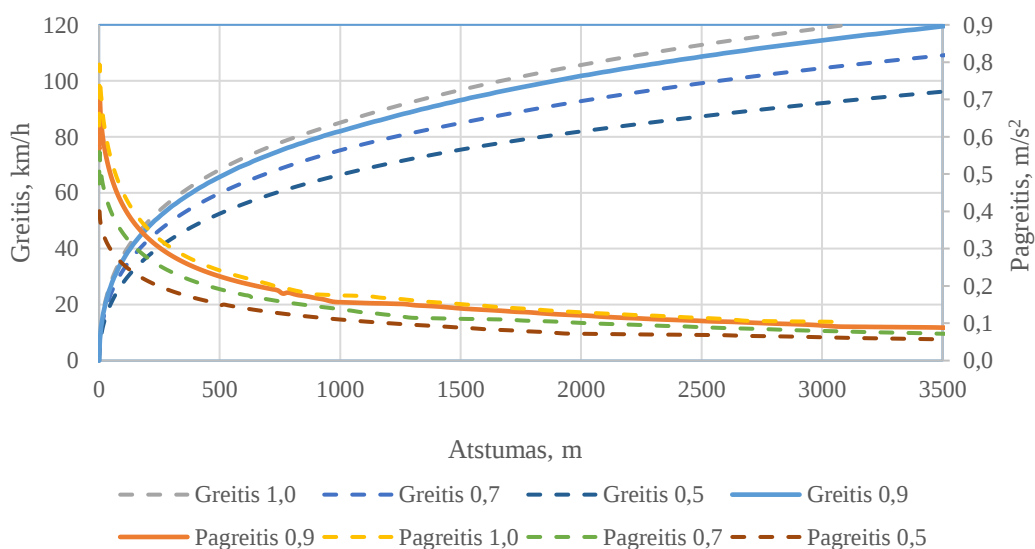
Iš pateiktų rezultatų matyti, kad apskaičiuotų degalų sąnaudų reikšmė nuo faktiškai sunaudotų skiriasi $< 3 \%$, todėl priimta, kad „Matlab / Simulink“ programoje sukurtas modelis gali būti naudojamas imitaciniams važiavimams atlikti nedarant eksperimentinių bandymų. Modelį aprašantys parametrai gali būti koreguojami siekiant keisti traukinio valdymo stilių.

4. Keleivinio traukinio greičio kreivės skaičiavimai ruože Vilnius–Turmantas

4.1 Skaičiavimų metodika

Pagrindinis tyrimo tikslas – atliekant skaitinį modeliavimą, rasti traukinio judėjimo greičio kreivę, kuri leistų pasiekti numatytą vidutinį greitį tarpstotyje ir minimizuoti degalų sąnaudas. Atliekant važiavimų imitacijas naudojamas anksčiau aprašytas traukinio judėjimo matematinis modelis, sukurtas naudojant „Matlab / Simulink“ programą. Efektyvios greičio kreivės ieškoma remiantis literatūros analizėje apžvelgtais straipsniais (Jakubowski ir Jarzebowicz, 2021), (Yin ir Chen, 2013), (Cismaru, 2018), kuriuose mažiausios energijos sąnaudos gaunamos parenkant kada ir kaip intensyviai traukinys turi greitėti ir stabdyti, maksimaliai išnaudojant riedėjimą laisvąja eiga.

Remiantis šiais principais, greičio kreivė tobulinama pertvarkius traukinio greičio valdymo bloką matematiniam modelyje, kad šis, pasiekus numatytą greitį, įjungtų laisvos eigos režimą. Vidutinis ruožo įveikimo laikas reguliuojamas keičiant numatytus greičius, kuriuos pasiekus įjungiamas ir išjungiamas laisvos eigos režimas. Įsibėgėjimui iki numatyto greičio naudojami parametrai, imituojantys 90 % VDV traukos. Toks koeficientas pasirinktas siekiant turėti traukos rezervą ir vengiant maksimalaus komponentų apkrovimo. Greičio kreivė, imituojanti įsibėgėjimą, gauta naudojant matematinį modelį, kai traukos kontrolerio padėties koeficientas lygus 0,9 ir traukinio neveikia kelio profilio ir kreivių sukuriamos jėgos – kelias visiškai horizontalus ir tiesus. Traukinio greičio ir pagreičio kreivės prie skirtingų traukos koeficientų pateikiamos 36 pav.



36 pav. Imituotos traukinio greičio ir pagreičio kreivės prie skirtingų traukos koeficientų

Traukinio įsibėgėjimas imituojamas iki 120 km/h, nes tai yra maksimalus leidžiamasis greitis visame Vilnius–Turmantas ruože. Tobulinant greičio kreivę atsižvelgta į didžiausią leidžiamąjį greitį visame ruože. Leidžiamo greičio riba imta iš traukinio saugumo sistemos KLUB–U kasetėje užšifruotų duomenų bandomojoje kelionėje.

Atliekant bandomąją kelionę keleivinio traukiniu Nr. 662, atlikti sustojimai Naujojoje Vilnioje, Bezdonyse, Pailgiuose, Pabradėje, Švenčionėliuose, Ignalinoje, Dūkšte, Visagine ir Turmante. Pagal sustojimų skaičių, optimizuojant greičio kreivę, visas Vilnius–Turmantas ruožas padalinamas į 9 tarpstočius. Toliau, imituojant traukinio važiavimą kiekviename tarpstotyje, koreguojamos didžiausios ir mažiausios greičio reikšmės, kurių intervale naudojamas laisvos eigos režimas. Ieškoma tokių greičio reikšmių, kurias naudojant vidutinis greitis ir tarpstočio įveikimo laikas išliktų kuo artimesni bandomosios kelionės imitaciniame važiavime užfiksuotiems dydžiams, o degalų sąnaudos būtų kuo mažesnės. Eksperimentinės kelionės metu užfiksuotos degalų sąnaudos kiekviename ruože pateikiamos 2 skyriaus 2.6 lentelėje. Apskaičiuoto grafiko rezultatai tiriami, lyginant juos su eksperimentinės kelionės imitacijos charakteristikomis, degalų sąnaudomis, debitu, traukinį veikiančiomis varžomis.

4.2 Skaičiavimų eiga

Greičio kreivė optimizuojama 9 tarpstočiams ruože Vilnius–Turmantas pagal traukinį Nr. 662. Traukinys kursuoja kasdien, grįžta su traukiniu Nr. 663, o apsisukimo laikas grąžos punkte – 1.21 val. Traukinio tvarkaraščio informacija pateikiama 4.1 lentelėje

4.1 lentelė. Traukinio Nr. 662 2023–2024 m. tvarkaraščio informacija („LTG Link“, Metinis tvarkaraštis 2023–2024, 2024)

Atstumas, km	Tarpstočių km	Stočių ir stotelių kodas	Stotys	Laikas
0	0	2400000	Vilnius kel.	05.35
5	5	2401431	Pavilnys	–
9	9,2/0	2401432	Naujoji Vilnia	5.46–47
11	2,5	2400336	El. tr. depas–1	–
16	6,6	2401433	Mickūnai	–
25	16,4	2400434	Bezdonys	5.59–6.00
32	23,5	2400435	Skersabalčiai	–
39	29,5	2400436	Santaka	–
43	34	2400437	Pailgis	6.18–19
51	42,1	2400423	Pabradė	6.26–27
60	51	2400438	Pažeimenė	–
68	58,7	2400439	Žeimena	–
78	68,7	2400422	Švenčionėliai	6.51–7.01
93	83,5	2401440	Pakretuonė	–

4.1 lentelės tęsinys

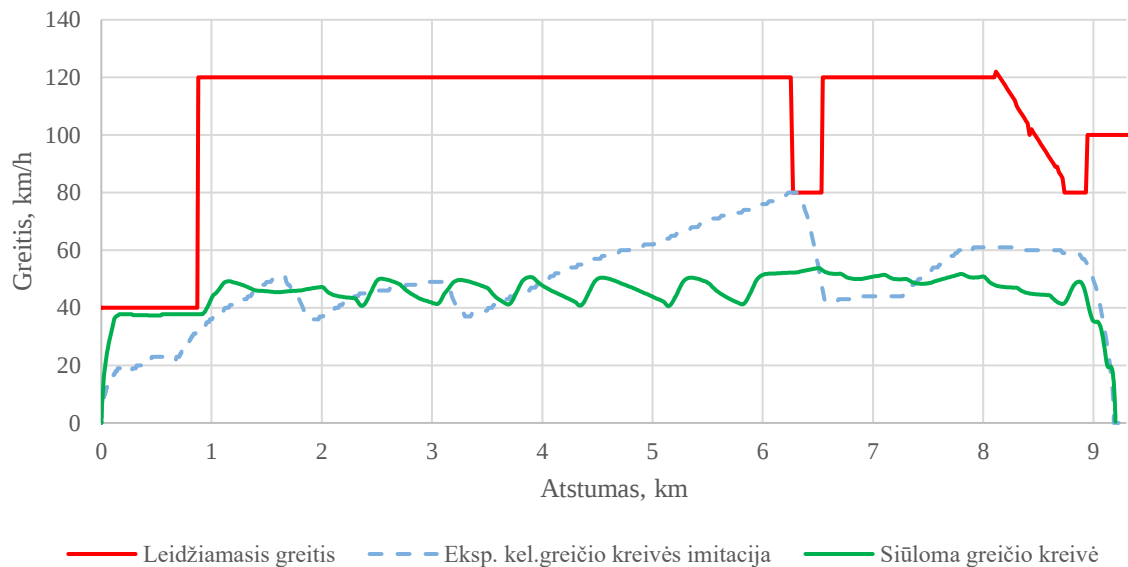
101	91,7	2400421	Ignalina	7.19–20
111	101,6	2400441	Lobiniai	–
125	116,1	2400419	Dūkštas	7.36–37
130	121,3	2400442	Gerkonys	–
137	128,4	2400443	Visaginas	7.47–48
147	138,8	2400418	Turmantas	07.56
<i>Sustojimų sk.</i>				9
<i>Sustojimų laikas</i>				00.17
<i>Maršrutinis laikas, val.</i>				02.21
<i>Maršrutinis greitis, km/h</i>				62,55
<i>Techninis laikas, val.</i>				02.04
<i>Techninis greitis, km/h</i>				71,13

Bandomojoje kelionėje užfiksuoti tarpstočių įveikimo laikai, pateikti 2 skyriaus 2.6 lentelėje, gana ženkliai skyrėsi nuo tvarkaraštyje numatytų važiavimo trukmių, tačiau tyrime tobulinant greičio kreivę siekta išlaikyti vidutinį greitį nepakitusį.

4.2.1 Greičio kreivės skaičiavimai Vilnius–Naujoji Vilnia tarpstotyje

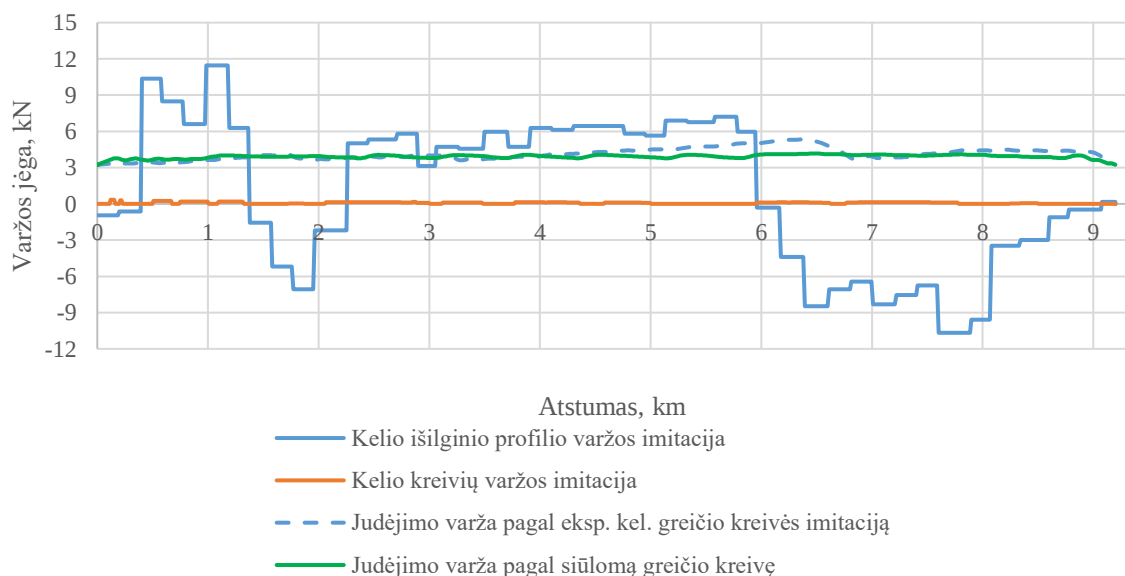
Pirmasis traukinio Nr. 662 sustojimas atliekamas Naujosios Vilnios stotyje. Ji nuo Vilniaus stoties nutolusi 9,2 km. Modeliuojant ekonomišką greičio kreivę atsižvelgta į greičio apribojimus, kurie Vilniaus stotyje buvo 40 km/h, Naujosios Vilnios stotyje 80 km/h, taip pat ir 80 km/h nuo tarpstočio 6 km 3 pk iki 6 km 6 pk. Visame likusiame ruože leidžiamasis greitis – 120 km/h.

Atlikus eksperimentinės kelionės imitaciją gauta, kad vidutinis greitis lygus 42,81 km/h, o važiavimo laikas – 773 s (12,43 min). Pagal tvarkaraštį tarpstočiui įveikti skirta 11 minučių, todėl nuo grafiko buvo atsiliekiama. Tačiau, atliekant skaitinį modeliavimą, tikslas buvo sumažinti degalų sąnaudas, o ne važiavimo laiką. Toliau ieškant efektyvesnės greičio kreivės priartėjimo metodu rasta maksimali greičio reikšmė, kurią pasiekus leidžiama traukiniui judėti laisvąja eiga – 46,8 km/h (13 m/s), ir mažiausia, kai vėl pradedama naudoti traukinio pavaros trauka – 41,4 km/h (11,5 m/s). Pasirinkus tokį greičio intervalą, vidutinis greitis buvo 43,10 km/h arba 0,7 % didesnis, o važiavimo trukmė – 770 s arba 0,4 % mažesnė lyginant eksperimentinės kelionės imitacijos rezultatu. Patobulintos greičio kreivės palyginimas su eksperimentinės kelionės imitacija pateiktas 37 pav.



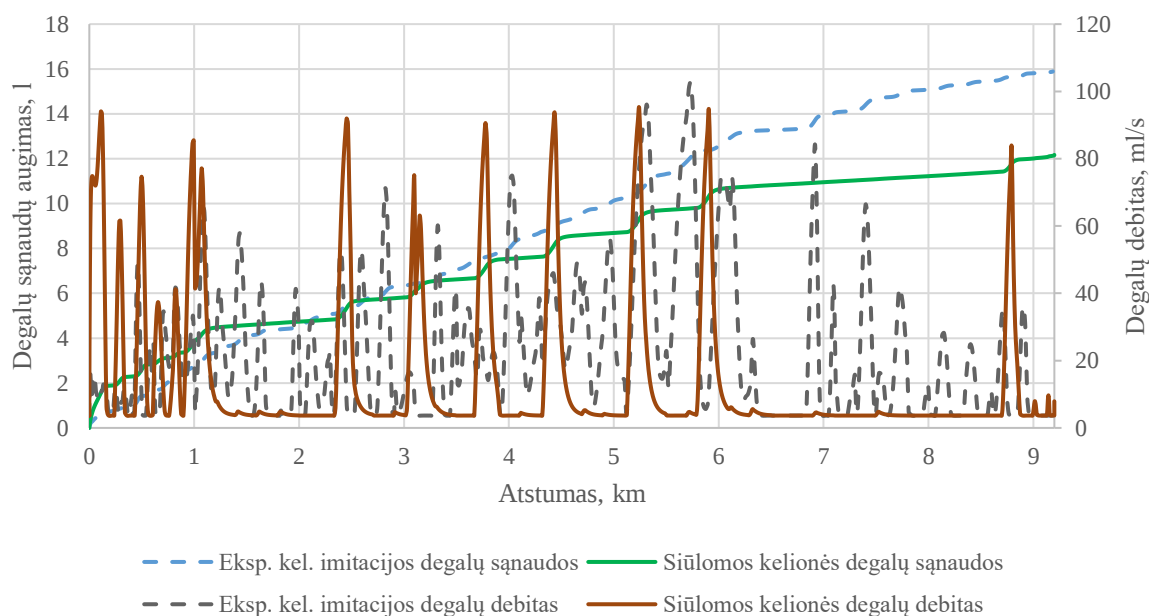
37 pav. Greičio kreivių palyginimas ruože Vilnius–Naujoji Vilnia

Iš greičio kreivių matyti, kad eksperimentinės kelionės metu maksimalus pasiektas greitis ruože – 80 km/h, o pagal patobulintą greičio kreivę – 53 km/h. Matyti, kad išvykstant iš Vilniaus stoties bandomojoje kelionėje palaikytas nedidelis ~20 km/h greitis. Todėl išvažiuoti iš stoties kelyno užtruko daugiau laiko nei būtų reikėję iškart pasiekiant didžiausią leidžiamąjį greitį. Tai lėmė, kad vėliau, ruožo viduryje, reikėjo išvystyti didesnę greitį, siekiant kompensuoti uždelstą laiką. Iš pagerinto greičio grafiko galima pastebėti, kad intervale, kai traukinys rieda laisvąja eiga, nuvažiuojamas skirtingas atstumas. Jis priklauso nuo kelio išilginio profilio varžos, nes ji sukelia didžiausią išorinių jėgų, veikiančių traukinį, dalį. Pasipriešinimo jėgų pasiskirstymas tarpstotyje Vilnius–Naujoji Vilnia pateikiamas 38 pav.



