

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

TRANSPORTO INŽINERIJOS FAKULTETAS

TRANSPORTO TECHNOLOGINIŲ ĮRENGINIŲ KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(Parašas)

(Vardas, pavardė)

Larisa Valentinovič

**SKIRTINGO PLOČIO VĖŽĖMIS VAŽIUOJANČIŲ TRAUKINIŲ EISMO
VALDYMO MODELIAVIMAS IR TYRIMAS**

**TRAFFIC MANAGEMENT MODELING AND RESEARCH OF TRAIN
TRAVELING THROUGH DIFFERENT WIDTH TRACKS**

Baigiamasis magistro darbas

Transporto inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas **621E20003**

Transporto technologinių sistemų inžinerijos specializacija

Sausumos transporto inžinerijos studijų kryptis

Vadovas

hab. p. dr. prof. Henrikas Sivilavičius

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

(Parašas)

(Data)

2017 05 31

Lietuvių kalbos konsultantė

lekt. A. Fehtienė

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

(Parašas)

(Data)

2017-05-30

Vilnius, 2017

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
TRANSPORTO INŽINERIJOS FAKULTETAS
TRANSPORTO TECHNOLOGINIŲ ĮRENGINIŲ KATEDRA

Transporto inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 621E20003

Transporto technologinių sistemų inžinerijos specializacija

Sausumos transporto inžinerijos studijų kryptis

TVIRTINU

Katedros vedėjas

(Parasas)

(Vardas, pavardė)

(Data)

BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO
UŽDUOTIS

Nr.

Vilnius

Studentui(ei).....LarisaValentinovič.....
(Vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo tema: Skirtingo pločio vėžėmis važiuojančių traukinių eismo valdymo modeliavimas ir tyrimas

patvirtinta 2015 m. lapkričio 3 d. dekanų potvarkiu Nr. 3361

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2015 m. gegužės 23 d.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

Išanalizavus mokslą darbus, skirtus vienodo ir skirtingo pločio vėžėmis važiuojančių traukinių pralaidumui didinti, pateikti patobulintą jų eismo valdymo plėtros sistemą, pagrįstą traukų skaičiavimais. Ištirti įvairias skirtingo pločio vėžėmis važiuojančių traukinių eismo valdymo metodus, pateikti jų privalumus ir trūkumus. Teoriškai ir iš eksperimentinių tyrimų nustatyti geležinkelio infrastruktūros pralaidumui lemiančius veiksnius, juos sumodeliuoti, įvertinti ir pateikti optimalius sprendinius, leidžiančius padidinti traukinių eismo intensyvumą.

Baigiamojo darbo rengimo konsultantai:

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

Vadovas

(Parasas)

habil dr. prof. Henrikas Sivilevičius

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

Užduotį gavau

(Parasas)

Larisa Valentinovič

(Vardas, pavardė)

2015 04 22

(Data)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
TRANSPORTO INŽINERIJOS FAKULTETAS
TRANSPORTO TECHNOLOGINIŲ ĮRENGINIŲ KATEDRA

Transporto inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 621E20003

Transporto technologinių sistemų inžinerijos specializacija

Sausumos transporto inžinerijos studijų kryptis

PAŽYMA
APIE BAIGIAMĄJĮ MAGISTRO DARBĄ

.....Nr.

Vilnius

Studentas(ė).....LarisaValentinovič.....
(Vardas, pavardė)

Studento (ės) studijų svertinis įvertinimų vidurkis.....9,17.....balo.

Baigiamojo darbo tema: Skirtingo pločio vėžėmis važiuojančių traukinių eismo valdymo modeliavimas ir tyrimas

Baigiamasis darbas peržiūrėtas ir studentui (ei) Larisai Valentinovič
leidžiama ginti šį baigiamąjį darbą magistro laipsnio suteikimo komisijoje.

Katedros vedėjas

.....
(Parašas)

habil. Dr. Prof. Marijonas Bogdevičius
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

VADOVO ATSILIEPIMAS
APIE BAIGIAMĄJĮ MAGISTRO DARBĄ

2017.05.30...

Magistrantė pasirinko iš asmeninio darbo traukinių eismo valdymo centre, jai gerai žinoma, praktinę reikimą turinčią, perspektyvią ir reikalaujančią esminių pokyčių problemą. Ji magistrantūros studijose VGTU ir Vokietijoje studentų mainų vykdytoje programoje įgytas žinias tinkamai panaudojo rengdama baigiamąjį darbą. Ypač įdomu pažymėtina tai, kad iš baigiamojo magistro darbo tematikos pristatė 2 mokslinius pranešimus tarptautinėse mokslo konferencijose „Environmental Engineering“ įvykusiose Vilniuje 2014 ir 2017 metais. Pranešimų medžiaga atspausdinta konferencijų 2 straipsniuose, išspausdintose i Mokslinės informacijos instituto duomenų bazės „ISI Proceedings“ leidiniuose. Magistrantė rengdama baigiamąjį darbą, buvo savarankiška, perskaitė daug mokslinių publikacijų, įgijo reikiamos kompetencijos ir gebėjimų, išmoko tinkamų įrankių, leidusių spęsti sudėtingus transporto inžinerijos uždavinius (darbo vertina 10).