38 pav. Traukinį veikiančios išorinės jėgos ruože Vilnius–Naujoji Vilnia

Iš 38 pav. matyti, kad intervaluose nuo 1 km 4 pk iki 2 km 3 pk ir nuo 6 km 2 pk iki 8 km 8 pk yra nuokalnės, todėl nuriedamas atstumas didesnis. Iš kitos pusės, likusiose tarpstočio dalyse yra įkalnė, todėl čia traukinio judėjimas iš inercijos negali būti efektyviai išnaudojamas. Tuo tarpu kelio kreivės sukelia tik nežymų pasipriešinimą. Reikšmingesnę dalį generuoja pagrindinė traukinio judėjimo varža, kurią mažinti galima tik keičiant riedmens ar infrastruktūros technologinius sprendimus arba mažinant važiavimo greitį, o tai nėra naudinga. Toliau galima panagrinėti degalų sąnaudų palyginimą, kuris pateikiamas 39 pav.



39 pav. Degalų sąnaudų palyginimas ruože Vilnius–Naujoji Vilnia

Lyginant eksperimentinės ir siūlomos kelionės degalų sąnaudas, pagrindinis skirtumas pastebimas degalų debituose – siūlomos kelionės debitas trumpiems laiko tarpams pakyla iki didžiausios ~90 ml/s reikšmės didinant greitį, o riedant krinta iki minimumo. Eksperimentinės kelionės imitacijoje lėčiau didėjantis greitis lemia mažesnes, bet ilgiau nusistovinčias degalų debito vertes, o tai bendras degalų sąnaudas išaugina labiau. Greičio didinimas nuo 3,5 km iki 6 km iki 80 km/h labai padidino bendras eksperimentinės kelionės imitacijos degalų sąnaudas, nes tuo metu degalų debitas nuolat siekė vidutiniškai 35 ml/s. Patobulintame grafike tokio greičio didinimo neprireikė, nes išvykstant iš Vilniaus stoties buvo iškart pasiektas didžiausias leidžiamasis greitis ir tai leido vėliau važiuoti mažesniu greičiu.

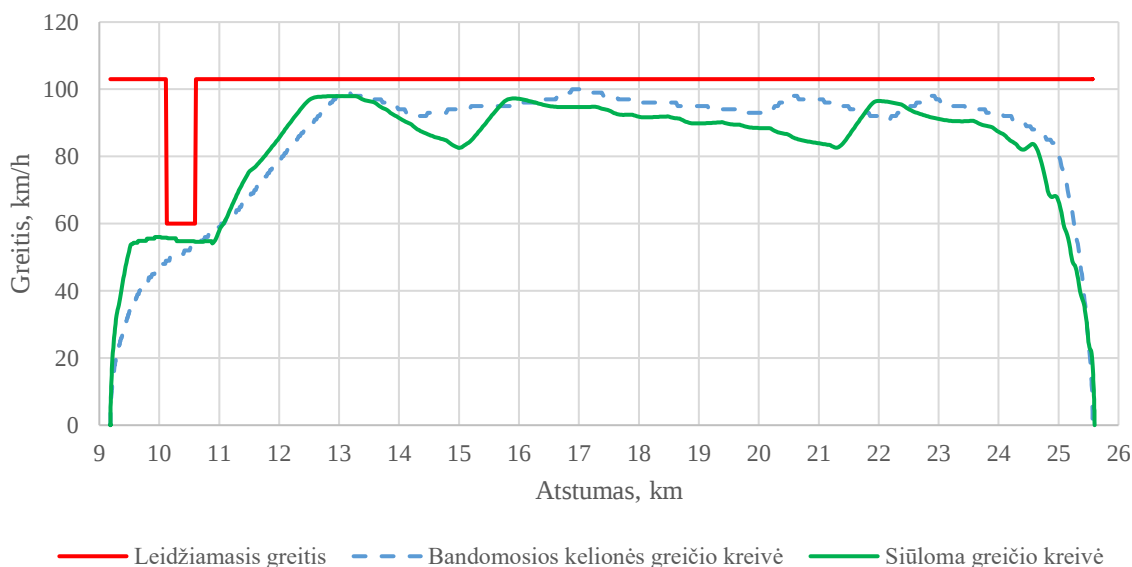
Imituojant važiavimą pagal patobulintą greičio kreivę, bendros degalų sąnaudos siekė 12,17 l. Lyginant jas su eksperimentinės kelionės imitacija – 15,89 l, tai 23,4 % mažesnis rezultatas. Apibendrinant, tai tarpstotyje Vilnius–Naujoji Vilnia pavyko pasiekti išvažiuojant iš Vilniaus stoties kelyno iškart pasiekus maksimalų leidžiamąjį 40 km/h greitį. Taip pat nuo

3,5 km iki 6 km greitis nebuvo didinamas iki 80 km/h, o buvo palaikomas tarp 40 km/h iki 50 km/h, leidžiant traukiniui riedėti.

4.2.2 Greičio kreivės skaičiavimai Naujoji Vilnia–Bezdonys tarpstotyje

Toliau sustojimas atliekamas Bezdonių stotyje. Ji nuo Vilniaus stoties nutolusi 25,6 km, o nuo Naujosios Vilnios – 16,4 km. Greičio apribojimai, nuo 10 km 1 pk iki 10 km 7 pk buvo 60 km/h, o visame likusiame ruože – 100 km/h.

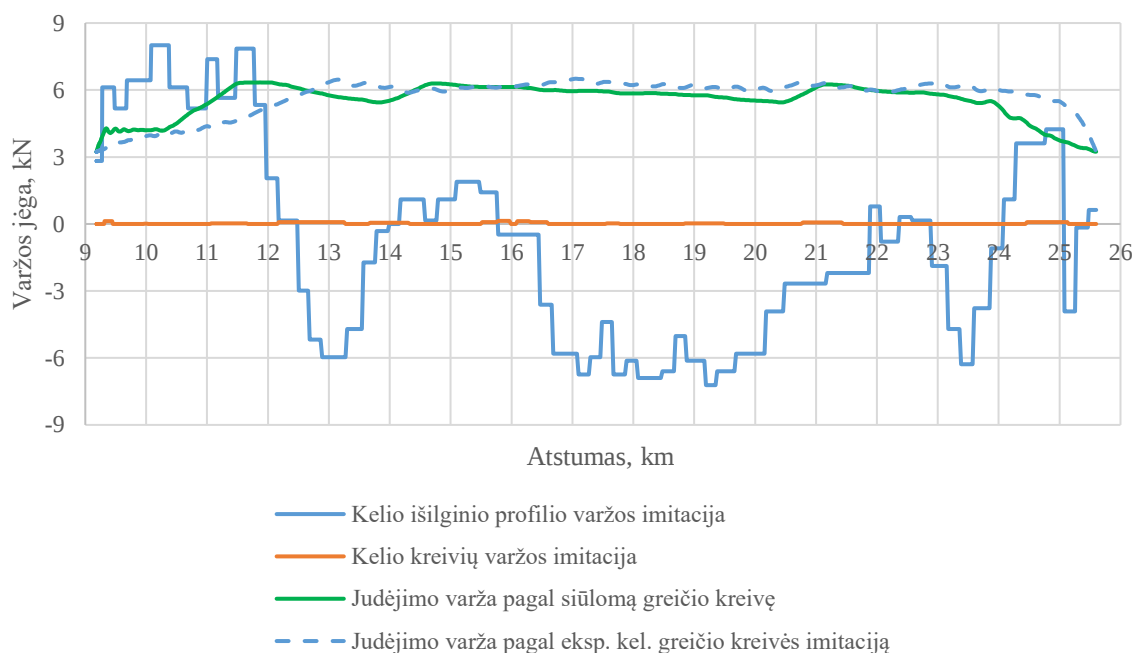
Atlikus eksperimentinės kelionės imitaciją gauta, kad vidutinis greitis lygus 75,14 km/h, o važiavimo laikas – 787 s (13,07 min). Pagal tvarkaraštį tarpstočiui įveikti skirta 12 minučių, todėl šiame tarpstotyje nuo grafiko taip pat buvo atsiliekiama. Patobulinto greičio grafiko maksimali reikšmė, kurią pasiekus traukinys pradeda judėti laisvąja eiga – 95,4 km/h (26,5 m/s), ir mažiausia, kai vėl pradedama naudoti traukinio pavaros trauką – 82,8 km/h (23 m/s). Pasirinkus tokį greičio intervalą, vidutinis greitis buvo 75,21 km/h arba 0,1 % didesnis, o važiavimo trukmė – 781 s arba 0,1 % mažesnė lyginant eksperimentinės kelionės imitacijos rezultatu. Siūlomos greičio kreivės palyginimas su eksperimentinės kelionės imitacija pateiktas 40 pav.



40 pav. Greičio kreivių palyginimas ruože Naujoji Vilnia–Bezdonys

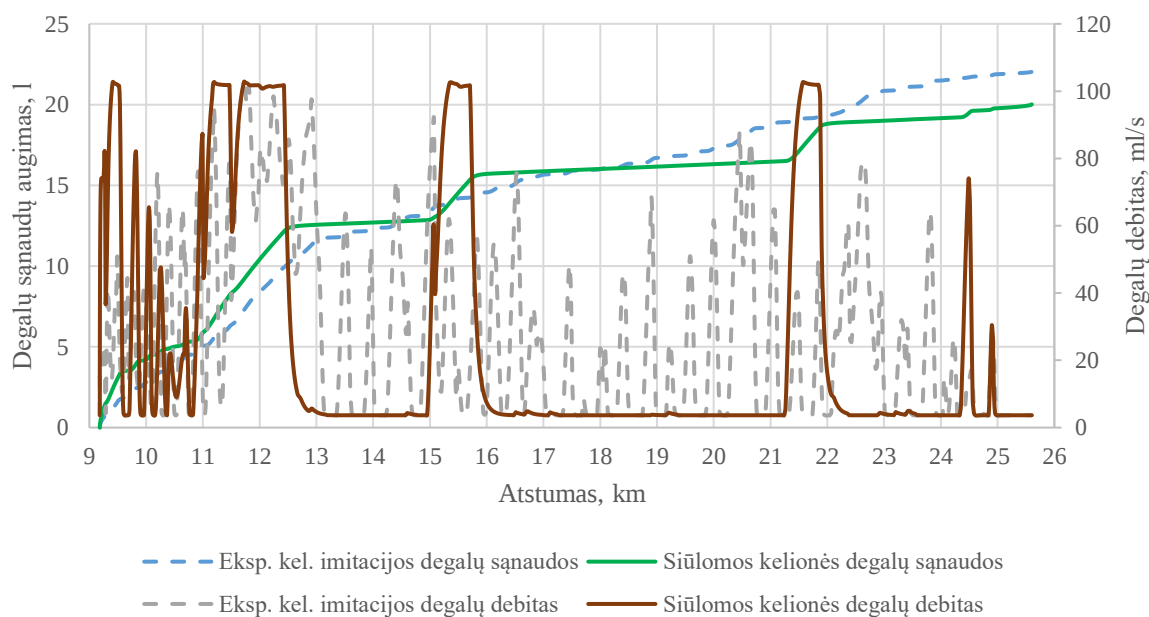
Iš greičio grafikų matyti, kad eksperimentinės kelionės metu maksimalus pasiektas greitis ruože – 99 km/h, tuo tarpu pagal patobulintą greičio kreivę – 98 km/h. Šiame tarpstotyje greičio kreivių forma gana panaši, matyti, kad siūlomoje maksimali greičio reikšmė pasiekama anksčiau. Pastebima, kad bandomojoje kelionėje traukiniui leidžiama riedėti, tačiau ne tiek,

kiek pagal patobulintą kreivę. Pasipriešinimo jėgų pasiskirstymas tarpstotyje Naujoji Vilnia–Bezdonys pateikiamas 41 pav.



41 pav. Traukinį veikiančios išorinės jėgos ruože Naujoji Vilnia–Bezdonys

Iš grafiko matyti, kad ruožo pradžioje yra įkalnė, sukurianti nuo 6 iki 9 kN pasipriešinimo jėgą ir lėtinanti įsibėgėjimą. Tačiau toliau, nuo 12 km 4 pk iki 24 km kelio profilis keičiasi tarp nuolydžio ir nedidelių įkalnių. Tai labai palankios sąlygos išnaudoti riedančio traukinio inerciją. Toliau galima panagrinėti degalų sąnaudų palyginimą, kuris pateikiamas 42 pav.



42 pav. Degalų sąnaudų palyginimas ruože Naujoji Vilnia–Bezdonys

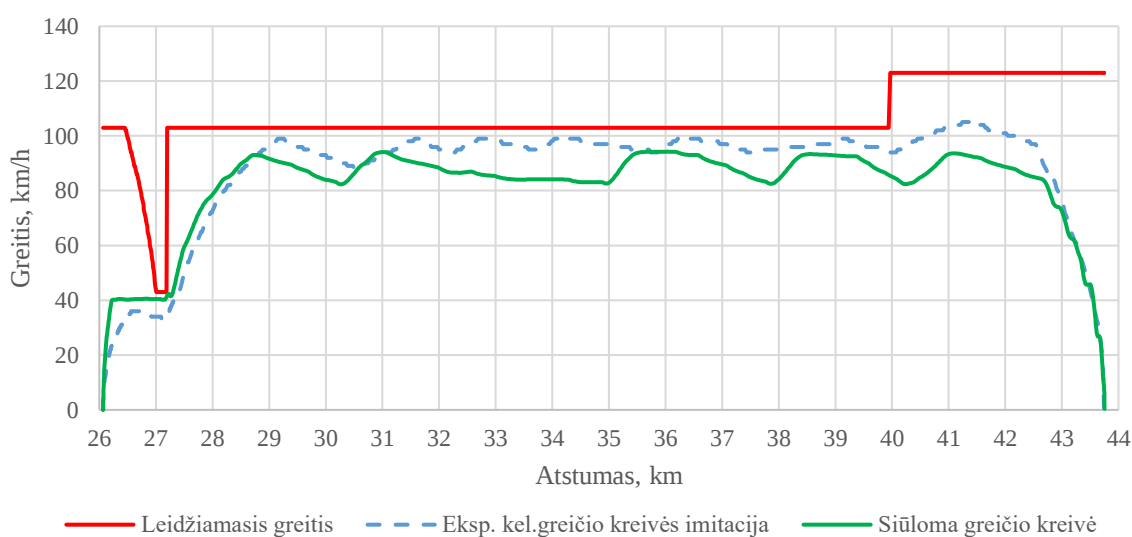
Staigesnis įsibėgėjimas siūlomoje greičio kreivėje lemia didesnes bendras degalų sąnaudas pirmojoje ruožo dalyje, tačiau tai leidžia palaikyti mažesnę greitį vėliau, išlaikant vidutinį greitį tokį patį kaip eksperimentinės kelionės imitacijoje. Degalų taupymas prasideda nuo 18 km, kai traukinys laisvai rieda.

Imituojant važiavimą pagal patobulintą greičio kreivę, bendros degalų sąnaudos siekė 22,04 l. Lyginant jas su eksperimentinės kelionės imitacija – 20,02 l, tai 9,2 % mažesnis rezultatas. Apibendrinant, tokį sąnaudų mažėjimą tarpstotyje Naujoji Vilnia–Bezdonys pavyko pasiekti dėl palankaus kelio profilio – nuo 12 km 4 pk iki 24 km yra nuolydis arba nedidelė įkalnė ir tai leidžia išnaudoti traukinio riedėjimą bei įsibėgėti naudojant mažiau degalų.

4.2.3 Greičio kreivės skaičiavimai Bezdonys–Pailgiai tarpstotyje

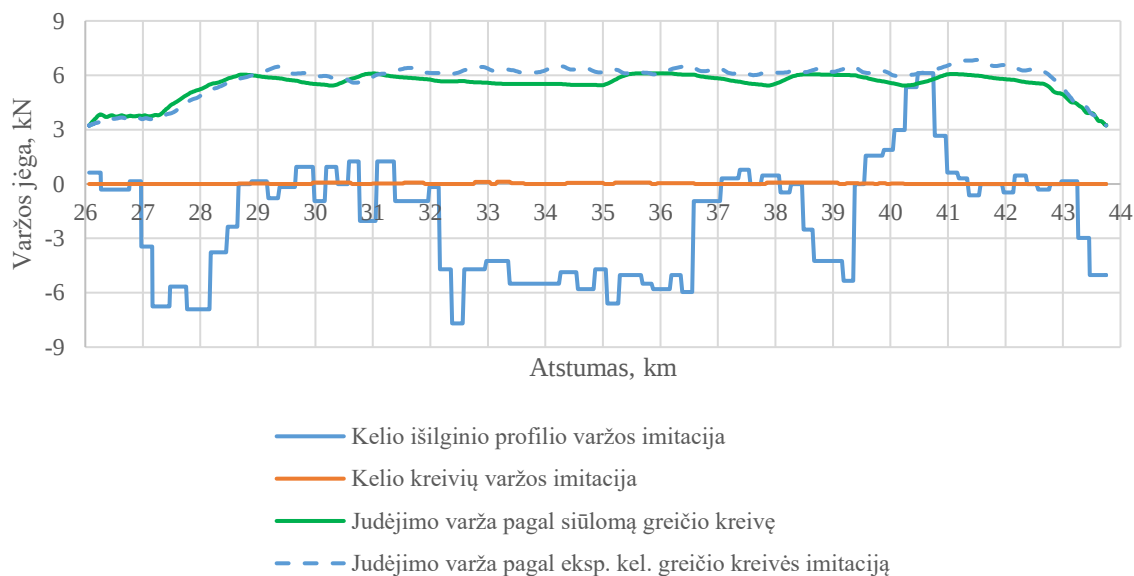
Kitas sustojimas atliekamas Pailgių stotyje. Ji nuo Vilniaus stoties nutolusi 43,2 km, o nuo Bezdonių – 17,6 km. Greičio apribojimai, nuo 25 km 9 pk iki 26 km 8 pk buvo 40 km/h, toliau 100 km/h, o nuo 39 km 4 pk – 120 km/h.