Vadovas

.....
(Parašas)

habil. dr. prof. Henrikas Sivilevičius
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Larisa Valentinovič

(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)

Transporto inžinerijos fakultetas

(Fakultetas)

Transporto inžinerijos programų, 621F20003

(Studijų programa/akademine grupė)

BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO)
SĄŽININGUMO DEKLARACIJA

20 14 m. Gegužės 30 d.
(Data)

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas (projektas) tema Skirtingo pločio
vežėmis važiuojančių traukinių eismo valdymo
modeliavimas ir tyrimas

patvirtintas 20 _____ m. _____ d. dekanų potvarkiu Nr. _____, yra
savarankiškai parašytas. Šiame darbe (projekte) pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar
netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Prenkant ir įvertinant medžiagą bei rengiant baigiamąjį darbą (projektą), mane konsultavo
mokslininkai ir specialistai: _____

Mano darbo (projekto) vadovas habil. dr. prof. Henrikas Sivilevičius

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

(Parasas)

Larisa Valentinovič
(Vardas ir pavardė)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Transporto inžinerijos fakultetas
Transporto technologinių įrenginių katedra

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

Antrosios pakopos studijų **Transporto inžinerijos** programos baigiamasis magistro darbas
Pavadinimas **Skirtingo pločio vėžėmis važiuojančių traukinių eismo valdymo modeliavimas ir tyrimas**
Autorius **Larisa Valentinovič** Vadovas **habil. dr. prof. Henrikas Sivilevičius**

Kalba
lietuvių

Annotacija

Baigiamajame magistro darbe nagrinėjamos skirtingo pločio vėžėmis traukinių eismo valdymo sistemos, traukos skaičiavimo metodikos. Remiantis Europos geležinkelių eismo valdymo sistemų įgyvendinimu, sudaryta skirtingo pločio vėžėmis važiuojančių traukinių eismo valdymo plėtros metodika, leidžiančia padidinti geležinkelio infrastruktūros pralaidumą. Pateiktas skirtingo pločio vėžėmis važiuojančių traukinių eismo valdymo metodikos klasifikavimas, išanalizuoti metodikų skirtumai. Naudojant traukinių eismo valdymo metodus ir eksperimentinius rezultatus ištirti ir palyginti skirtingi geležinkelio linijos pralaidumo skaičiavimai. Išnagrinėjus teorinius ir eksperimentinius geležinkelio linijos pralaidumo didinimo metodus, pateikiamos baigiamojo darbo išvados ir siūlymai. Darba sudaro: įvadas, trys skyriai, išvados, literatūros sąrašas, priedai.

Prasminiai žodžiai: intervalinis reguliavimas, eismo valdymas, traukinių srautai, stabdymo keliai, automatinės blokuotės intervalai.

Vilnius Gediminas Technical University
Faculty of Transport Engineering
Department of Transport Technological Equipment

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

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

Title: **Traffic management modeling and research of train traveling through different width tracks**

Author **Larisa Valentinovič** Academic supervisor **habil. dr. prof. Henrikas Sivilevičius**

Thesis language

☒ Lithuanian

☐ Foreign (English)

Abstract

The paper examines different width tracks for train control systems, traction calculation methods. According to the European Rail Traffic Management System, consisting of different width tracks for trains running on the development of traffic management techniques to improve the railway infrastructure capacity. Provided with different width tracks for trains running traffic management techniques classification to analyze the method differences. Using traffic management methods and experimental results to examine and compare the different line throughput calculations. Proposals to increase the permeability of the railway line and traction estimates improvement. Structure: introduction, three chapters, conclusion, references and appendices.

Keywords: railway line, capacity, management automation solution, scheduling process, method of interval regulation.

TURINYS

Darbe naudojamų santrumpų sąrašas	3
Terminai ir apibrėžimai	4
Paveikslų sąrašas	5
Lentelių sąrašas.....	6
ĮVADAS	7
1. MOKSLO DARBŲ, SKIRTŲ SKIRTINGO PLOČIO VĖŽĖMIS VAŽIUOJANČIŲ TRAUKINIŲ EISMO VALDYMO TIRTI IR JŲ REGLAMENTUOJANČIŲ DOKUMENTŲ, ANALIZĖ.....	9
1.1. Lietuvos geležinkelių traukinių valdymo sistemą reglamentuojantys dokumentai.....	9
1.2. Geležinkelio infrastruktūros tyrimai ir analizė.....	10
1.3. Geležinkelio transporto eismo sauga.....	11
1.4. Keleivių vežimo geležinkeliais komforto tyrimai	13
1.5. Transporto srautų pasiskirstymo modelių tyrima	14
1.6. Traukinių eismo valdymo ir organizavimo tyrimai.....	14
2. TRAUKINIŲ IR EISMO VALDYMO METODIKOS MODELIAVIMAS, ANALITINIS IR TEORINIS TYRIMAS	19
2.1. Traukinių važiavimo greičio ir eismo intensyvumo ryšio su kelio būkle analize	19
2.2. Traukinių veikiančios dinaminės jėgos	21
2.3. Traukinių atskyrimo principai	25
2.4. Esamos 1520 mm vėžės sistemos, stabdymo kelių skaičiavimai	26
2.5. Intervalų tarp traukinių automatinės blokuotės sistemoje su apsauginiais ruožais, nustatymas	27
2.6. Ruožo pralaidumo skaičiavimas	28
2.7. Traukinio masės skaičiavimo metodika	30
2.8. Ekonominis „Rail Baltica“ kaštų ir naudos vertinimas	32
3. TRAUKINIŲ EISMO VALDYMO OPTIMIZAVIMO METODAI. GELEŽINKELIO LINIJOS PRALAUDUMO SKAIČIAVIMAI IR REZULTATŲ PALYGINIMAS	35

3.1. Geležinkelio ruožo pralaidumo savybėms įtakos turintys veiksniai	35
3.2. Geležinkelio ruožo pralaidumas, lyginant fiksuoto ir judančio bloko traukinių važiavimus. 40	
3.3. Traukinio masės skaičiavimas	43
3.4. Analitinis geležinkelio linijos pralaidumas, lyginant fiksuoto ir judančio bloko metodikas . 45	
3.4. Eksperimentiniai geležinkelio ruožo pralaidumo tyrimai	52
3.5. Teorinių ir eksperimentinių rezultatų analizė	59
IŠVADOS, REKOMENDACIJOS.....	60
LITERATŪROS SĄRAŠAS.....	61
PRIEDAI	65