Eksperimentinės kelionės imitacijoje gauta, kad vidutinis greitis lygus 74,59 km/h, o važiavimo laikas – 853 s (14,13 min). Tvarkaraštyje tarpstočiui įveikti skirta 18 minučių, todėl šis tarpstotis įveiktas greičiau nei numatyta. Patobulinto greičio grafiko maksimali reikšmė, kurią pasiekus traukinys pradeda judėti laisvąja eiga – 91,8 km/h (25,5 m/s), ir mažiausia, kai vėl pradedama naudoti traukinio pavaros trauką – 82,8 km/h (23 m/s). Pasirinkus tokį greičio intervalą, vidutinis greitis buvo 74,04 km/h arba 0,8 % mažesnis, o važiavimo trukmė – 860 s arba 0,7 % didesnė lyginant eksperimentinės kelionės imitacijos rezultatu. Siūlomos greičio kreivės palyginimas su eksperimentinės kelionės imitacija pateiktas 43 pav.



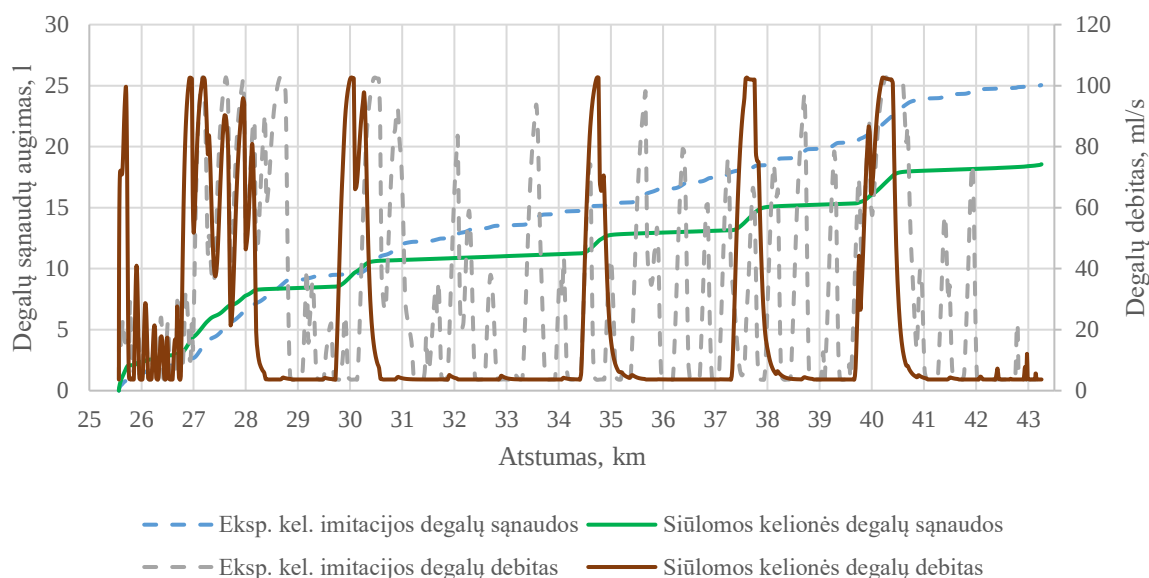
43 pav. Greičio kreivių palyginimas ruože Bezdonys–Pailgiai

Iš greičio kreivių matyti, kad eksperimentinės kelionės metu maksimalus pasiektas greitis ruože – 105 km/h, tuo tarpu pagal siūlomą greičio kreivę – 94 km/h. Šiame tarpstotyje siūlomos kreivės greitis palaikomas 5–10 km/h mažesnis nei bandomojoje kelionėje. Taip pat, kaip ir ankstesniuose ruožuose, siūloma greičiau įsibėgėti ruožo pradžioje. Tai lemia 0,7 % mažesnę vidutinį greitį, tačiau padeda sutaupyti degalų. Pasipriešinimo jėgų pasiskirstymas tarpstotyje Bezdonys–Pailgiai pateikiamas 44 pav.



44 pav. Traukinį veikiančios išorinės jėgos ruože Bezdonys–Pailgiai

Iš grafiko matyti, kad tik intervale nuo 39 km iki 40 km 6 pk yra įkalnė, o tiek įsibėgėjant, tiek vėliau riedant kelyje yra nuokalnė. Toliau galima panagrinėti degalų sąnaudų palyginimą, kuris pateikiamas 45 pav.



45 pav. Degalų sąnaudų palyginimas ruože Bezdonys–Pailgiai

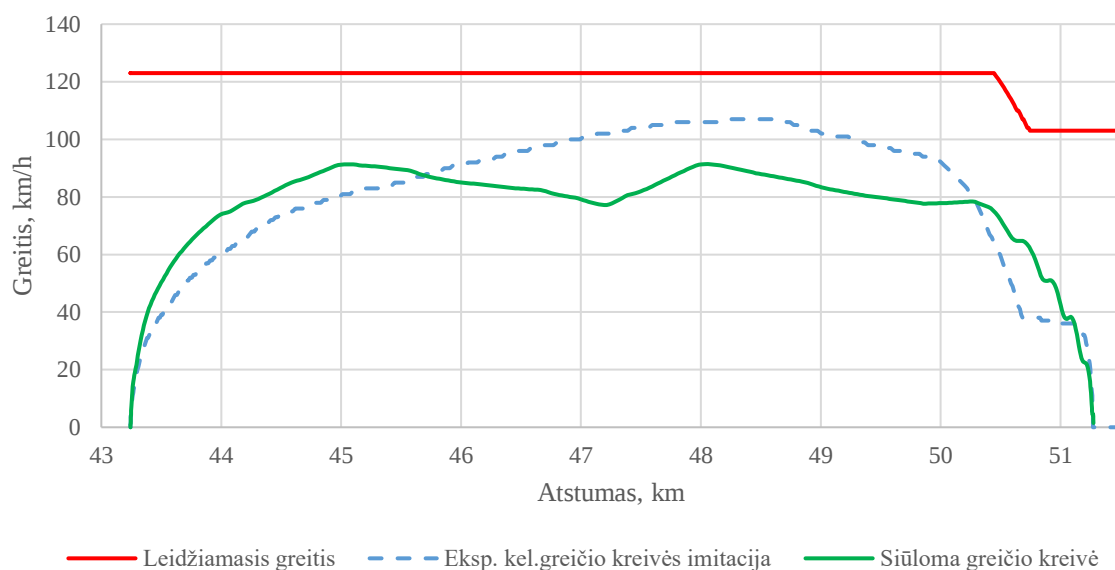
Staigesnis įsibėgėjimas pagerintoje greičio kreivėje lemia didesnes bendras degalų sąnaudas pirmojoje ruožo dalyje, bet degalų taupymas prasideda nuo 28 km, kai traukinys laisvai rieda. Skirtumas atsiranda dėl nuo 28 km palaikomo didesnio greičio. Tai lemia didesnę judėjimo varžą, veikiančią traukinį.

Imituojant važiavimą pagal patobulintą greičio kreivę, bendros degalų sąnaudos siekė 25,05 l. Palyginimui su eksperimentinės kelionės imitacijos rezultatu – 18,56 l, tai 25,9 % mažesnis rezultatas. Apibendrinus, tokį rezultatą tarpstotyje Bezdonys–Pailgiai pavyko pasiekti dėl mažesnio palaikomo greičio ir mažesnės judėjimo varžos.

4.2.4 Greičio kreivės skaičiavimai Pailgiai–Pabradė tarpstotyje

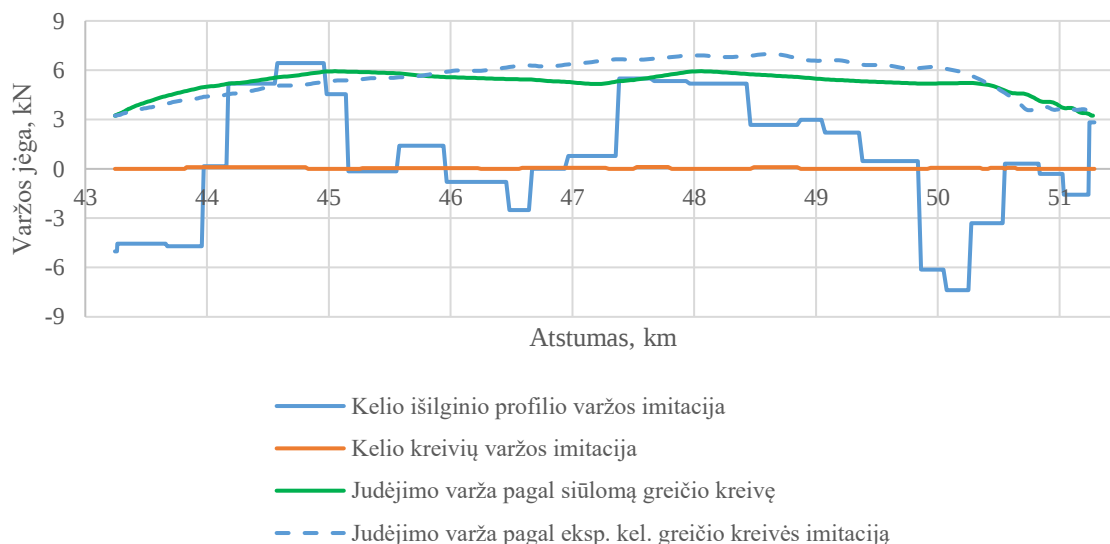
Dar vienas sustojimas – Pabradės stotyje. Ji nuo Vilniaus stoties nutolusi 51,3 km, o nuo Pailgių – 8,1 km. Greičio apribojimas didžiąją ruožo dalį 120 km/h, o nuo 50 km 7 pk – 100 km/h.

Atlikus eksperimentinės kelionės imitaciją gauta, kad vidutinis greitis lygus 67,83 km/h, o važiavimo laikas – 427 s (7,07 min). Pagal tvarkaraštį tarpstočiui įveikti skirtos 7 minutės, todėl šis tarpstotis įveiktas laiku. Siūlomos greičio kreivės maksimali reikšmė, kurią pasiekus traukinys pradeda judėti laisvąja eiga – 90,0 km/h (25 m/s), ir mažiausia, kai vėl pradedama naudoti traukinio pavaros trauką – 77,4 km/h (21,5 m/s). Pasirinkus tokį greičio intervalą, vidutinis greitis buvo 67,42 km/h arba 0,4 % mažesnis, o važiavimo trukmė – 429 s arba 0,6 % didesnė lyginant eksperimentinės kelionės imitacijos rezultatu. Pagerinto greičio grafiko palyginimas su eksperimentinės kelionės imitacija pateiktas 46 pav.



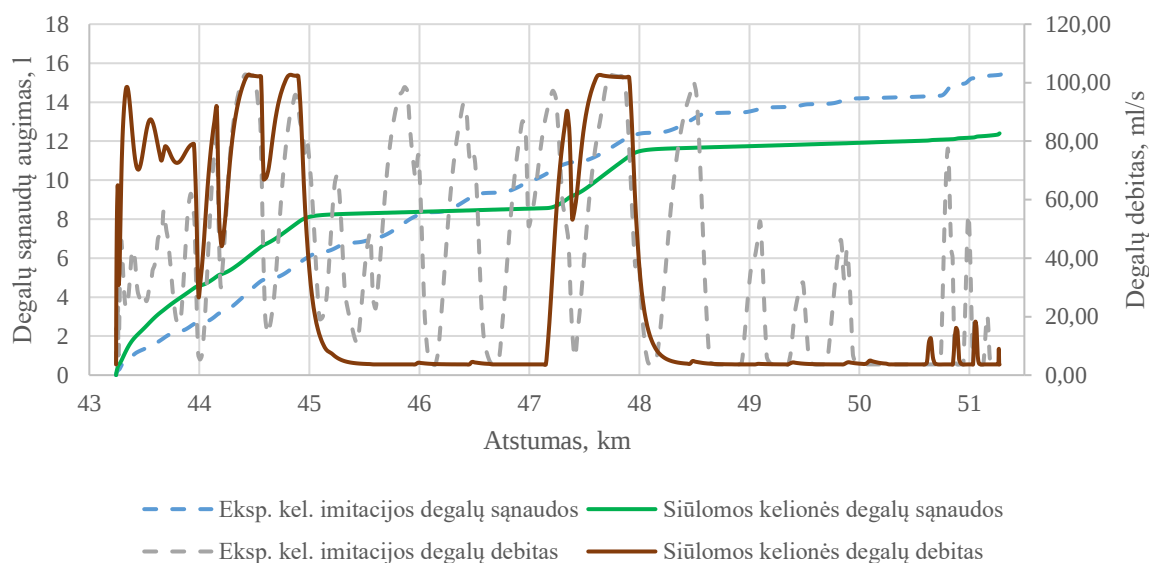
46 pav. Greičio kreivių palyginimas ruože Pailgiai–Pabradė

Iš greičio kreivių matyti, kad eksperimentinės kelionės metu maksimalus pasiektas greitis ruože – 107 km/h, tuo tarpu pagal siūlomą greičio kreivę – 91 km/h. Kaip ir kituose tarpstočiuose, siūlomoje greičio kreivėje greičiau išibėgėjama, taip pat vėliau stabdoma nei bandomojoje kelionėje. Tai padeda išlaikyti panašų vidutinį greitį, pasiekiant mažesnę maksimalų. Pasipriešinimo jėgų pasiskirstymas tarpstotyje Pailgiai–Pabradė pateikiamas 47 pav.



47 pav. Traukinį veikiančios išorinės jėgos ruože Pailgiai–Pabradė

Iš grafiko matyti, kad išilginio profilio varža yra minimali intervaluose nuo 45 km iki 47 km, o nuo 50 km prasideda nuokalnė, kuri už 500 m baigiasi. Šiose vietose patobulintoje kreivėje traukinys rieda. Taip pat, važiuojant didesniu greičiu, eksperimentinės kelionės imitacijoje kyla didesnė judėjimo varža. Degalų sąnaudų palyginimas pateikiamas 48 pav.



48 pav. Degalų sąnaudų palyginimas ruože Pailgiai–Pabradė

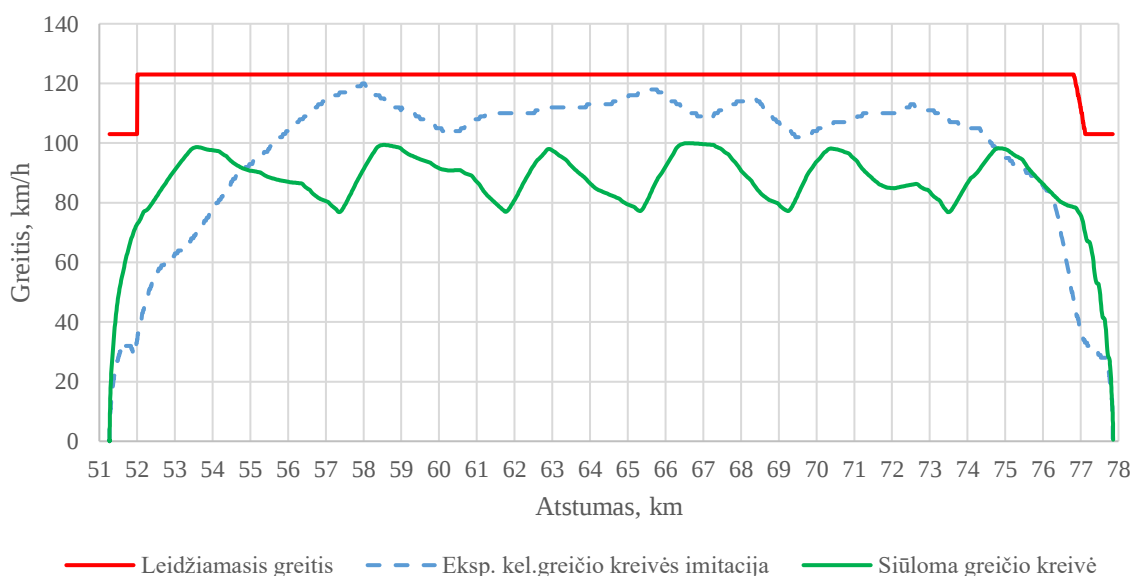
Greičio didinimas iki maksimalios reikšmės eksperimentinės kelionės grafike lemia degalų debitą, pastoviai kintantį nuo 10 iki 14 ml/s, tuo tarpu patobulintoje kreivėje, riedant, kuro debito reikšmė krenta iki minimumo. Todėl, ties 46 km eksperimentinės kelionės imitacijos bendros degalų sąnaudos ima viršyti siūlomos kreivės.

Imituojant važiavimą pagal patobulintą greičio kreivę, bendros degalų sąnaudos siekė 15,08 l. Palyginimui su eksperimentinės kelionės imitacijos – 12,40 l, arba 17,8 % mažesnės. Tokį rezultatą tarpstotyje Pailgiai–Pabradė pavyko pasiekti dėl spartesnio įsibėgėjimo, vėlesnio stabdymo ir mažesnio traukinio judėjimo greičio.

4.2.5 Greičio kreivės skaičiavimai Pabradė–Švenčionėliai tarpstotyje

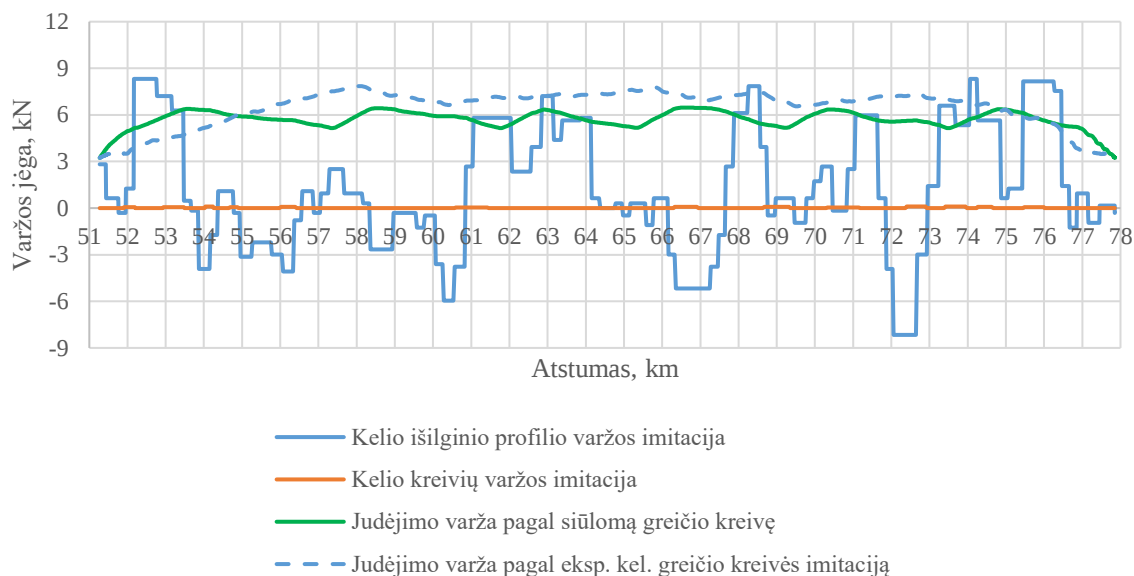
Toliau sustojimas Švenčionėlių stotyje. Ji nuo Vilniaus stoties nutolusi 77,9 km, o nuo Pabradės – 26,6 km. Greičio apribojimas didžiąją ruožo dalį 120 km/h, tik pradžioje iki 52 km ir pabaigoje nuo 77 km – 100 km/h.

Atlikus eksperimentinės kelionės imitaciją gauta, kad vidutinis greitis lygus 82,09 km/h, o važiavimo laikas – 1 166 s (19,26 min). Pagal tvarkaraštį tarpstočiui įveikti skirtos 24 minutės, todėl šis tarpstotis įveiktas 5 minutėmis greičiau nei numatyta. Siūlomo grafiko maksimali greičio reikšmė, kurią pasiekus traukinys pradeda judėti laisvąja eiga – 97,5 km/h (27 m/s), ir mažiausia, kai vėl pradeda naudoti traukinio pavaros trauka – 77,4 km/h (21,5 m/s). Pasirinkus tokį greičio intervalą, vidutinis greitis buvo 81,73 km/h arba 0,4 % mažesnis, o važiavimo trukmė – 1171 s arba 0,4 % didesnė lyginant eksperimentinės kelionės imitacijos rezultatu. Siūlomos greičio kreivės palyginimas su eksperimentinės kelionės imitacija pateiktas 49 pav.



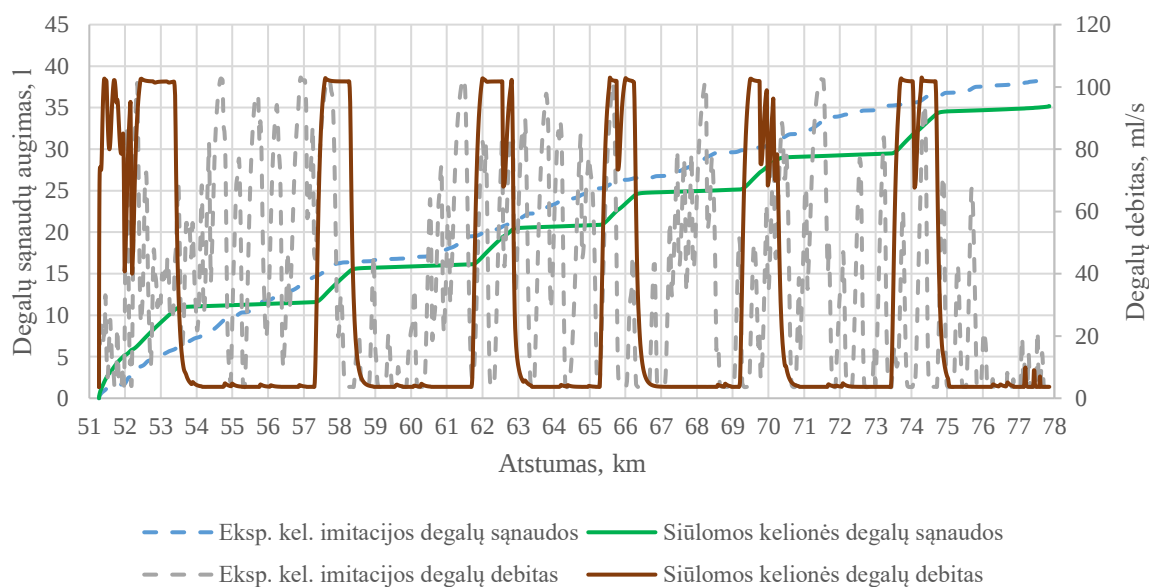
49 pav. Greičio kreivių palyginimas ruože Pabradė–Švenčionėliai

Iš greičio kreivių matyti, kad eksperimentinės kelionės metu maksimalus reikšmė ruože – 118 km/h, tuo tarpu pagal siūlomą greičio kreivę – 100 km/h. Imituojant pagerintą greičio kreivę išibėgėjama greičiau, taip pat vėliau stabdoma nei bandomojoje kelionėje. Tai padeda išlaikyti panašų vidutinį greitį, bet važiuoti mažesniu greičiu vidurinėje ruožo dalyje. Pasipriešinimo jėgų pasiskirstymas tarpstotyje Pabradė–Švenčionėliai pateikiamas 50 pav.



50 pav. Traukinį veikiančios išorinės jėgos ruože Pabradė–Švenčionėliai

Iš grafiko matyti, kad didžiąją tarpstočio dalį yra įkalnės, todėl nuriedamas atstumas mažesnis. Eksperimentinės kelionės metu yra momentų, kai traukinys juda laisvąja eiga, tačiau ilgesnį laiką palaikytas didesnę greitį, o tai sukėlė didesnę judėjimo varžą ir lėmė didesnius energijos nuostolius. Degalų sąnaudų palyginimas pateikiamas 51 pav.



51 pav. Degalų sąnaudų palyginimas ruože Pabradė–Švenčionėliai

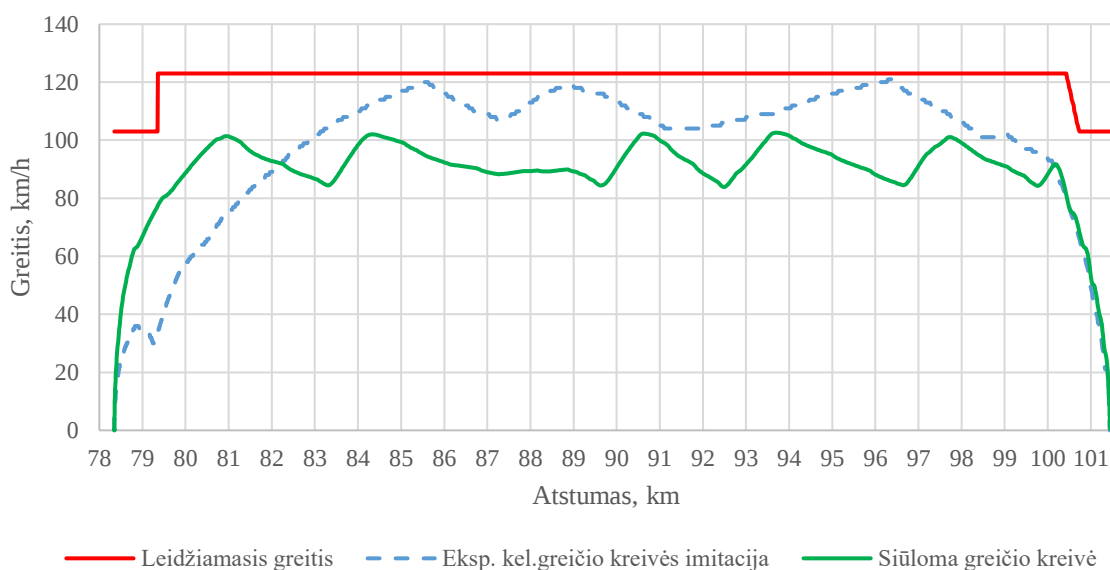
Patobulintos kreivės bendros degalų sąnaudos mažesnės už eksperimentinės kelionės nuo 56 km. Trumpi pagreitėjimai, kai degalų debitas pasiekia maksimumą, tarp kurių riedama ir debitas krenta iki minimumo, leido sutaupyti degalų.

Imituojant važiavimą pagal patobulintą greičio kreivę, bendros degalų sąnaudos siekė 38,58 l. Palyginimui su eksperimentinės kelionės imitacijos – 35,19 l, arba 8,8 % mažesnės. Tokį rezultatą tarpstotyje Pabradė–Švenčionėliai pavyko pasiekti dėl spartesnio išibėgėjimo, vėlesnio stabdymo ir mažesnio traukinio judėjimo greičio.

4.2.6 Greičio kreivės skaičiavimai Švenčionėliai–Ignalina tarpstotyje

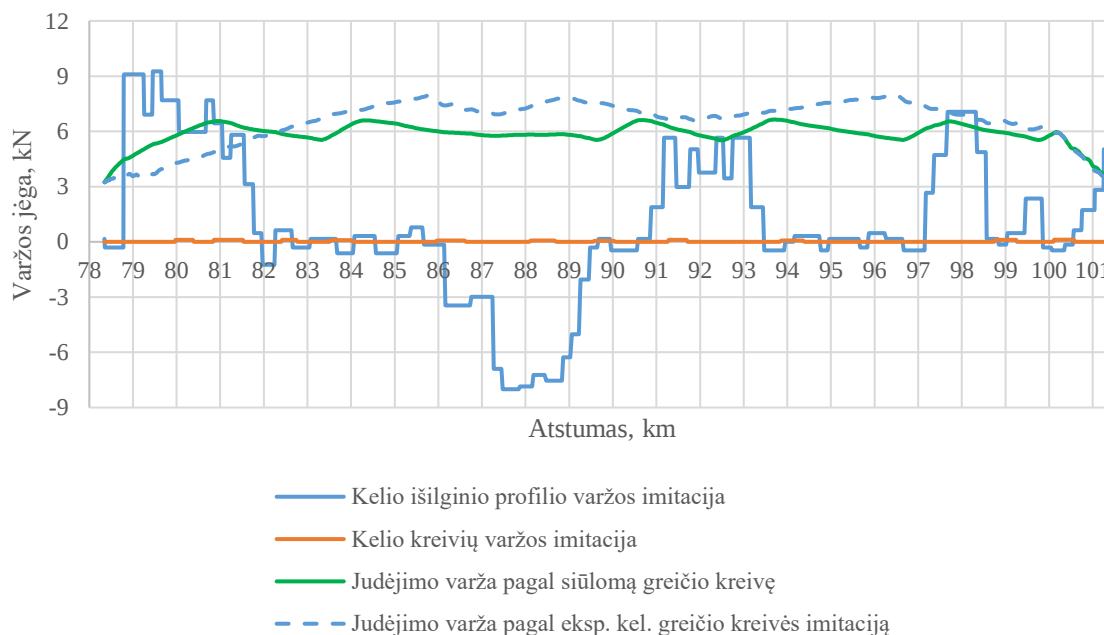
Kitas sustojimas – Ignalinoje. Ji nuo Vilniaus stoties nutolusi 100,9 km, o nuo Švenčionėlių – 23,0 km. Greičio apribojimas didžiąją ruožo dalį 120 km/h, bet pradžioje iki 78 km 8 pk ir pabaigoje 100 km 3 pk – 100 km/h.

Atlikus eksperimentinės kelionės imitaciją gauta, kad vidutinis greitis lygus 83,63 km/h, o važiavimo laikas – 994 s (16,34 min). Pagal tvarkaraštį tarpstočiui įveikti skirta 18 minučių, todėl šis tarpstotis įveiktas 1,5 min greičiau. Siūlomo greičio grafiko maksimali reikšmė, kurią pasiekus traukinys pradeda judėti laisvąja eiga – 100,8 km/h (28 m/s), ir mažiausia, kai vėl pradedama naudoti traukinio pavaros trauką – 84,6 km/h (23,5 m/s). Pasirinkus tokį greičio intervalą, vidutinis greitis buvo 83,70 km/h arba 0,1 % didesnis, o važiavimo trukmė – 993 s arba 0,1 % mažesnė lyginant eksperimentinės kelionės imitacijos rezultatu. Siūlomos greičio kreivės palyginimas su eksperimentinės kelionės imitacija pateiktas 52 pav.



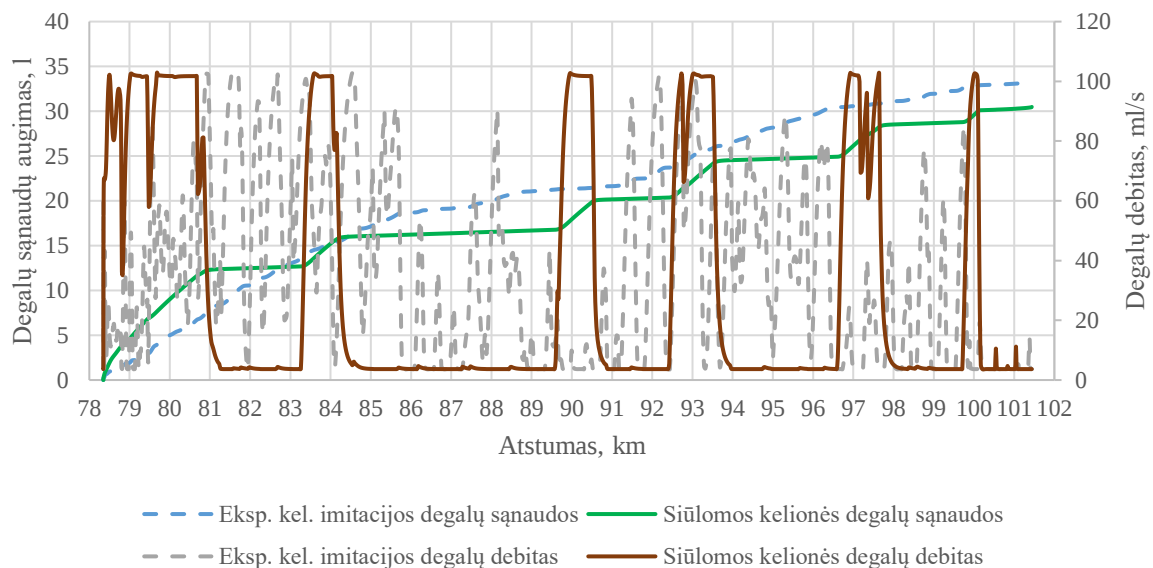
52 pav. Greičio kreivių palyginimas ruože Švenčionėliai–Ignalina

Iš greičio kreivių matyti, kad eksperimentinės kelionės metu maksimalus pasiektas greitis ruože – 120 km/h, tuo tarpu pagal pagerintą kreivę – 102 km/h. Siūlomame grafike sparčiau įsibėgėjama. Tai padeda išlaikyti panašų vidutinį greitį, pasiekiant mažesnę maksimalų. Tiesa, šiame tarpstotyje matyti, kad bandomojoje kelionėje taip pat naudojama riedėjimo technika ir traukiniui leidžiama judėti laisvąja eiga greičio intervale nuo 120 km/h iki 105 km/h. Pasipriešinimo jėgų pasiskirstymas tarpstotyje pateikiamas 53 pav.