Darbe naudojamų santrumpų sąrašas

AB – akcinė bendrovė;

AHP – (angl. *Analytic Hierarchy Process*) daugiatislo vertinimo metodas-analitinės hierarchijos procesas;

ALS – automatinė lokomotyvų signalizacija;

ATO/ITF – (angl. *Automatic train operation/ interface modul*) sąsaja tarp automatinio traukinio valdymo ir kėbulo įrangos;

ATV – automatinis traukinių valdymas;

GSM-R – (angl. *Global System for Mobile-Railway*) balsinė radijo ryšio ir bevielė duomenų perdavimo sistema;

ERTMS – (angl. *The European rail traffic management system*) Europos geležinkelių transporto valdymo sistemos;

ETCS – (angl. *European Train Control System*) Europos traukinių valdymo sistema;

EUAR – (angl. *European Union Agency for Railways*) Europos geležinkelio agentūra;

EVC – Eismo valdymo centras;

EVK – eismo valdymo kokybė;

HMI – (angl. *Human – machine interface*) sąsaja žmogus – mašina;

KLUB – kompleksinės unifikuotos lokomotyvo saugos sistemos;

LG – Lietuvos geležinkeliai;

OBCU_ATP – (angl. *On Board Computer Unit Automatic Train Protection*) traukinio valdymo įranga. Automatinis traukinio stabdymas (sistema);

RBC – (angl. *Radio Block Center*) radijo signalų perdavimo įrenginys;

RCS TU – (angl. *Radio code system-train unit*) traukinio įranga, skirta informacijai perduoti, blokuotė – mašinisto kabina;

RCS AP – (angl. *Radio code system – Access point*) lauko ir navigacijos sistemos įrenginiai, skirti GSM-R informacijai perduoti;

TEG – traukinių eismo grafikas;

TVD – (angl. *Train vacancy detector*) bėgių grandinių užimtumo detektorius;

WCU_ATP – (angl. *Wayside computer unit (in interlocking)*) viena sudedamųjų dalių tarp centralizacijos ir signalinių GSM-R taškų.

Terminai ir apibrėžimai

Geležinkelio kelias – inžinerinis statinys, kurį sudaro žemės sankasa, viršutinė kelio konstrukcija (balasto sluoksnis, pabėgiai, bėgiai) ir kiti inžineriniai įrenginiai.

Geležinkelių infrastruktūra – geležinkeliai, statiniai, žemė, pastatai, pagrindinė įranga ir įrenginiai, būtini eismui organizuoti ir valdyti bei eismo saugai užtikrinti.

Geležinkelių linija – geležinkelių tinklo dalis su įrenginiais, statiniais bei eismo valdymo sistemomis.

Geležinkelio riedmenys – traukos priemonės (lokomotyvai), vagonai, dyzeliniai ir elektriniai traukiniai, automotrisės ir specialieji riedmenys.

Geležinkelio tinklas – Lietuvos Respublikos geležinkelių infrastruktūra, kurią valdo ir prižiūri jos valdytojas ar savininkas.

Geležinkelių transportas – Lietuvos Respublikos ūkio ir socialinės infrastruktūros dalis, skirta visuomenės ir ūkio subjektų poreikiams tenkinti – keleiviams, bagažui ir (ar) kroviniams geležinkeliais vežti.

Geležinkelių transporto veikla – keleivių, bagažo ir (ar) krovinių vežimas geležinkeliais, geležinkelių infrastruktūros valdymas, plėtra ir priežiūra, taip pat kita veikla, tiesiogiai susijusi su geležinkelių infrastruktūra, keleivių, bagažo ir (ar) krovinių vežimu.

Infrastruktūros pralaidumas – didžiausias nustatytos masės traukinių skaičius (porų skaičius) kuris gali būti praleistas Šiuo ruožu per laiko vienetą (parą) esant tam tikrai techninei įrangai ir eismo tvarkymo priemonėms, bei traukinių eismo organizavimo sistemai.

Keleivinis traukinys – iš keleivinių vagonų suformuotas traukinys, vežantis keleivius.

Lokomotyvo brigada – darbuotojų grupė, valdanti lokomotyvą, dyzelinį ar elektrinį traukinį. Lokomotyvo brigadą sudaro mašinistas ir jo padėjėjas, o garvežiuose ir kūrikas.

Maršrutas – traukinio ar manevrinio sąstato važiavimo per tam tikrus iešmus, kelias iš tarpstočių į stotį, iš stoties į tarpstotį arba iš vieno stoties kelio į kitą.

Prekinis traukinys – iš prekių vagonų suformuotas traukinys, vežantis krovinį.

Sistema – tam tikra tvarka sujungtų komponentų visuma.

Stotis – geležinkelių infrastruktūros dalis. Ją sudaro kelių, pastatų, statinių ir įrenginių kompleksas, užimantis tam tikrą žemės sklypą ir skirtas traukiniams priimti, išformuoti, išleisti ir praleisti; keleiviams, bagažo ar krovinių siuntėjams (gavėjams) aptarnauti.

Traukinio pralaidumo intervalinis skaičiavimas – trumpiausio laiko tarpo, po kurio į tą patį tarpstotį galima išleisti kitą tos pačios krypties traukinį, skaičiavimas.

Paveikslų sąrašas

1.1 pav. Bendras degalų sunaudojimas pagal LG normas traukiant skirtingos masės sąstatus ruožu Kaunas–Šeštokai	22
1.2 pav. Traukinių eismo valdymo centro veikla	23
1.3 pav. Traukinių eismo grafiko tankinimas	24
2.1 pav. Tipinės šilumvežio traukos charakteristikos.....	29
2.2 pav. Tipinė šilumvežio su elektros pavara charakteristikos elektrodinaminio stabdymo režimu	30
2.3 pav. Tipinės pagrindinės lyginamųjų pasipriešinimo judėjimui jėgų kreivės	31
2.4 pav. Santykinis traukinių atskyrimas	32
2.5 pav. Traukinių atskyrimas pagal stabdymo kelią	32
2.6 pav. Traukinių atskyrimas pagal block ruožo signalus.....	33
3.1 pav. Prognozuojamas keleivių skaičius (mln) įgyvendinus projektą „Rail Baltica“	42
3.2 pav. ERTMS L2 virtualiųjų blokų schema.....	43
3.3 pav. Automatinė traukinio valdymo saugos sistema	44
3.4 pav. Automatinio traukinių valdymo įrenginių schema	44
3.5 pav. Automatinės traukinių valdymo sistemos įrenginiai	45
3.6 pav. Lauko įrenginio (<i>eurobalise</i>), skirto perduoti informaciją apie traukinio buvimo vietą, montavimas.....	46
3.7 pav. Judančio bloko sistemos schema	47
3.8 pav. Informacinių taškų išdėstymas	48
3.9 pav. Informacinių taškų išdėstymo grafikas	49
3.10 pav. Traukinio automatinės valdymo įrangos prietaisų rodmenys	50
3.11 pav. Smulkus išilginis profilis Gaižiūnai-Jonava ruože	51
3.12 pav. Lokomotyvo traukos jėgos priklausomybė nuo greičio.....	54
3.13 pav. Pasipriešinimo jėgos priklausomybė nuo greičio	54
3.14 pav. Bėgio ir rato sankybio jėgos priklausomybė nuo greičio	54
3.15 pav. Rato sankybio (adhezijos) su bėgiais koeficiento priklausomybė nuo greičio.....	55
3.16 pav. Sukibimo koeficiento priklausomybė nuo santykinio slydimo greičio	55
3.17 pav. Stabdymo jėgos kitimas didinant trinkelį prispaudimo jėgas	56
3.18 pav. Traukinio pagreičio grafikas, greitis iki 20 km/val.....	56
3.19 pav. Traukinio pagreičio grafikas, greitis nuo 20 km/val.....	56
3.20 pav. Pravažiuotas atstumas traukos režime	57
3.21 pav. Pravažiuotas atstumas stabdymo režime	57

3.22 pav. Traukinio pasipriešinimo jėga stabdymo metu.....	58
3.23 pav. Geležinkelio linijos pralaidumo analitinio skaičiavimo rezultatai	59
3.24 pav. Geležinkelio linijos pralaidumo skaičiavimas pagal UIC 406 metodą.....	60
3.25 pav. Traukinių eismo grafiko sutankinimas Portugalijos geležinkeliuose Sete Rios–Alvito ruože	60
3.26 pav. Sistemos DaVinci moduliai	61
3.27 pav. Galiojantis tvarkaraštis	61
3.28 pav. Traukinio važiavimo intervalo redagavimo reikalavimas	62
3.29 pav. Eksperimentinio traukinio „Test 1“ važiavimo laikas pagal tvarkaraštį.....	62
3.30 pav. Eksperimentinio traukinio „Test 1“ važiavimo laikas tarpstotyje sumažintas iki 5 min	62
3.31 pav. Eksperimentinių traukinių įterpimas, traukinių eismo grafiko tankinimas.....	62
3.32 pav. Laboratorinių eksperimentų rezultatai.....	63
3.33 pav. Geležinkelio linijos pralaidumo eksperimentinio skaičiavimo rezultatai.....	65
3.34 pav. Geležinkelio linijos pralaidumo priklausomybė nuo blokuojamųjų ruožų ilgio	66

Lentelių sąrašas

1.1 lentelė. Leidžiamieji nustatyti traukinių važiavimo greičiai kreivėse	26
1.2 lentelė. Leidžiamieji ir faktiniai įtempiai viršutinės kelio konstrukcijos elementuose	27
3.1 lentelė. Riedmenų techninės charakteristikos.....	52
3.2 lentelė. Skaičiavimo rezultatai – keleivinis traukinys.....	53
3.3 lentelė. Krovininis traukinys.....	53
3.4 lentelė. Skaičiavimo rezultatai – keleivinis traukinys	58
3.5 lentelė. Skaičiavimo rezultatai – krovininis traukinys.....	58
3.6 lentelė. Analitinis rezultatas pagal fiksuoto bloko skaičiavimus.....	59
3.7 lentelė. Analitinis rezultatas pagal judančio bloko skaičiavimus	59
3.8 lentelė. Galiojantis tvarkaraštis.....	63
3.9 lentelė. Tvarkaraštis pagal sutankintą traukinių eismo grafiką	63
3.10 lentelė. Laboratorinių eksperimentų rezultatai	64
3.11 lentelė. Senų ir naujų metodų trūkumai ir privalumai	66

IVADAS

Transporto reikšmė bet kurios šalies ūkio šakos ekonomikai yra labai didelė ir ji didėja vykstant pasaulinei ekonomikos globalizacijai, kai šalis, esančias skirtinguose žemynuose, jungia prekybiniai ir žmonių laisvojo judėjimo ryšiai. Geležinkelių transportas, konkuruodamas su kitomis transporto rūšimis, privalo gerinti keleivių ir krovinių vežimo kokybę. Tam plėtojamas geležinkelio kelių tinklas, gerinama jo ir riedmenų kokybė, tobulinamas vežimo procesas.