53 pav. Traukinį veikiančios išorinės jėgos ruože Švenčionėliai–Ignalina

Iš išilginio profilio varžos matyti, kad ruožo pradžioje yra įkalnė, kuri apsunkina įsibėgėjimą, tačiau nuo 82 km iki 86 km kelias lygus, o iki 90 km buvo nuokalnė. Patobulintoje greičio kreivėje šis intervalas išnaudojamas riedėjimui, tuo tarpu bandomoje kelionėje didžiąją šio intervalo dalį didinamas greitis. Taip pat dėl palaikomo didesnio greičio, eksperimentinės kelionės judėjimo varža didžiąją ruožo dalį didesnė už pagerintos kreivės po 1–2 kN. Degalų sąnaudų palyginimas pateikiamas 54 pav.



54 pav. Degalų sąnaudų palyginimas ruože Švenčionėliai–Ignalina

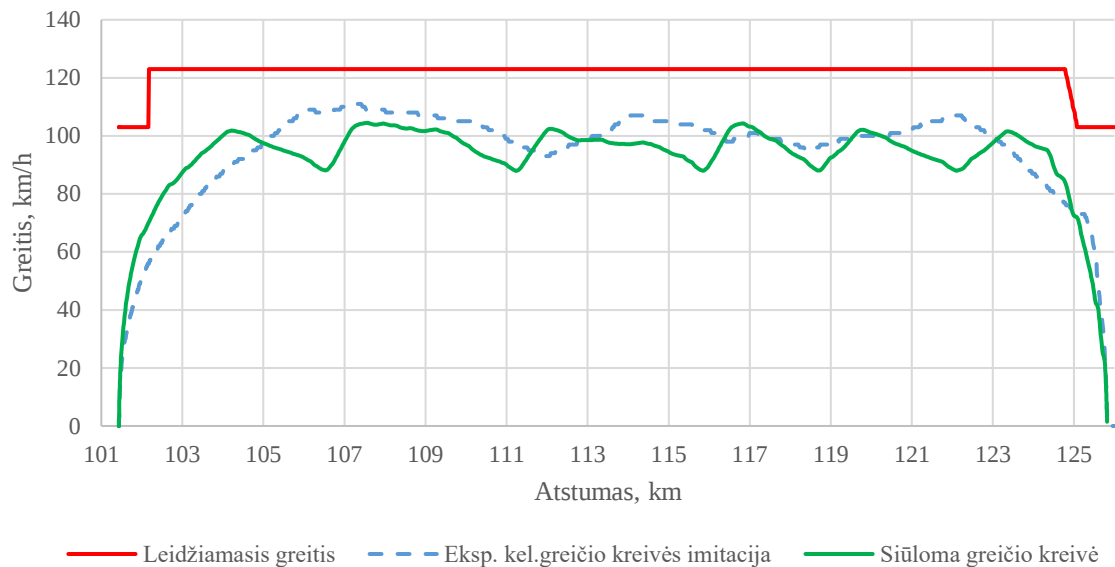
Šiame tarpstotyje eksperimentinės kelionės greičio kreivėje galima pastebėti traukinio valdymo taktiką kaip ir patobulintoje – vietoje pastovaus greičio palaikymo naudojamas riedėjimas. Tačiau, greitis didinamas ilgesnį laiką, todėl ir suminės degalų sąnaudos yra didesnės.

Imituojant važiavimą pagal patobulintą greičio kreivę, bendros degalų sąnaudos siekė 33,34 l. Palyginimui su eksperimentinės kelionės imitacija – 30,48 l, arba 8,6 % mažesnės. Tokį rezultatą tarpstotyje Švenčionėliai–Ignalina pavyko pasiekti dėl greitesnio įsibėgėjimo ir mažesnio traukinio judėjimo greičio.

4.2.7 Greičio kreivės skaičiavimai Ignalina–Dūkštas tarpstotyje

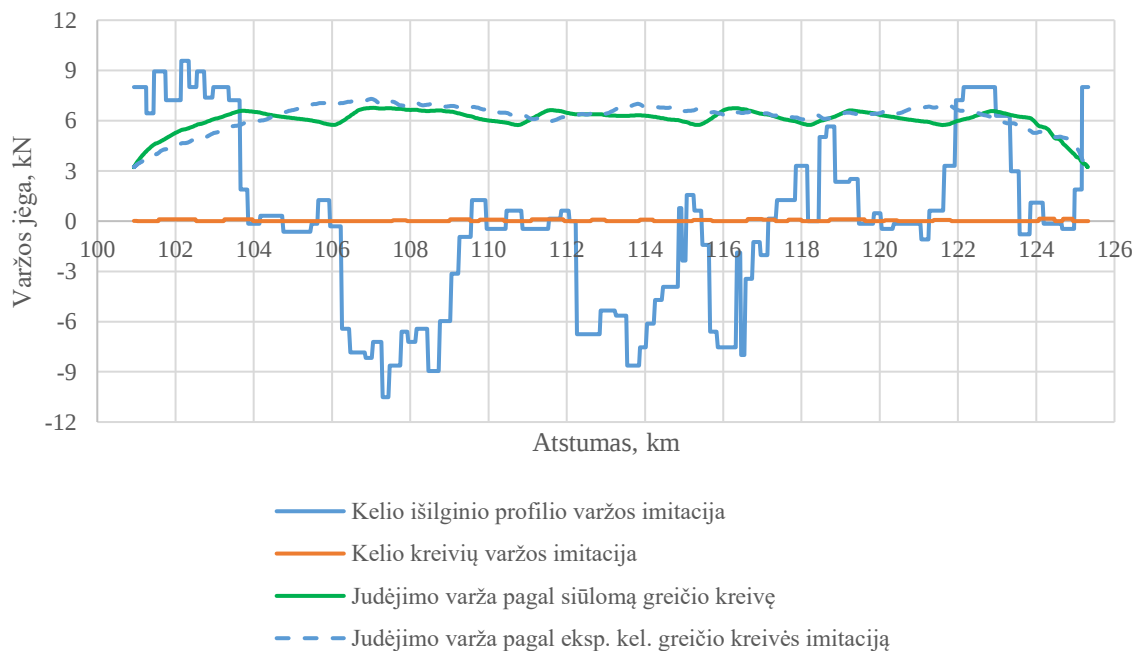
Kitas sustojimas – Dūkšte. Ji nuo Vilniaus stoties nutolusi 125,3 km, o nuo Ignalinos – 24,4 km. Greičio apribojimas didžiąją ruožo dalį 120 km/h, bet pradžioje iki 101 km 6 pk ir pabaigoje 124 km 6 pk – 100 km/h.

Atlikus eksperimentinės kelionės imitaciją gauta, kad vidutinis greitis lygus 86,64 km/h, o važiavimo laikas – 1 014 s (16,54 min). Pagal tvarkaraštį tarpstočiui įveikti skirta 16 minučių, todėl šiame tarpstotyje nuo grafiko atsilikta beveik minute. Pagerintos greičio kreivės maksimali reikšmė, kurią pasiekus traukinys paleidžiamas judėti laisvąja eiga – 100,8 km/h (28 m/s), ir mažiausia, kai vėl pradedama naudoti traukinio pavaros trauką – 88,2 km/h (24,5 m/s). Pasirinkus tokį greičio intervalą, vidutinis greitis buvo 86,41 km/h arba 0,2 % mažesnis, o važiavimo trukmė – 1016 s arba 0,3 % didesnė lyginant eksperimentinės kelionės imitacijos rezultatu. Siūlomos greičio kreivės palyginimas su eksperimentinės kelionės imitacija pateikiamas 55 pav.



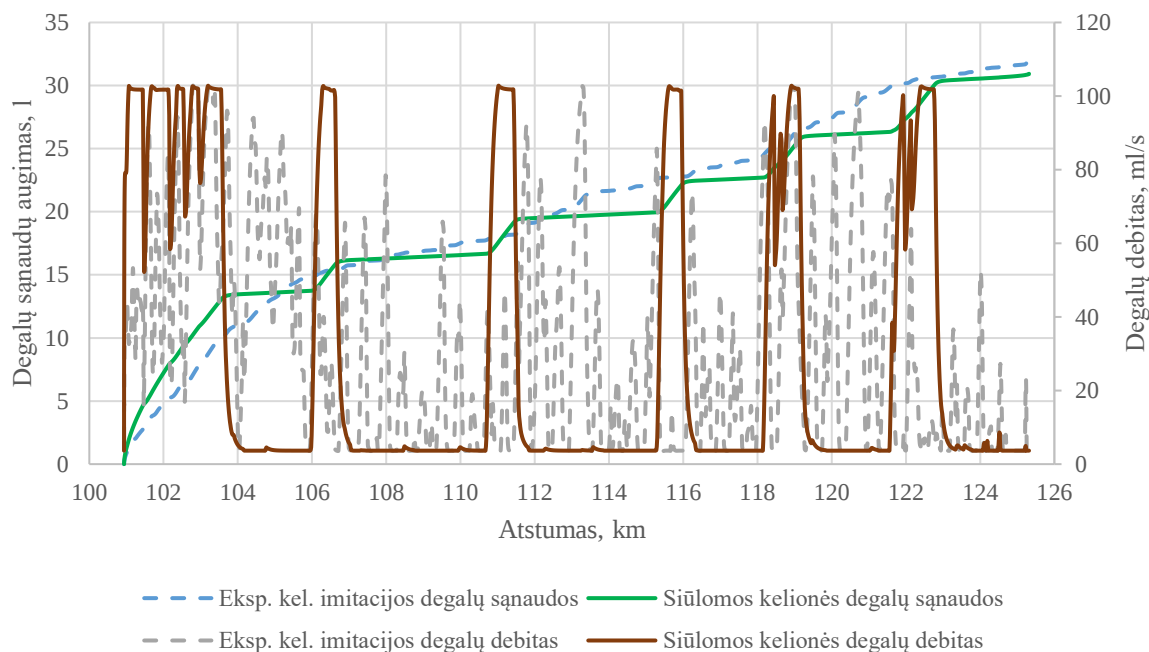
55 pav. Greičio kreivių palyginimas ruože Ignalina–Dūkštai

Iš greičio graikų matyti, kad eksperimentinės kelionės metu maksimalus pasiektas greitis ruože – 111 km/h, tuo tarpu pagal siūlomą – 104 km/h. Šiame tarpstotyje abi kreivės gana panašios, pagal eksperimentinės kelionės išibėgėjama beveik taip pat greit, todėl toliau palaikomi riedėjimo intervalai svyruoja panašiose ribose. Tiesa, eksperimentinės kelionės imitacijoje greičio mažėjimo fazių mažiau. Taip gali būti, kai traukinys juda ne visiškai laisvąja eiga, su nedidele VDV trauka. Pasipriešinimo jėgų pasiskirstymas tarpstotyje pateikiamas 56 pav.



56 pav. Traukinį veikiančios išorinės jėgos ruože Ignalina–Dūkštai

Iš išilginio profilio varžos matyti, kad distancija nuo 104 km iki 117 km palanki riedėjimui – dvi nuokalnės su lygaus kelio ruožu tarp jų. Tiek bandomojoje kelionėje, tiek siūlomoje kreivėje tai išnaudojama. Taip pat dėl panašių judėjimo greičių galima teigti, kad judėjimo varžos sukeltos jėgos sutampa. Degalų sąnaudų palyginimas pateikiamas 57 pav.



57 pav. Degalų sąnaudų palyginimas ruože Ignalina–Dūkštas

Šiame tarpstotyje eksperimentinės ir pagerintos greičių kreivės labai panašios tiek įsibėgėjimu, tiek stabdymu, tiek riedėjimo taktika, todėl suminės degalų sąnaudos skiriasi nežymiai.

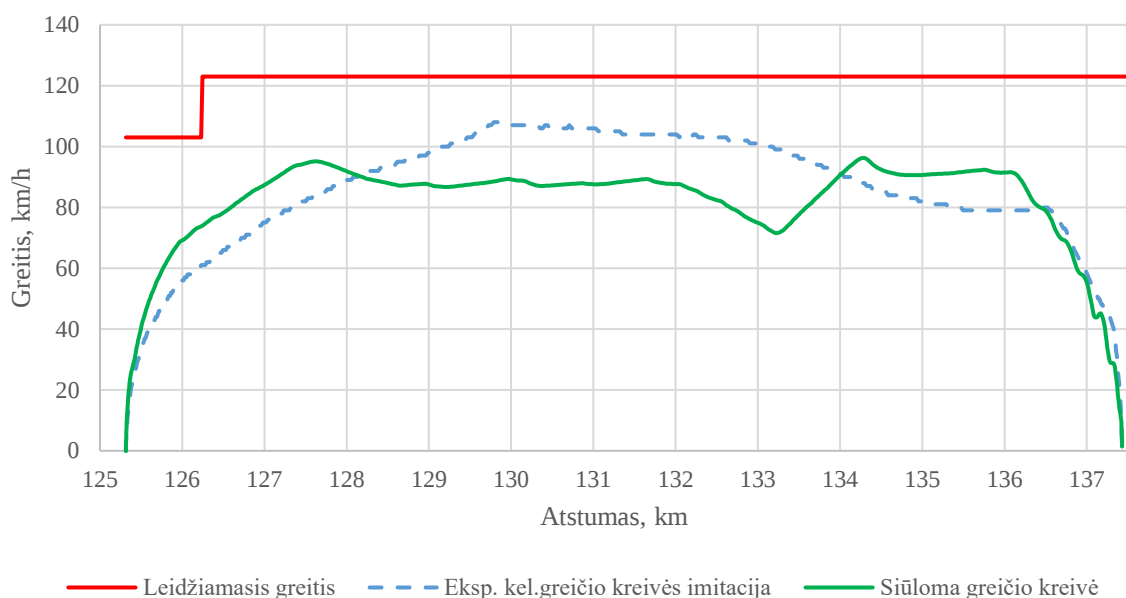
Imituojant važiavimą pagal patobulintą greičio kreivę, bendros degalų sąnaudos siekė 31,82 l. Palyginimui su eksperimentinės kelionės imitacija – 30,94 l, arba 2,8 % mažesnės. Tarpstotyje Švenčionėliai–Ignalina degalų beveik nesutaupyta, nes iš nagrinėtų kreivių matoma, kad traukinio įsibėgėjimo, greičio palaikymo ir stabdymo taktikos labai panašios.

4.2.8 Greičio kreivės skaičiavimai Dūkštas–Visaginas tarpstotyje

Dar vienas sustojimas – Visagine. Ji nuo Vilniaus stoties nutolusi 137,6 km, o nuo Švenčionėlių – 12,3 km. Greičio apribojimas iki 126 km 2 pk yra 100 km/h, o toliau – 100 km/h.

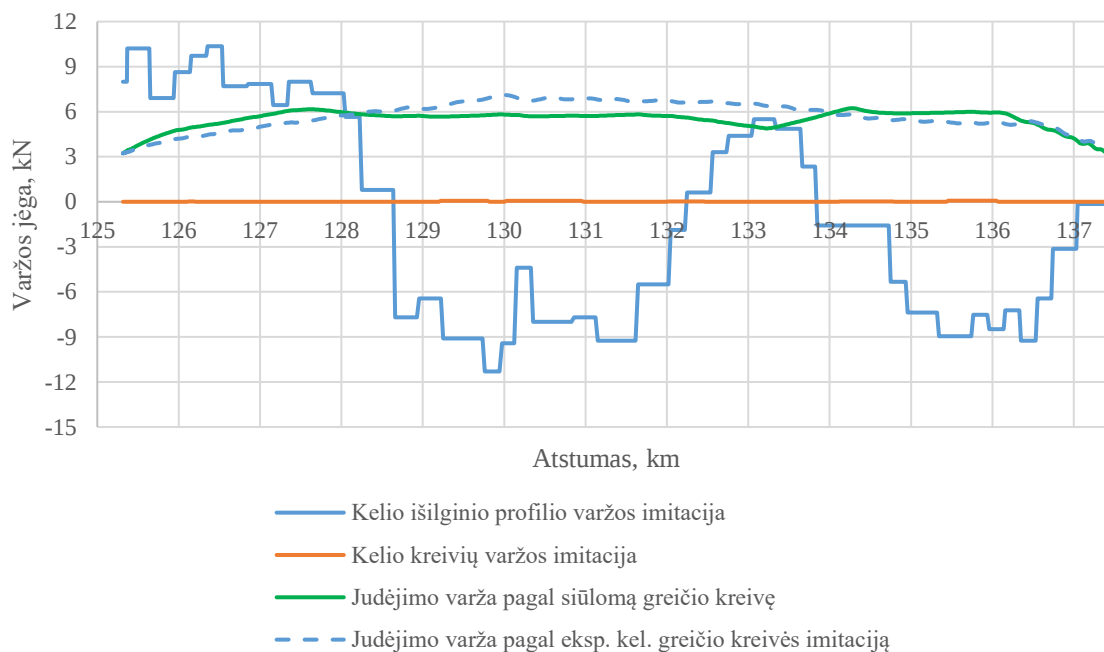
Atlikus eksperimentinės kelionės imitaciją gauta, kad vidutinis greitis lygus 73,30 km/h, o važiavimo laikas – 597 s (9.57 min). Pagal tvarkaraštį tarpstočiui įveikti skirta 10 minučių, todėl šis tarpstotis įveiktas laiku. Pagerintos greičio kreivės maksimali greičio reikšmė, kurią pasiekus traukinys pradeda judėti laisvąja eiga – 95,4 km/h (26,5 m/s), ir

mažiausia, kai vėl pradedama naudoti traukinio pavaros trauką – 72,0 km/h (20,0 m/s). Pasirinkus tokį greičio intervalą, vidutinis greitis buvo 73,60 km/h arba 0,4 % didesnis, o važiavimo trukmė – 593 s arba 0,7 % mažesnė lyginant eksperimentinės kelionės imitacijos rezultatu. Siūlomo grafiko palyginimas su eksperimentinės kelionės imitacija pateiktas 58 pav.