Geležinkelių transportas – viena svarbiausių Lietuvos transporto šakų. Jo svarba pabrėžta Lietuvos Respublikos susisiekimo ministerijos parengtoje Nacionalinėje transporto plėtros programoje. Čia geležinkelių transportas apibūdinamas kaip svarbiausia Lietuvos transporto šaka, skirta keleiviams ir kroviniams vežti didesniais atstumais. Ši transporto rūšis yra labiausiai pritaikyta masiniams kroviniams vežti. Krovinių vežimo rinkoje geležinkeliai pirmauja vežant šiuos krovinius: naftą ir naftos produktus, metalą ir jų produkciją, trąšas, medieną ir statybines medžiagas, maisto produktus ir jų žaliavą ir kt. Keleivių vežimo sektoriuje geležinkeliams pagrindinis vaidmuo priskiriamas vežant keleivius tarp didžiųjų Lietuvos miestų.

Praktinė reikšmė. Geležinkelių transportas yra ekologiška transporto rūšis. Tai suteikia jam konkurencinį pranašumą lyginant su kitomis transporto rūšimis. Ištyrus ir įvertinus skirtingo pločio vėžėmis traukinių eismo valdymo sistemas galima nustatyti traukinių važiavimo valdymo režimus, siekiant taupyti degalus ir mažinti krovinių bei vežimo laiką. Išnagrinėjus teorinius ir eksperimentinius eismo valdymo procesus, pateikiamos išvados ir pasiūlymai, kaip optimizuojant eismo valdymo režimus ir didinant geležinkelio ruožo pralaidumą, galima pasiekti eksploatacinių sąnaudų sumažėjimą.

Šio darbo **tikslas** - remiantis Europos geležinkelių eismo valdymo sistemų įgyvendinimu, sudaryti skirtingo pločio vėžėmis važiuojančių traukinių eismo valdymo plėtros metodiką, leidžiančią padidinti geležinkelio infrastruktūros pralaidumą.

Problemų aktualumas – geležinkeliuose sunku numatyti keblias situacijas vežant keleivius ar krovinius. Todėl reikia tobulinti savo žinias ir atkreipti ypatingą dėmesį į pačias svarbiausias problemas. Viena iš jų yra keleivių ir krovinių vežimo kokybė, krovinių pristatymas laiku ir keleivinių traukinių važiavimas pagal numatytą grafiką. Vienas svarbiausių Lietuvos investicinių prioritetų yra transporto infrastruktūros gerinimas. Šiuo metu eksploatuojama eismo valdymo sistema yra pasenusi ir neatitinka Europos geležinkelių sistemų reikalavimų. Pastaruoju metu vis dažniau tenka susidurti su situacijomis, kai atsiranda rimtų problemų dėl neteisingo traukos skaičiavimo ir eismo valdymo organizavimo.

Uždaviniai:

- išnagrinėti mokslinius straipsnius susijusius su eismo valdymo ir infrastruktūros modernizavimo ypatumais geležinkelių transporto sistemoje. Pateikti traukinių eismo valdymo plėtros metodikos taikymo galimybes, išnagrinėti analitinius ir teorinius metodus;
- ištirti ir palyginti skirtingo pločio vėžių geležinkelio linijų pralaidumo skaičius pasiremiant traukinių eismo valdymo metodais ir eksperimentiniais rezultatais;
- pateikti siūlymus geležinkelio ruožo pralaidumui didinti ir naujų sistemų statybos bei diegimo sąnaudoms mažinti.

Darbe analizuojama situacija atskleidė kaip yra svarbu žinoti žmogaus reakcijos įtaką eismo valdymo procesui. Palyginama intervalinio traukinių eismo reguliavimo teorija esant dabartiniai situacijai ir planuojamai, kai europinei 1435 mm pločio vėžei bus integruota ERTMS 2 arba 3 lygio sistema. Išanalizuotos techninės ir organizacinės priemonės, kurias pritaikius transportas taps efektyvesnis.

1. MOKSLO DARBŲ, SKIRTŲ SKIRTINGO PLOČIO VĖŽĖMIS VAŽIUOJANČIŲ TRAUKINIŲ EISMO VALDYMOI TIRTI IR JŲ REGLAMENTUOJANČIŲ DOKUMENTŲ, ANALIZĖ.

1.1. Lietuvos geležinkelių traukinių valdymo sistemą reglamentuojantys dokumentai

Lietuvos Respublikoje krovinių ir keleivių vežimo geležinkeliais kokybę bei geležinkelių infrastruktūros naudojimą, reglamentuoja įvairūs dokumentai. Geležinkelių transporto veiklą reglamentuoja Lietuvos Respublikos geležinkelių transporto kodeksas (Žin., 2004, Nr. 72-2489), Lietuvos Respublikos geležinkelių transporto eismo saugos įstatymas (Žin., 2004, Nr. 4-27; 2010, Nr. 12-557) ir kiti teisės aktai. AB „Lietuvos geležinkeliai“ Geležinkelių infrastruktūros direkcijos pagrindiniai norminiai techniniai dokumentai yra:

- 320/E Laikinoji traukinių eismo organizavimo instrukcija (2016-01-18 įsakymas Nr. Į-42);
- 241/SS Krovimo darbų saugos technologinių kortelių aprašas (2010-09-20 įsakymas Nr. Į-732);
- R/86 Geležinkelio riedmenų stabdžių naudojimo taisyklės (2015-10-15 įsakymas Nr. Į-882);
- 26/AR Ryšių įrenginių techninės priežiūros instrukcija (2015-07-03 įsakymas Nr. 548);
- 163/K Statinių artumo gabaritų taikymo instrukcija (2001-11-26 įsakymas Nr. 456);
- A/85 Važiuojančio traukinio techninės būklės automatinės kontrolės priemonių naudojimo instrukcija (2011-11-25 įsakymas Nr. Į-922);
- 210/E Traukinių eismo grafiko sudarymo instrukcija (2015-02-17 įsakymas Nr. Į-137);
- 246/AA-T Kompleksinės unifikuotos lokomotyvo saugos sistemos (KLUB-U) naudojimo instrukcija (2010-04-30 įsakymas Nr. Į-334);
- 18/A Signalizacijos įrenginių ir sistemų saugaus remonto ir priežiūros instrukcija (2014-08-14 įsakymas Nr. Į-756);
- ĮST 1005384.7:2014 Geležinkelio pervažų dangų parinkimas ir įrengimas (2014-10-17 įsakymas Nr. Į-959);
- 284/A Bombardier transportation objektinių valdiklių sistemos OCS-950 naudojimo instrukcija (2013-12-31 įsakymas Nr. Į-1162);
- 110/K Specialiųjų geležinkelio riedmenų naudojimo ir techninės priežiūros instrukcija (2016-05-04 įsakymas Nr. Į-400).
- Pagrindiniai norminiai ir teisiniai dokumentai rodo, kad didžiausias dėmesys skiriamas:

- AB „Lietuvos geležinkeliai“ verslo vertės augimui, didinant geležinkelių transporto veiklos efektyvumą, geležinkelių transporto ir susijusių paslaugų patrauklumą klientams;
- efektyviam viešosios geležinkelių infrastruktūros valdymui, priežiūrai, atnaujinimui ir plėtrai pagal valstybės poreikius ir finansines galimybes;
- veiksmingam geležinkelių transporto ir susijusių viešųjų paslaugų tiekimui ir šalies strateginių interesų įgyvendinimui teisės aktų ir kompetentingų valstybės institucijų nustatyta apimtimi.

AB „Lietuvos geležinkeliai“ veiklos objektas yra Lietuvos Respublikos teisės aktuose nustatytų viešosios geležinkelių infrastruktūros valdytojo funkcijų atlikimas, keleivių ir krovinių vežimas geležinkelių transportu, taip pat geležinkelio kelių ir jų įrenginių apsaugos zonų priežiūros darbų organizavimas ir kitos ūkinės-komercinės veiklos, kurių vykdymas neprieštarauja Lietuvos Respublikos teisės aktams, vykdymas, teikiamų paslaugų kokybės pagal norminius dokumentus bei jų teikimo nepertraukiamumo užtikrinimas.

Geležinkelių transportas yra saugesnis, mažiau žalingas aplinkai, našesnis nei kelių transportas, tačiau jam plėtoti, reikalingos didelės infrastruktūros investicijos. Visų pirma, turi būti suteikiama negražinama parama, dengianti visuomeninės veiklos (keleivių vežimo) nuostolius.

1.2. Geležinkelio infrastruktūros tyrimai ir analizė

Geležinkelių infrastruktūros modernizavimas ir plėtra yra esminė sėkmingo darbo Europos geležinkelių sistemoje sąlyga. Prioritetas teikiamas geležinkelių infrastruktūros renovacijai ir modernizavimui tarptautiniuose transporto koridoriuose, pagrindinį dėmesį skiriant Lietuvos geležinkelių techniniai sąveikai su Europos geležinkeliais užtikrinti, šiuolaikiniams saugos ir aplinkosaugos reikalavimams įgyvendinti, geležinkelio kelių apkrovai ir traukinių važiavimo greičiui didinti, mišriems vežimams skaitinti.

Atnaujinus geležinkelių infrastruktūrą, keleivinių traukinių greitis siekia iki 160 km/val. esant 1520 mm pločio vėžei ir iki 240 km/val. kai vėžės plotis yra 1435 mm. Esant dideliems traukinių greičiams, reikalinga gera žmogaus reakcija ir profesionalumas.

Nuo traukinių eismo sąlygų priklauso keleivių komfortas, krovinių pristatymo terminai, patikimumas, o svarbiausia – eismo saugumas. Eismo saugumo užtikrinti geležinkeliuose diegiamos kelio kontrolės, signalizacijos ir traukinių valdymo, komunikacijos sistemos (Hamilton, Edwards & Kelcey 2009). Nagrinėjama struktūrinė dinamika greitųjų geležinkelių transporto priemonių sistemose (Lei, Zhang 2010), modernizuojama riedmenų stogo įranga (Cheli, Melzi 2010). Atlikta geležinkelio riedmenų dinaminės sistemos analizė (Nasr, Mohammadi 2010). Švedijos Stockholm – Gothenburg ruože nagrinėjami nebrangios technologijos traukinių greitį didinti (Persson 2010), rezultatas pagerino esamą situaciją iki 9 %.

Įdiegus naują eismo valdymo sistemą, visoje Europoje bus nustatytas vienas bendras signalinės įrangos standartas, kurį taikant bus kontroliuojamas traukinių greitis ir prireikus nurodoma jį sumažinti. Tai užtikrins, kad traukiniai suderintais nacionaliniais tinklais kursuotų sklandžiai, nevėluotų. Nereikėtų atlikti papildomų patikrinimų ar derinimo. Lyginant su tradicinėmis signalizacijos sistemomis, ERTMS (ETCS+GSM-R) sistemos užtikrina maksimalų efektą už mažesnius investicinius kaštus. Nuomonė Europoje ir kitose šalyse apie sumontuotas ERTMS sistemas yra tokia, kad po tam tikro įdirbio laiko, jos pasiekia pakankamą patikimumo lygį. Tokį pat kaip tradicinės signalizacijos sistemos. Tai pasiekama intensyviu testavimu ir gerinimu, naudojant programas, į kurias įtraukti tiek gamintojai tiek infrastruktūros valdytojai. Iš mokslinių darbų analizės matyti, kad įdiegus ERTMS sistemą kituose Europos geležinkeliuose, patikimumo ir saugumo rodikliai vis gerėjo. Iš 74 įvykių analizės, kurie įvyko 14-oje Europos šalyse nuo 1998 iki 2011 metų (Smith *et al.* 2013), padarytos išvados, kad gautas rezultatas rodo teigiamą GSM-R sistemos poveikį. Iš 11-os įvykių dėl automatikos, signalizacijos ir ryšių sutrikimų buvo tik vienas GSM-R sistemos gedimo atvejis.