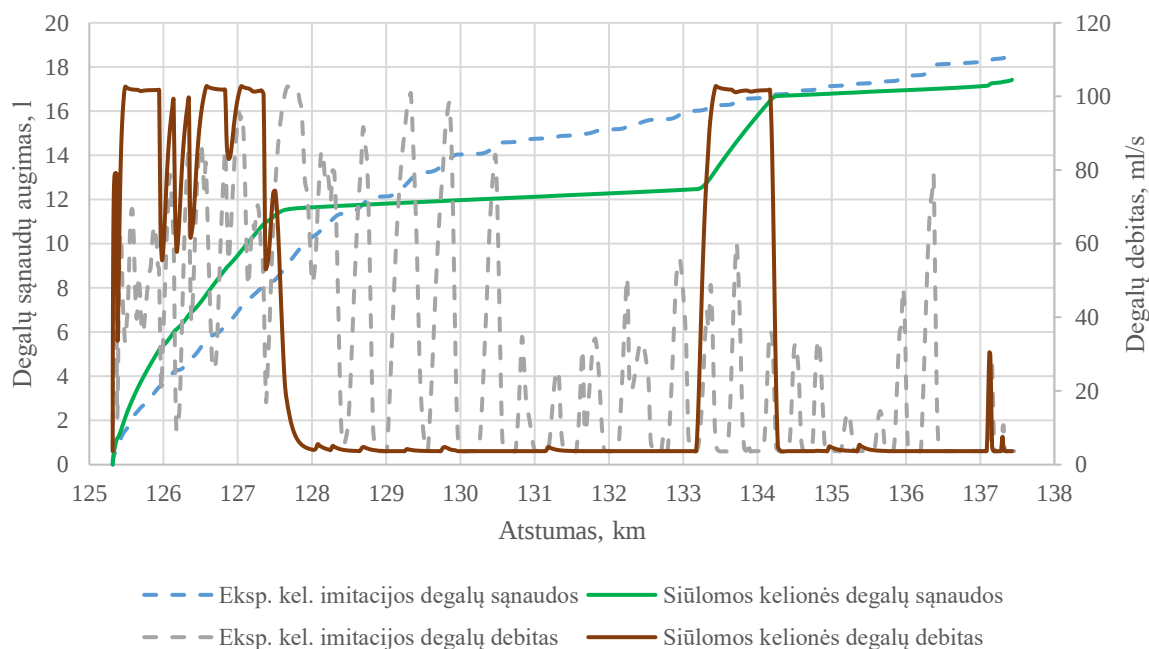
58 pav. Greičio kreivių palyginimas ruože Dūkštas–Visaginas

Iš greičio kreivių matyti, kad eksperimentinės kelionės metu maksimalus pasiektas greitis ruože – 108 km/h, tuo tarpu pagal pagerintą greičio kreivę – 95 km/h. Modeliuojant grafiką buvo sparčiau išibėgėjama ir toliau išnaudojamas nuolydis, kur traukinys juda laisvąja eiga. Tuo tarpu bandomojoje kelionėje greitis palaikomas pastovus. Pasipriešinimo jėgų pasiskirstymas tarpstotyje pateikiamas 59 pav.



59 pav. Traukinį veikiančios išorinės jėgos ruože Dūkštas–Visaginas

Iš išilginio profilio varžos matyti, kad ruože nuo 128 km 6 pk iki 132 km 3 pk ir nuo 133 km 9 pk iki tarpstočio pabaigos yra nuokalnės, kuriose palanku išnaudoti traukinio riedėjimą. Tai ir yra daroma pagal patobulintą greičio kreivę. Degalų sąnaudų palyginimas pateikiamas 60 pav.



60 pav. Degalų sąnaudų palyginimas ruože Dūkštas–Visaginas

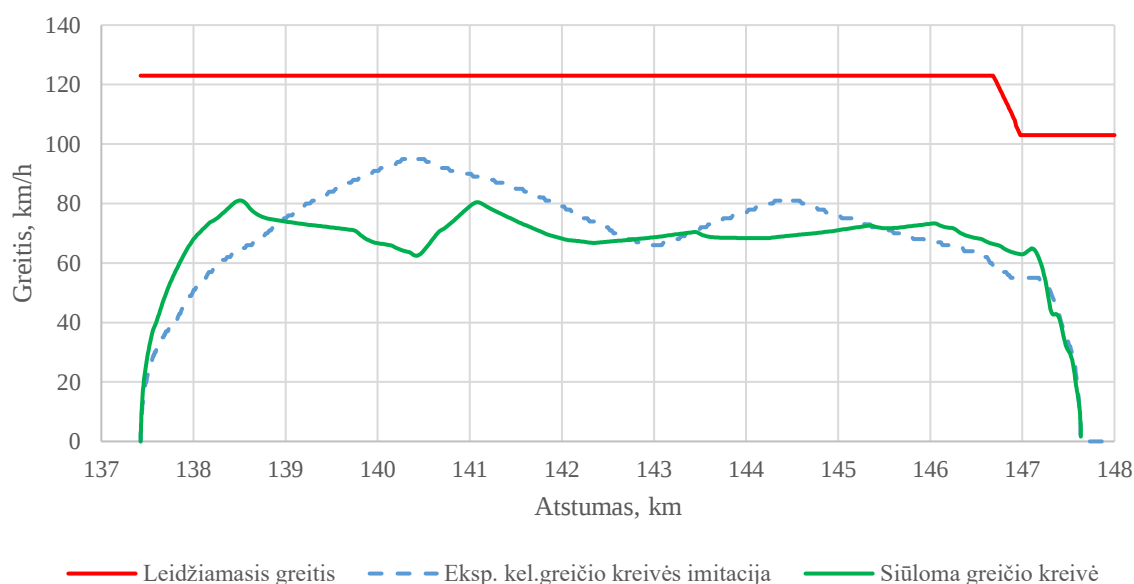
Šiame tarpstotyje daugiausiai sutaupyti galima riedant nuokalnėje nuo 128 iki 133 km. Tuo metu siūlomos greičio kreivės degalų debitas siekė minimalią reikšmę.

Imituojant važiavimą pagal patobulintą greičio kreivę, bendros degalų sąnaudos siekė 18,49 l. Palyginimui su eksperimentinės kelionės imitacija – 17,43 l, arba 5,7 % mažesnės. Tokį rezultatą tarpstotyje Dūkštas–Visaginas pavyko pasiekti išnaudojant traukinio riedėjimą nuokalne.

4.2.9 Greičio kreivės skaičiavimai Visaginas–Turmantas tarpstotyje

Paskutinis sustojimas – Turmante. Ji nuo Vilniaus stoties nutolusi 147 km, o nuo Visagino – 10,4 km. Greičio apribojimas iki 146 km 6 pk yra 120 km/h, toliau – 100 km/h.

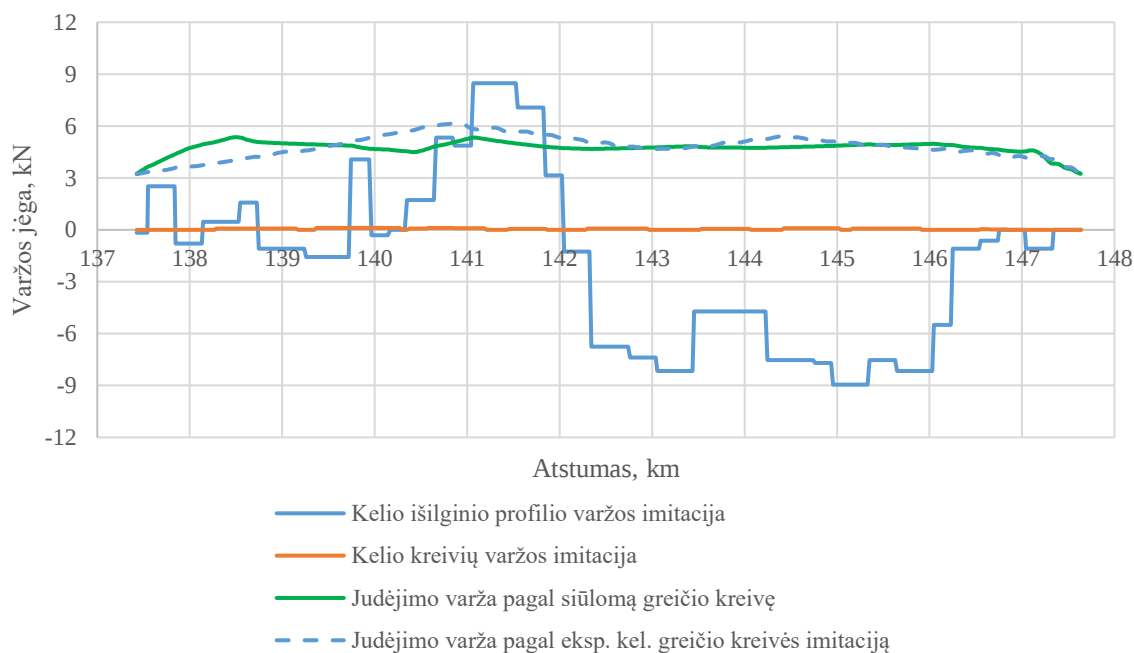
Atlikus eksperimentinės kelionės imitaciją gauta, kad vidutinis greitis lygus 63,09 km/h, o važiavimo laikas – 583 s (9,43 min). Pagal tvarkaraštį tarpstočiui įveikti skirtos 8 minutės, todėl šis tarpstotis įveiktas 1,5 min lėčiau. Siūlomos greičio kreivės maksimali reikšmė, kurią pasiekus traukinys pradeda judėti laisvąja eiga – 79,2 km/h (22 m/s), ir mažiausia, kai vėl pradedama naudoti traukinio pavaros trauka – 63,0 km/h (17,5 m/s). Pasirinkus tokį greičio intervalą, vidutinis greitis buvo 62,74 km/h arba 0,7 % didesnis, o važiavimo trukmė – 586 s arba 0,4 % mažesnė lyginant eksperimentinės kelionės imitacijos rezultatu. Pagerintos greičio kreivės palyginimas su eksperimentinės kelionės imitacija pateiktas 61 pav.



61 pav. Greičio kreivių palyginimas ruože Visaginas–Turmantas

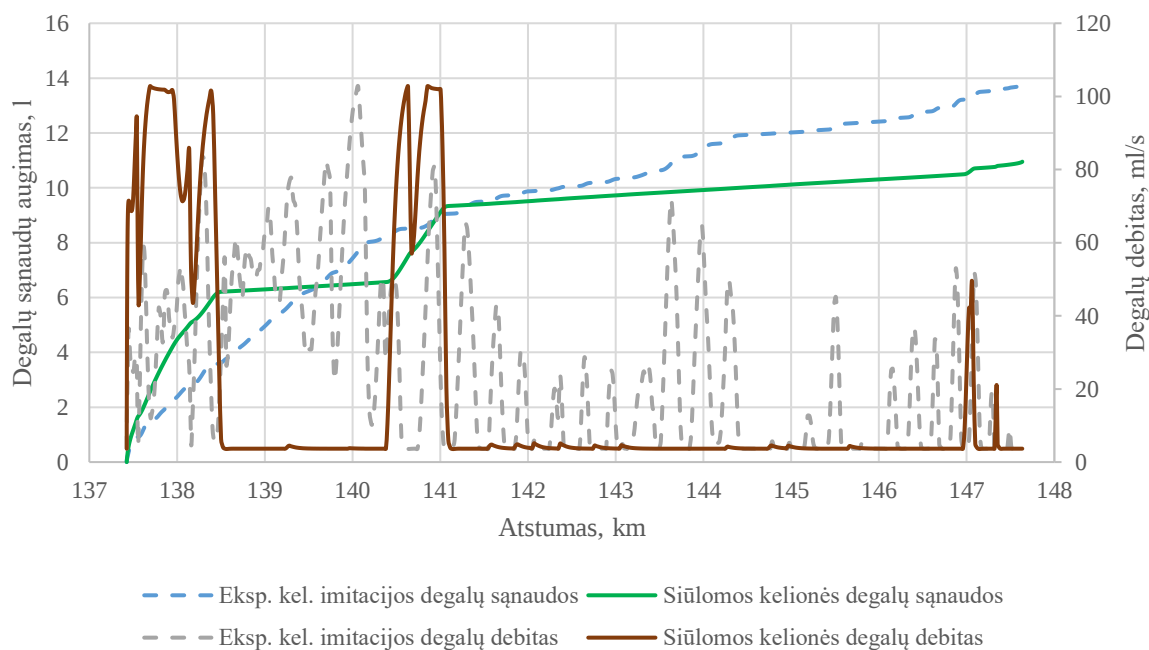
Iš greičio kreivių matyti, kad eksperimentinės kelionės metu maksimalus greitis ruože – 95 km/h, tuo tarpu pagal patobulintą kreivę – 81 km/h. Bandomojoje kelionėje buvo riedama nuo 140 km 4 pk iki 143 km, bet traukinio inercija nėra išnaudojama optimaliai, nes visą šį atstumą yra įkalnė. Siūlomoje greičio grafiką sparčiau įsibėgėjama, taip pat riedėti pradedama

kai kelias lygus arba su nuokalne. Tai leidžia ilgiau išlaikyti minimalų degalų debitą ir sumažinti sumines degalų sąnaudas. Pasipriešinimo jėgų pasiskirstymas tarpstotyje pateikiamas 62 pav.



62 pav. Traukinį veikiančios išorinės jėgos ruože Visaginas–Turmantas

Iš išilginio profilio varžos matyti, kad ruože yra tik viena įkalnė nuo 140 km iki 142 km. Tai palankus ruožas degalų taupymui. Degalų sąnaudų palyginimas pateikiamas 63 pav.



63 pav. Degalų sąnaudų palyginimas ruože Visaginas–Turmantas

Pastovus degalų taupymas pastebimas nuo 141 km, kai traukinys iki tarpstočio pabaigos riedėjo.

Imituojant važiavimą pagal patobulintą greičio kreivę, bendros degalų sąnaudos siekė 13,74 l. Palyginimui su eksperimentinės kelionės imitacija – 10,96 l, arba 20,2 % mažesnės. Tokį rezultatą tarpstotyje Visaginas–Turmantas pavyko pasiekti išnaudojant nuokalnę, kuri prasideda nuo 142 km.

4.3 Skaiciavimo rezultatų apibendrinimas

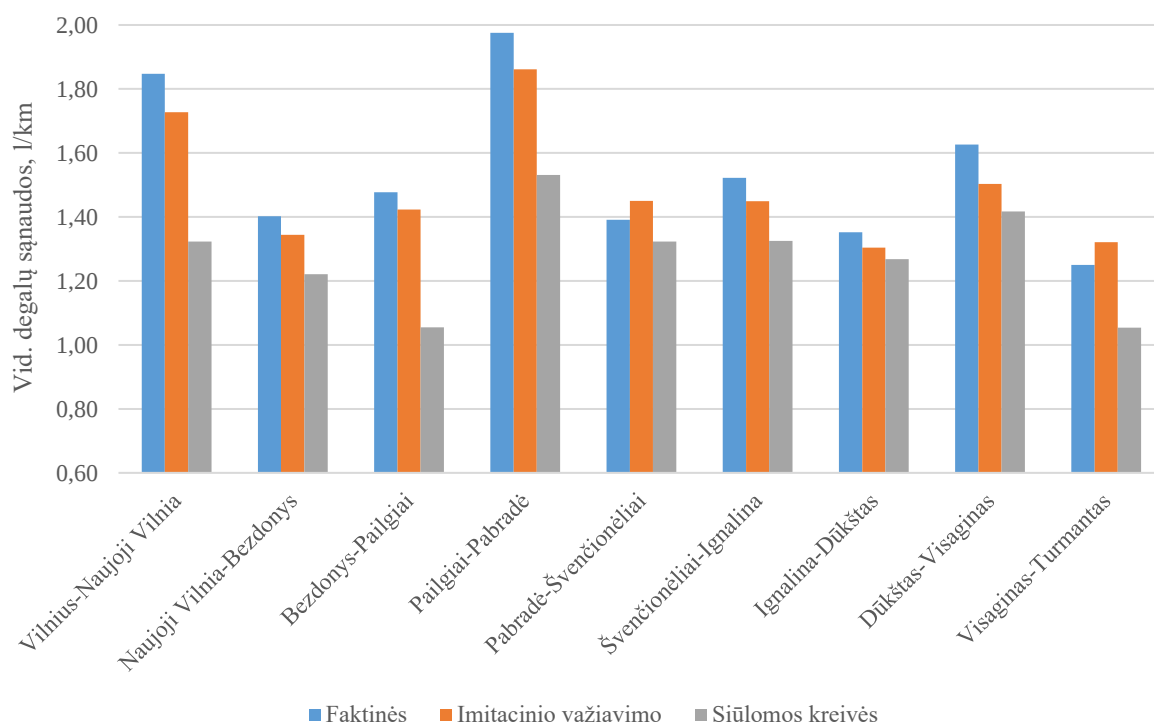
Tyrimo metu atliktas eksperimentinės kelionės imitacinis važiavimas pagal traukinio saugumo sistemos kasetėje įrašytą greičio kreivę ir jos tobulinimas ruože Vilnius–Turmantas. Modeliavimo metu ruožas padalintas į 9 tarpstočius, atsižvelgiant į stotis, kuriose buvo atliekami sustojimai. Perdarant kreivę, išsikelti uždaviniai maksimaliai sumažinti degalų sąnaudas siekiant, kad nepakistų vidutinis tarpstočio įveikimo greitis. Naudojant traukinio valdymo taktiką, kai riedmuo juda laisvąja eiga numatytame greičio intervale, iš viso degalų sąnaudas pavyko sumažinti 14,5 % ir sutaupyti 31,85 l degalų. Eksperimentinės ir siūlomos kelionių važiavimų greičių kreivės pagal laiką pateikiamos 1 priede. Rezultatų palyginimas pateikiamas 4.2 lentelėje.