1.3. Geležinkelio transporto eismo sauga

Geležinkelio transporto eismo sauga – didžiausias AB „Lietuvos geležinkeliai“ prioritetas. Pagrindinis geležinkelių transporto eismo saugos užtikrinimo tikslas – turėti modernią subalansuotą konkurencingą draugišką aplinkai geležinkelių transporto sistemą, kuri efektyviai tenkintų Lietuvos ir kaimyninių valstybių gyventojų ir verslo poreikius.

Siekiant tapti svarbia transeuropinio transporto tinklo dalimi ir didinti Lietuvos konkurencinių pranašumą keleivių ir krovinių vežimo geležinkelių transportu srityje, svarbiausias AB „Lietuvos geležinkeliai“ uždavinys yra geležinkelių infrastruktūros ir geležinkelio riedmenų modernizavimas ir atnaujinimas, kad geležinkelių transporto naudojimas atitiktų aukščiausiais saugos standartus.

Federalinė geležinkelio administracijos reglamente nurodytos šešios pagrindinės incidentų geležinkelio keliuose priežastys: kelio būklė, signalų gedimai, avarijos pervažose, žmogaus elgesys, valdymo įrenginių defektai ir gedimai. Pagal atliktą statistinę analizę nuo 2016 m. sausio iki liepos mėnesio, dažniausia incidento priežastis buvo žmogaus elgesys. Geležinkelio keliuose užfiksuota incidentų:

- Žmogaus elgesys – 33,5%;
- Kelio būklė – 27,9%;
- Kitos priežastys – 15%;
- Valdymo įrenginių defektai ir gedimai – 13,3%;
- Avarijos pervažose – 8,3%;

- Signalų gedimai – 1,9%.

Europos Sąjungos Reglamente dėl geležinkelių sistemos Europos Sąjungoje kontrolės, valdymo ir signalizacijos posistemų techninės sąveikos specifikacijų, nustatyti reikalavimai visiems taikymo lygiams.

Traukinį su riedmenyje įdiegta traukinio apsaugos A klasės sistema, atitinkančia tam tikrą taikymo lygį, turi būti galima eksploatuoti to lygio arba bet kurio kito žemesnio lygio linijose:

- traukinį su riedmenyse įdiegta traukinio apsaugos A klasės sistema, atitinkančia antrąjį lygį, turi būti galima eksploatuoti šio lygio ir pirmojo lygio geležinkelio linijose,
- nereikalaujama, kad traukinyje su riedmenyse įdiegta pirmo lygio A klasės traukinio apsaugos sistema būtų įranga, tinkama duomenims GSM-R ETCS radijo ryšiu perduoti, tačiau jame turi būti įdiegtos visos antrojo ir trečiojo lygių funkcijos ir taip užtikrinta, kad:
- vėliau prijungus tik duomenims perduoti skirtą radijo ryšio įrangą GSM-R ETCS, traukinio įrangą atitiktų antrąjį lygį,
- vėliau prijungus tik duomenims perduoti skirtą radijo ryšio įrangą GSM-R ETCS ir traukinio sąstato vientisumo aptikimo priemones, traukinio įrangą atitiktų trečiąjį lygį.

Integruojant Lietuvos geležinkelio sistemas į Europos sistemas, labai svarbu užtikrinti saugų geležinkelių infrastruktūros eksploatavimą, laikytis saugumo standartų reikalavimų. Nagrinėjami šie geležinkelio sistemų patikimumo ir saugumo rodikliai (Власенко, Теера 2010):

- $P(t)$ – negendamumo tikimybės reikšmė;
- $Q(t)$ – gedimo tikimybės reikšmė;
- $\lambda(t)$ – gedimų intensyvumas;
- T – resurso vidutinė matematinė reikšmė;
- $P_s(t)$ – saugios eksploatacijos tikimybės reikšmė;
- $Q_{kr}(t)$ – kritinio gedimo tikimybės reikšmė;
- $\lambda_{kr}(t)$ – kritinių gedimų intensyvumas;
- T_{kr} - resurso vidutinė matematinė reikšmė esant kritiniam gedimui.

Kadangi eksploatacijos metu sistemos kritiniai sutrikimai atsiranda labai retai, geležinkelio signalizacijos sistemoms, automatikos ūkiui gedimų intensyvumas imamas be konkretaus laiko tarpo. Šiuo atveju taikomos lygtys:

$$\lambda(t) = \lambda = const \text{ ir } \lambda_{kr}(t) = \lambda_{kr} = const. \quad (1.1)$$

Tokiais atvejais negendamumo ir gedimo tikimybės reikšmės apskaičiuojamos pagal eksponentinio dėsnio pasiskirstymą:

$$P(t) = e^{-\lambda t}, P_s(t) = e^{-\lambda_{kr} t}; \quad (1.2)$$

$$Q(t) = 1 - e^{-\lambda t}, Q_{kr}(t) = 1 - e^{-\lambda krt}; \quad (1.3)$$

$$T_{kr} = \frac{1}{\lambda_{kr}} \quad (1.4)$$

Lietuvoje yra sustiprintas eismo saugumas geležinkelio pervažose. Sėkmingai įgyvendinti saugos sistemų, kuriose įdiegtos naujausios technologijos, projektai. Nors mirčių skaičius pervažose sudaro tik apie 2% bendro mirčių skaičiaus automobilių keliuose, tačiau siekia 20-30% visų mirčių geležinkeliuose (Gailienė *et al.* 2013).