4.2 lentelė. Bendri eksperimentinės, imitacinės ir siūlomos kelionių rezultatai

Tarpstotis	Važiavimo laikas, s			Vidutinis greitis, km/h			Sąnaudos, l		
	Eksp.	Band. imit.	Siūl.	Eksp.	Band. imit.	Siūl.	Eksp.	Band. imit.	Siūl.
Vilnius–Naujoji Vilnia	771	773	770	42,88	42,81	43,1	17	15,89	12,17
Naujoji Vilnia–Bezdonys	777	786,5	785,8	75,90	75,14	75,21	23	22,04	20,02
Bezdonys–Pailgiai	839	853,4	860	75,85	74,59	74,04	26	25,05	18,56
Pailgiai–Pabradė	422	427,1	428,8	68,49	67,83	67,42	16	15,08	12,4
Pabradė–Švenčionėliai	1148	1166	1171	83,34	82,09	81,73	37	38,58	35,19
Švenčionėliai–Ignalina	992	994,2	993,1	83,78	83,63	83,7	35	33,34	30,48
Ignalina–Dūkštas	996	1014	1016	88,12	86,64	86,41	33	31,82	30,94
Dūkštas–Visaginas	573	596,7	592,6	76,09	73,30	73,60	20	18,49	17,43
Visaginas–Turmantas	575	582,5	585,6	63,92	63,09	62,74	13	13,74	10,96
Viso:	7093	7193,4	7202,9	73,15	72,12	71,99	220	214,03	188,15

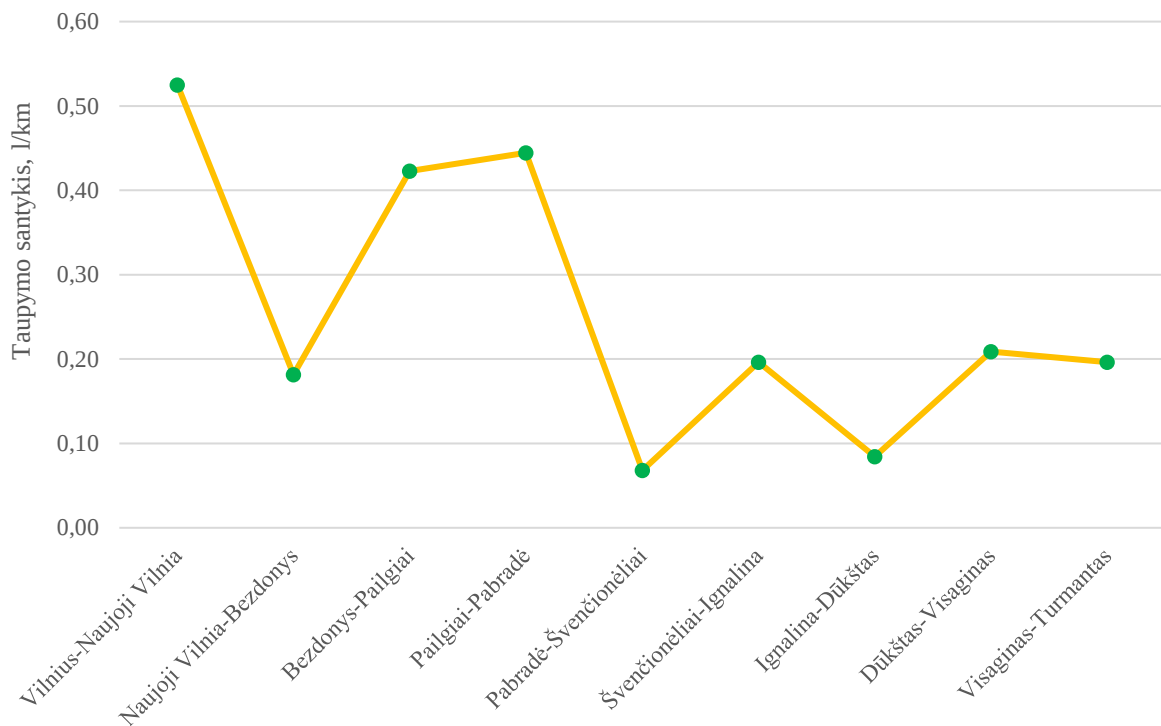
Nagrinėjant rezultatus matyti, kad pagal siūlomą greičio kreivę iš viso sutaupoma 14,5 % degalų, bet visų tarpstočių vidutinio greičio vidutinė reikšmė buvo 1,6 % mažesnė už eksperimentinės kelionės rezultatą, o tai yra 1,5 % arba 110 s ilgesnis važiavimo laikas. Pabradė–Švenčionėliai tarpstotyje fiksuotas didžiausias važiavimo laiko pailgėjimas – 23 s. Dūkštas–Visaginas buvo didžiausias vidutinio greičio nsumažėjimas – 2,49 km/h. Didžiausia energijos sąnaudų dalis sutaupyta tarpstočiuose Vilnius–Naujoji Vilnia, Bezdonys–Pailgiai ir Švenčionėliai–Ignalina. O mažiausias sąnaudų skirtumas pastebimas tarpstočiuose Pabradė–Švenčionėliai ir Visaginas–Turmantas.

Palyginimas tarp eksperimentinės kelionės metu užfiksuotų, jos imitacinio važiavimo ir siūlomos greičio kreivės sugeneruotų vidutinių degalų sąnaudų kiekviename tarpstotyje pateikiamas 64 pav.



64 pav. Degalų sąnaudų palyginimas pagal tarpstočius

Siūlomos greičio kreivės efektyvumui įvertinti naudojamas išvestinis taupymo santykinis dydis, kuris įvertina tarpstotyje sutaupyta degalų kiekį pagal nuvažiuotą atstumą. Lyginami rezultatai tarp eksperimentinės kelionės imitacinio važiavimo ir siūlomos greičio kreivės. Taupymo santykis kiekviename tarpstotyje pateikiamas 65 pav.



65 pav. Siūlomos greičio kreivės degalų taupymo koeficientų rezultatai pagal tarpstočius

Žvelgiant į taupymo santykį, tendencija skiriasi – pagal siūlomą greičio kreivę degalai labiausiai taupomi tarpstočiuose Vilnius–Naujoji Vilnia, Bezdonys–Pailgiai, Pailgiai–Pabradė. Siūloma kreivė mažiausiai pasiteisina ruožuose Ignalina–Dūkštas ir Dūkštas–Visaginas. Tai rodo, kad bandomojoje kelionėje šiuos ruožus pavyko įveikti ekonomiškiausiai.

Atsižvelgiant į tarpstočius, kuriuose siūloma greičio kreivė lemia geriausius rezultatus, galima apibendrinti, kas padeda taupyti energijos sąnaudas:

- Riedėjimas laisvąja eiga – lyginant imitacinių važiavimų greičių grafikus padaryta išvada, kad taktika pasiekus viršutinę numatyto greičio intervalo reikšmę leisti traukiniui judėti laisvąja eiga iki apatinės yra veiksminga. Riedant tokiu būdu, degalų debito reikšmė artėja iki minimumo, o didinant greitį tarp riedėjimo fazių, didėja iki maksimumo. Tai yra efektyviau nei palaikyti pastovų greitį, kai sunaudojamų degalų kiekis svyruoja apie vidutinę debito reikšmę.
- Ruožo profilio išnaudojimas – susipažinus su ruožo kelio profilio planu, jį galima išnaudoti degalų taupymui. Palyginus greičio kreivių imitacijas su ruožų profiliais pastebėta, kad degalai taupomi labiausiai, kai riedėti pradama nuokalnės pradžioje arba kai kelias horizontalus.

- Maksimalaus greičio mažinimas – važiuojant lėčiau, mažėja ir traukinio judėjimo varža. Taip mažesnė energijos dalis sunaudojama ratų riedėjimo ir oro pasipriešinimo jėgai įveikti.
- Greitas įsibėgėjimas ir vėlyvas stabdymas – lėtesnį traukinio važiavimą galima kompensuoti spartesniu įsibėgėjimu ir vėlesniu stabdymu. Tai leidžia sumažinti didžiausio greičio reikšmę ruože nepakeičiant vidutinio greičio.

Nagrinėjant eksperimentinės kelionės greičio kreivės charakteristikas matyti, kad tarpstočiai įveikti naudojant skirtingas traukos riedmenų valdymo technikas. Lyginant jas su patobulinta greičio kreive išryškėjo, kokie traukinio valdymo ypatumai yra efektyviausi siekiant mažinti degalų sąnaudas. Tyrimo metu nagrinėta tik viena bandomoji kelionė ir tobulinant jos greičio grafiką vidutinis greitis nebuvo keičiamas. Vidutinis greitis koreliuoja su energijos sąnaudomis, todėl turėtų būti ieškoma optimali jo reikšmė, kuriai esant būtų važiuojama pagal tvarkaraštį, o kartu sumažinamos sąnaudos.

Kitas aspektas – pagal patobulintą kreivę kiekviename tarpstotyje numatytas greičio intervalas, kuriame traukinys rieda laisvąja eiga. Jis nekeičiamas visame modeliujame ruože. Siekiant efektyviau išnaudoti traukinio inerciją, šios greičio intervalų ribos turėtų dinamiškai kisti priklausomai nuo ruožo kelio profilio.

Pastebėta problema, kad naujos greičio kreivės modeliavimas ilgai užtrunka, nes reikia apdoroti daug duomenų ir juos lyginti tarpusavyje, ieškant efektyviausių traukinio valdymo metodų. Šį darbą galėtų atlikti dirbtinis intelektas, jam pateikus įvykusių kelionių parametrus ir suformavus užduotį išanalizuoti bei pateikti efektyviausią traukinio greičio kreivę visame ruože. Tiesa, šiuo metu toks pasiūlymas nėra įgyvendinamas, nes įmonės dar nėra pasiruošusios naudoti jautrios informacijos dirbant su dirbtiniu intelektu.

Išvados

1. Išanalizavus mokslinę literatūrą aptarti įvairūs traukinių energijos sąnaudų mažinimo būdai. Remiantis moksliniais tiriamaisiais darbais pastebėta, kad energijos sąnaudas galima sumažinti sudarius traukinio efektyvaus valdymo planą. Jis padėtų taupiau valdyti traukinį mašinistams, turintiems mažiau patirties. Efektyviausiai keleivinio traukinio energijos sąnaudas sumažinti leidžia traukinio valdymo taktika, jam leidžiant maksimaliai judėti laisvąja eiga.
2. Tyrimo metu atlikta eksperimentinė kelionė maršrutu Vilnius–Turmantas keleiviniu traukiniu Nr. 662. Jos metu gauti duomenys apie degalų kiekius, sunaudotus kiekviename tarpstotyje. Bendros degalų sąnaudos – 220 l, vidutinės sąnaudos 1,50 l/km.
3. Eksperimento metu užfiksuota greičio pagal atstumą kreivė iš traukinio saugumo sistemos KLUB–U. Jos duomenys panaudoti atliekant traukinio imitacinius važiavimus ir modeliuojant efektyvesnę greičio kreivę, kuria naudojantis degalų sąnaudos būtų mažesnės.
4. Programoje „Matlab / Simulink“ sukurtas matematinis PESA 730ML traukinio modelis, leidžiantis imituoti traukinio judėjimą geležinkelio ruože Vilnius–Turmantas. Modelyje galima koreguoti įvairius traukinio ir kelio parametrus ir stebėti jų įtaką rezultatams. Taip pat, sukurtas modulis, leidžiantis apskaičiuoti degalų sąnaudas. Atlikus eksperimentinės kelionės imitaciją, apskaičiuotos degalų sąnaudos skyrėsi 2,8 % nuo užfiksuotų eksperimento metu. Priimta, kad toks tikslumas leidžia atlikti skaitinį modeliavimą neatliekant eksperimentinių bandymų ir analizuoti rezultatus.
5. Atlikta degalų sąnaudų statistinė analizė ruože Vilnius–Turmantas. Nagrinėjant teorines pasiskirstymo funkcijas pastebėta, kad PESA 730ML degalų sąnaudų rezultatai ruože Vilnius–Turmantas yra išsidėstę platesniame intervale nei iki šiol naudojamų kito tipo dyzelinių traukinių. Tai rodo, kad mašinistai naujesnį traukinį šiame kelyje valdo ne taip efektyviai, todėl traukinio valdymo planas, padedantis taupyti energiją, būtų naudingas.
6. Tyrimo metu atliktas greičio kreivės tobulinimas vyko išskirstant ruožą į 9 tarpstočius pagal traukinį Nr. 662 tvarkaraštyje numatytus sustojimus ir nagrinėjant kiekvieną dalį atskirai. Imituojant traukinio važiavimus, pritaikyta valdymo taktika riedėti laisvąja eiga esant numatytam greičio intervalui. Pagal siūlomą greičio kreivę, gautos 14,5 % mažesnės degalų sąnaudos nei eksperimentinės kelionės, o tai yra vidutinių sąnaudų sumažėjimas nuo 1,50 l/km iki 1,28 l/km. Važiavimo laikas padidėjo 1,5 %, o vidutinis greitis sumažėjo 1,6 %.

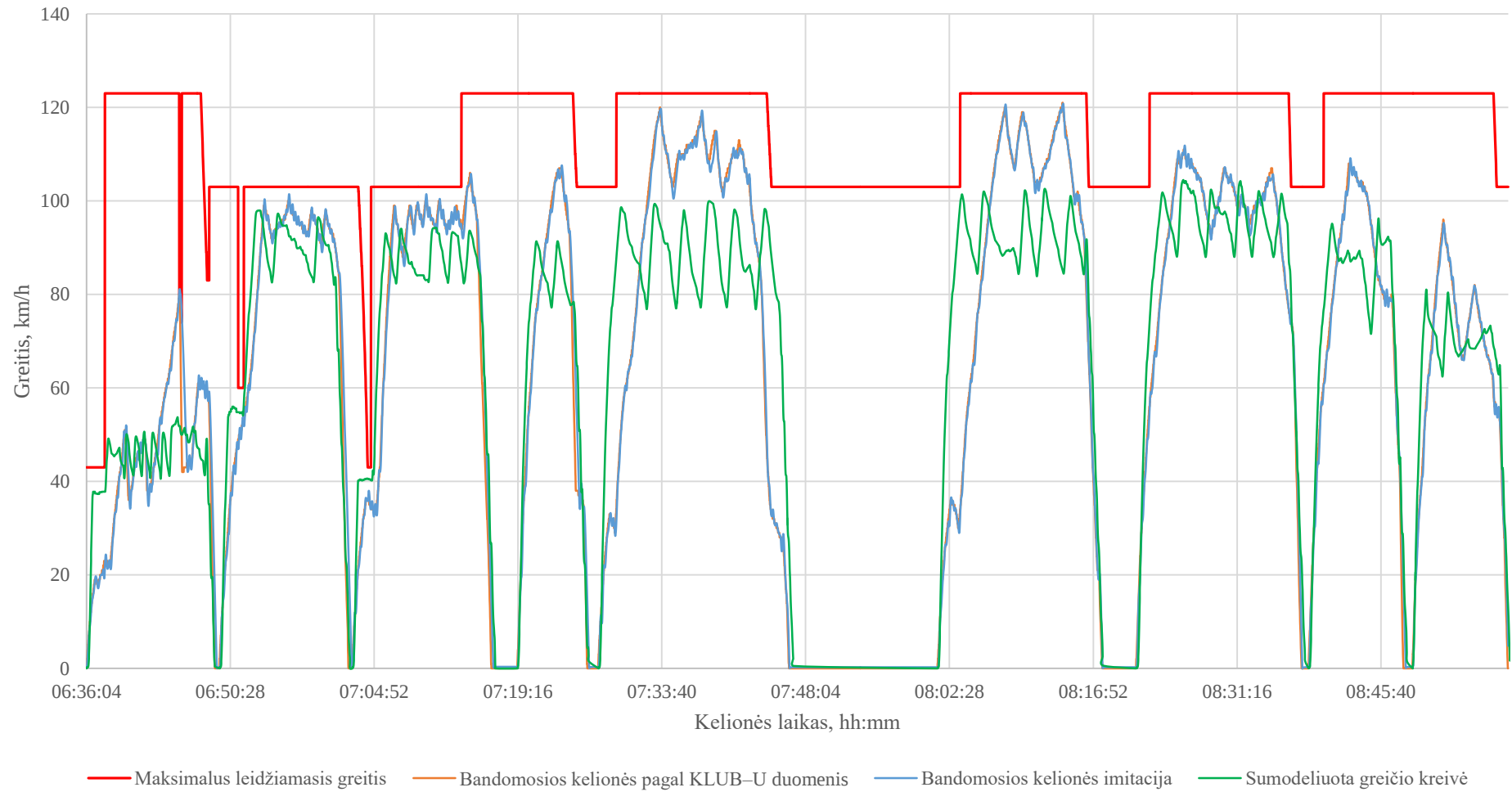
7. Tobulinant greičio kreivę įsitikinta, kad būtų naudinga apžvelgti didesnę duomenų iš kelionių masyvą ir skaičiavimo metodikoje turėti galimybę keisti vidutinį traukinio važiavimo laiką tarpstotyje. Tam galėtų būti naudojamas dirbtinis intelektas. Jis pasitarnautų ieškant efektyviausių traukinio valdymo charakteristikų konkrečiuose taškuose ir padėtų sutrumpinti modeliavimo trukmę.
8. Nagrinėjant tyrimo rezultatus sudaryta traukinio efektyvaus valdymo nustatymo metodika. Ją galima pritaikyti įvairių traukinių greičio kreivėms tobulinti bet kokiame ruože. Tyrimo metodikos pritaikymas praktikoje yra aktualus, nes geležinkelių transporto įmonės naudodamos energijos sąnaudas mažinančias greičio kreives galėtų pagerinti veiklos rezultatus ir gauti ekonominę naudą.

Literatūros sąrašas

1. 730ML konstrukcinė techninės priežiūros ir remonto dokumentacija. (2016). PESA Bydgoszcz, AB „Lietuvos Geležinkeliai“.
2. AB „Lietuvos geležinkeliai“ CO₂ emisijos. (2024).
3. Bureika, G. (2021). *Riedmenų traukos teorija* [Bakalauro paskaitų užrašai].
4. Cismaru, D. C. (2018). Energy Efficient Train Operation using Simulated Annealing Algorithm and SIMULINK model. *2018 International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICATE.2018.8551415>
5. Cismaru, D. C., Drighiciu, M. A., & Nicola, D. A. (2014). SIMULINK model for study of energy efficient train control. *2014 International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICATE.2014.6972685>
6. Cole, C. (2020, gegužės 27). Simple Models for Longitudinal Train Dynamics. *MATLAB Central File Exchange*. <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/76253-simple-models-for-longitudinal-train-dynamics>
7. Darlington, P. (2019, lapkričio 4). KeTech – Connected Driver Advisory System. *RailEngineer*. <https://www.railengineer.co.uk/ketech-connected-driver-advisory-system/>
8. Europos Komisija. (2019a). *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. (2019b). *Komisijos komunikatas: Europos žaliasis kursas*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/LT/TXT/HTML/?uri=CELEX:52019DC0640>
10. Europos Vadovų Taryba – Europos Sąjungos Taryba. (2020). *Europos geležinkelių metai (2021 m.). Taryba susitarė dėl pozicijos, kuria pritariama šiai iniciatyvai*. ES Taryba. <https://www.consilium.europa.eu/lt/press/press-releases/2020/06/24/european-year-of-rail-2021-council-agrees-its-position-in-support-of-the-initiative/>
11. Fernández-Rodríguez, A., Fernández-Cardador, A., & Cucala, A. P. (2018). Balancing energy consumption and risk of delay in high speed trains: A three-objective real-time eco-driving algorithm with fuzzy parameters. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 95, 652–678. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.08.009>
12. Yin, J., & Chen, D. (2013). An intelligent train operation algorithm via gradient descent method and driver's experience. *2013 IEEE International Conference on Intelligent Rail Transportation Proceedings*, 54–59. <https://doi.org/10.1109/ICIRT.2013.6696267>
13. Yurenko, K., Fandeev, E., & Kharchenko, P. (2018). Investigation of Optimal Train Movement Modes by Means of Simulation Modeling. *2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501812>
14. Jakubowski, A., & Jarzebowicz, L. (2021). Practical Eco-Driving Strategy for Suburban Electric Multiple Unit. *2021 28th International Workshop on Electric Drives: Improving Reliability of Electric Drives (IWED)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/IWED52055.2021.9376349>
15. 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>
16. Li, G., Zhang, Z., Shi, W., & Li, W. (2023). Energy management strategy and simulation analysis of a hybrid train based on a comprehensive efficiency optimization. *Applied Energy*, 349, 121733. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121733>
17. „LTG Infra“. (2021). *GELEŽINKELIO KELIO RUOŽE VILNIUS – KENA – VALSTYBĖS SIENA PLANO IR IŠILGINIO PROFILIO TIKRINIMAS KM 0+000.0 – 35+949.0*. AB „LTG Infra“.

18. „LTG Infra“. (2021). *GELEŽINKELIO RUOŽO NAUJOJI VILNIA - TURMANTAS VALSTYBĖS SIENA KELIO PLANAS IR IŠILGINIS PROFILIS KM -0+600.0 – 139+132.1*. AB „LTG Infra“.
19. LTG Link. (2024). *2023-2024 m. Galutinis tvarkaraštis nuo 2024-03-04*. LTG Link.
20. „LTG Link“ 2023 metinės ataskaitos (p. 89). (2024). https://doc.ltg.lt/lt/apie_mus/veiklos_rezultatai/2023/metine/LTG%20Link_2023_Metin%C4%97%20ataskaita.pdf?_gl=1*1c5wt9u*_up*MQ.*_ga*MTU3ODg1OTU4NS4xNzE2NzQzOTY2*_ga_94QCJKTK8Y*MTcxNjc0Mzk2NS4xLjAuMTcxNjc0Mzk2NS4wLjAuMA..
21. *LTG Link strategija 2024-2050*. (2023). LTG Link.
22. MAN Truck & Bus AG. (2016). *D2862. MAN high speed marine engines for medium duty applications*.
23. MathWorks, *Battery State of Charge*. (2022). MathWorks. <https://se.mathworks.com/help/vdynblks/ref/simpleengine.html>
24. MathWorks, *Longitudinal Driver*. (2017). MathWorks. <https://se.mathworks.com/help/autoblks/ref/longitudinaldriver.html>
25. MathWorks, *Simple Engine*. (2021). MathWorks. <https://se.mathworks.com/help/vdynblks/ref/simpleengine.html>
26. Montrone, T., Pellegrini, P., & Nobili, P. (2017). Energy Consumption Minimization Problem In A Railway Network. *Transportation Research Procedia*, 22, 85–94. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.03.013>
27. Nauji elektriniai traukiniai. (2023). *Lietuvos geležinkeliai*. <https://ltg.lt/tvarumas/tvarumo-projektai/nauji-elektriniai-traukiniai-gretai/>
28. Qadir, Z., Munir, A., Ashfaq, T., Munawar, H. S., Khan, M. A., & Le, K. (2021). A prototype of an energy-efficient MAGLEV train: A step towards cleaner train transport. *Cleaner Engineering and Technology*, 4, 100217. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100217>
29. Spiriyagin, M., Cole, C., Sun, Y. Q., McClanachan, M., Spiriyagin, V., & McSweeney, T. (2014). *Design and Simulation of Rail Vehicles* (0 leid.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b17029>
30. Trivella, A., Wang, P., & Corman, F. (2021). The impact of wind on energy-efficient train control. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 10, 100013. <https://doi.org/10.1016/j.ejtl.2020.100013>
31. UAB „LTG Link“ 2020 metinė ataskaita (p. 90). (2021). <https://www.litrail.lt/documents/10279/0/UAB+%E2%80%9ELTG+Link%E2%80%9C%20metin%C4%97%20ataskaita+2020/e6e54dd6-89be-48b1-bf3e-708c501bd4ef>
32. Vestartas, A., & Nagurnas, S. (2004). Transporto mašinų patikimumo teorija, namų darbų metodiniai nurodymai. *Transporto mašinų patikimumo teorija* (p. 13).
33. Wang, J., & Rakha, H. A. (2017). Electric train energy consumption modeling. *Applied Energy*, 193, 346–355. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.02.058>
34. Xie, J., Zhang, J., Sun, K., Ni, S., & Chen, D. (2021). Passenger and energy-saving oriented train timetable and stop plan synchronization optimization model. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 98, 102975. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102975>
35. Xie, T., Wang, S., Zhao, X., & Zhang, Q. (2013). Optimization of Train Energy-Efficient Operation Using Simulated Annealing Algorithm. K. Li, S. Li, D. Li, & Q. Niu (Sud.), *Intelligent Computing for Sustainable Energy and Environment* (T. 355, p. 351–359). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-37105-9_39

1 priedas. Skaičiuojamų greičio kreivių priklausomybė nuo valdymo bloko numatomo kelio atstumo



2 priedas. Funkcijos $f_0(T) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{T^2}{2}}$ reikšmės

T		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0	0,	3989	3989	3988	3988	3986	3984	3982	3980	3977	3973
0,1	0,	3970	3965	3961	3956	3951	3945	3939	3932	3925	3918
0,2	0,	3910	3902	3894	3885	3876	3867	3857	3847	3836	3825
0,3	0,	3814	3802	3790	3778	3765	3752	3739	3725	3712	3697
0,4	0,	3683	3668	3653	3637	3621	3605	3589	3572	3555	3538
0,5	0,	3521	3503	3485	3467	3448	3429	3410	3391	3372	3352
0,6	0,	3332	3312	3292	3271	3251	3230	3209	3187	3166	3144
0,7	0,	3123	3101	3079	3056	3034	3011	2989	2966	2943	2920
0,8	0,	2897	2874	2850	2827	2803	2780	2756	2732	2709	2685
0,9	0,	2661	2637	2613	2589	2565	2541	2516	2492	2468	2444
1,0	0,	2420	2396	2371	2347	2323	2299	2275	2251	2227	2203
1,1	0,	2179	2155	2131	2107	2083	2059	2036	2012	1989	1965
1,2	0,	1942	1919	1895	1872	1849	1826	1804	1781	1758	1736
1,3	0,	1714	1691	1669	1647	1626	1604	1582	1561	1539	1518
1,4	0,	1497	1476	1456	1435	1415	1394	1374	1354	1334	1315
1,5	0,	1295	1276	1257	1238	1219	1200	1182	1163	1145	1127
1,6	0,0	1109	1092	1074	1057	1040	1023	1006	0989	0973	0957
1,7	0,0	9405	9246	9089	8933	8780	8628	8478	8329	8183	8038
1,8	0,0	7895	7754	7614	7477	7341	7206	7074	6943	6814	6687
1,9	0,0	6562	6438	6316	6195	6077	5959	5844	5730	5618	5508
2,0	0,0	5399	5292	5186	5082	4980	4879	4780	4682	4586	4491
2,1	0,0	4398	4307	4217	4128	4041	3955	3871	3788	3706	3626
2,2	0,0	3547	3470	3394	3319	3246	3174	3103	3034	2965	2898
2,3	0,0	2833	2768	2705	2643	2582	2522	2463	2406	2349	2294
2,4	0,0	2239	2186	2134	2083	2033	1984	1936	1888	1842	1797
2,5	0,0	1753	1709	1667	1625	1585	1545	1506	1468	1431	1394
2,6	0,0	1358	1324	1289	1256	1223	1191	1160	1130	1100	1071
2,7	0,0	1042	1014	0987	0961	0935	0909	0885	0861	0837	0814
2,8	0,00	7915	7696	7483	7274	7071	6873	6679	6491	6307	6127
2,9	0,00	5952	5782	5616	5454	5296	5143	4993	4847	4705	4567
3,0	0,00	4432	4301	4173	4049	3928	3810	3695	3584	3475	3370
3,	0,00	4432	3267	2384	1723	1232	0873	0612	0425	0292	0199
4,	0,0 ³	1338	0893	0589	0385	0249	0160	0101	0064	0040	0024
5,	0,0 ⁵	1487	0897	0536	0317	0186	0108	0062	0035	0020	0011

3 priedas. Funkcijos $F_0(T) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{+\infty} e^{-\frac{T^2}{2}} dT$ reikšmės

T		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0	0,	5000	5040	5080	5120	5160	5199	5239	5279	5319	5359
0,1	0,	5398	5438	5478	5517	5557	5596	5636	5675	5714	5753
0,2	0,	5793	5832	5871	5910	5948	5987	6026	6064	6103	6141
0,3	0,	6179	6217	6255	6293	6331	6368	6406	6443	6480	6517
0,4	0,	6551	6594	6628	6664	6700	6736	6772	6808	6844	6879
0,5	0,	6915	6950	6985	7019	7054	7088	7123	7157	7190	7224
0,6	0,	7257	7291	7321	7357	7389	7422	7454	7484	7517	7549
0,7	0,	7580	7611	7642	7673	7704	7734	7764	7794	7823	7852
0,8	0,	7881	7910	7939	7967	7995	8023	8051	8078	8106	8133
0,9	0,	8159	8186	8212	8238	8264	8289	8315	8340	8365	8389
1,0	0,	8413	8438	8461	8485	8508	8531	8554	8577	8599	8621
1,1	0,	8643	8665	8686	8708	8729	8749	8770	8790	8810	8830
1,2	0,	8849	8869	8888	8907	8925	8944	8962	8980	8997	9015
1,3	0,9	0320	0490	0658	0824	0988	1149	1308	1466	1621	1774
1,4	0,9	1924	2073	2220	2364	2507	2647	2785	2922	3056	3189
1,5	0,9	3319	3448	3574	3699	3822	3943	4062	4179	4295	4408
1,6	0,9	4520	4630	4738	4855	4950	5053	5154	5254	5352	5449
1,7	0,9	5543	5637	5728	5818	5907	5994	6080	6164	6246	6327
1,8	0,9	6407	6485	6562	6637	6712	6784	6856	6926	6995	7062
1,9	0,9	7128	7193	7257	7320	7381	7441	7500	7588	7615	7670
2,0	0,9	7725	7778	7831	7882	7932	7982	8030	8077	8124	8369
2,1	0,9	8214	8257	8300	8341	8382	8422	8461	8500	8537	8574
2,2	0,9	8610	8645	8679	8713	8745	8778	8809	8840	8870	8899
2,3	0,9	8928	8956	8983	9010	9036	9061	9086	9111	9134	9158
2,4	0,99	1802	2024	2240	2451	2656	2857	3053	3244	3431	3613
2,5	0,99	3790	3963	4132	4297	4457	4614	4766	4915	5060	5201
2,6	0,99	5339	5473	5603	5731	5855	5975	6093	6207	6310	6427
2,7	0,99	6533	6636	6736	6833	6928	7020	7110	7197	7282	7365
2,8	0,99	7445	7523	7509	7673	7774	7814	7882	7948	8012	8074

2,9	0,99	8134	8193	8250	8305	8359	8411	8462	8511	8559	8605
3,0	0,99	8650	8694	8736	8777	8817	8856	8893	8930	8965	8999
3,1	0,9 ³	0324	0646	0957	1260	1553	1836	2112	2378	2636	2886
3,2	0,9 ³	3129	3363	3590	3810	4022	4230	4429	4623	4810	4991
3,3	0,9 ³	5166	5335	5499	5658	5811	5959	6103	6242	6376	6505
3,4	0,9 ³	6631	6752	6869	6982	7091	7197	7299	7398	7493	7585
3,5	0,9 ³	7674	7760	7842	7922	7999	8074	8146	8215	8282	8347
3,6	0,9 ³	8409	8469	8527	8583	8637	8689	8739	8787	8834	8879
3,7	0,9 ³	8922	8964	9004	9043	9080	9116	9150	1849	9216	9247
3,8	0,9 ⁴	2765	3052	3327	3593	3848	4094	4331	4558	4777	4988
3,9	0,9 ⁴	5190	5385	5573	5753	5926	6082	6252	6406	6554	6696
4,0	0,9 ⁴	6833	6964	7090	7211	7327	7439	7546	7649	7748	7843
4,1	0,9 ⁴	7934	8022	8106	8186	8264	8338	8409	8477	8542	8606
4,2	0,9 ⁴	8665	8723	8778	8832	8882	8931	8978	9023	9066	9107
4,3	0,9 ⁵	1460	1837	2198	2544	2876	3193	3497	3788	4066	4332
4,4	0,9 ⁵	4588	4832	5065	5288	5502	5706	5902	6089	6268	6439
4,5	0,9 ⁵	6602	6759	6908	7051	7187	7318	7442	7561	7675	7784
4,6	0,9 ⁵	7888	7987	8081	8172	8258	8340	8419	8494	8566	8634
4,7	0,9 ⁵	8699	8761	8821	8877	8931	8983	9032	9079	9124	9166
4,8	0,9 ⁶	2067	2454	2882	3173	3508	3827	4131	4420	4696	4958
4,9	0,9 ⁶	5208	5446	5673	5888	6094	6289	6475	6652	6821	6981
5,0	0,9 ⁶	7134	7278	7416	7548	7672	7791	7904	8011	8113	8210
5,1	0,9 ⁶	8302	8389	8472	8551	8626	8698	8765	8830	8891	8949
5,2	0,9 ⁷	004	056	105	152	197	240	280	318	354	388
5,3	0,9 ⁷	421	452	481	509	539	560	584	606	628	648
5,4	0,9 ⁷	667	685	702	718	734	748	762	775	787	799
5,5	0,9 ⁷	810	821	831	840	849	857	865	873	880	886
5,6	0,9 ⁷	893	899	906	910	915	920	924	929	933	936
5,7	0,9 ⁸	40	44	47	50	53	55	58	60	63	65
5,8	0,9 ⁸	67	69	71	72	74	75	77	78	79	81
5,9	0,9 ⁸	82	83	84	85	86	87	87	88	89	90
6,0	0,9 ⁸	90	—	—	—	—	—	—	—	—	—