1.4. Keleivių vežimo geležinkeliais komforto tyrimai

Pastaruoju laiku daug dėmesio skiriama dėmesio keleivių vežimo komfortui. Analizuojama, esant kokiems keleivinio traukinio gedimams, galima toliau eksploatuoti riedmenį neišlaipinant keleivių. Apskaičiuota, kad tikslingiau eksploatuoti lokomotyvus arba vagonus su smulkiais defektais, nei sumažinti traukinių, išvykstančių į kelionę skaičių (Luca D'Acerno *et al.* 2016). Atlikta strateginė analizė (D'Acerno *et al.* 2012) parodė, kad sumažinus keleivinio traukinio našumą 20 %, galima jį eksploatuoti toliau. Sumažėjus našumui 80 % ir daugiau, reikia nedelsiant išlaipinti keleivius ir tęsti kelionę kitu traukiniu arba kitomis transporto priemonėmis.

Atlikus krovinių ir keleivinių traukinių srautų analizę, pagal anksčiau atliktas studijas, (Griškevičienė *et al.* 2011) daroma prielaida, kad ruože nuo Lietuvos/Lenkijos valstybės sienos iki Kazlų Rūdos 2020 m. gali važiuoti 24 krovininiai ir 17 keleivinių traukinių. 2055 m. atitinkamai jų gali būti 24 krovininiai ir 59 keleiviniai traukiniai. Keleivių vežimus geležinkeliais tyrinėjo (Dailydka, Lingaitis 2012), (Sun, Hu 2012). Labai svarbu turėti objektyviais duomenimis pagrįstą keleivių vežimo atskirais traukiniais kokybės nustatymo ir vertinimo metodiką. Keleivių vežimo kokybei tirti taikomi daugiakriteriniai metodai (Maskeliūnaitė 2012). Pateiktas tarptautinių traukinių keleivių vežimo kokybės vertinimo modelis (Maskeliūnaitė, Sivilevičius 2012). Didelę įtaką traukinių eismo parametrams turi geležinkelio kelio kokybė, kuri vertinama kelio kokybės indeksu (KKI) (Hu *et al.* 2011). Bėgių kelio geometriniai parametrai vertinami naudojant palydovines sistemas (Koc 2012). Bėgių kelio saugumui užtikrinti, taikoma programų visuma (Vale *et al.* 2012), sudaromi geležinkelio kelio, balasto priežiūros valdymo modeliai (Sevi, Ge 2012). Didėjant traukinių eismo intensyvumui, būtina gerinti geležinkelių linijų pralaidumą (Sameni, Preston 2012). Tam pateikiami traukinių pralaidumo modeliai ir algoritmai, tinkantys traukinių eismo grafikui sudaryti (Li *et al.* 2013).

Optimizuojant variantinį traukinių eismo grafiką, pateiktas vėluojančių traukinių tvarkaraščio atidėjimo algoritmas (Sato *et al.* 2013). Remiantis nepatogumo, kurį patiria keleivis ir kelionės kainos teigiamu skirtumu apskaičiuojama tikslo funkcija.

1.5. Transporto srautų pasiskirstymo modelių tyrima

Traukinių eismo grafikų uždaviniams spręsti pritaikytas kintamojo modeliavimo algoritmas. Nagrinėjant Monte Karlo metodo taikymo stochastinių uždavinių sprendimo aspektus, apibrėžtas jų taikymo modelis Šredingerio lygčiai bei rizikos vengimo uždaviniams spręsti. Sprendžiant operatyvinio stochastinio programavimo uždavinius, sprendinys nustatomas realiuoju laiku, todėl sprendiniui rasti taikomi įprasti optimizavimo metodai (Žilinskas 2007).

Srautų pasiskirstymo uždavinį galima spręsti, kai transporto elementų būklė nekinta ir kai planuojama ją keisti (t. y. kada transporto elemento techninis lygis gali būti didinamas). Abiem atvejais sąnaudų priklausomybė nuo transporto elemento apkrovimo dažniausiai yra netiesinė. Šis netiesiškumas būdingas visoms transporto rūšims. Sąnaudos, susijusios su krovinių traukinių stabdymu bei įsibėgėjimu praleidžiant keleivinius traukinius, nėra proporcingos krovinių srautui. Kai kelio apkrovimas artėja prie jo pralaidumo ribos, tai vežimo sąnaudos šiame transporto elemente auga daug greičiau negu vežimo apimtys. Šios sąnaudos gali būti sumažintos atitinkamai rekonstravus transporto elementą ir tuo padidinus jo pralaidumą.

Kai transporto elemento pralaidumas yra beveik išnaudotas, tai vežimo sąnaudos labai padidėja. Sąnaudas galima sumažinti rekonstruojant šį elementą bei padidinant jo techninį lygį. Tačiau šiuo atveju sąnaudų priklausomybė nuo vežimų intensyvumo tampa sudėtingesnė (Dievulis 1995).

R. Junevičius (2011) savo disertacijoje nagrinėjo transporto srautų matematinius modelius. Modelių lygtys sprendžiamos charakteristikų ir baigtinių skirtumų metodais. Taip pat pristatomas sukurtas transporto srautų, kaip netiesinės dinaminės sistemos, sutelktųjų parametrų modelis su vėlinimu (Junevičius, Bogdevičius 2007).

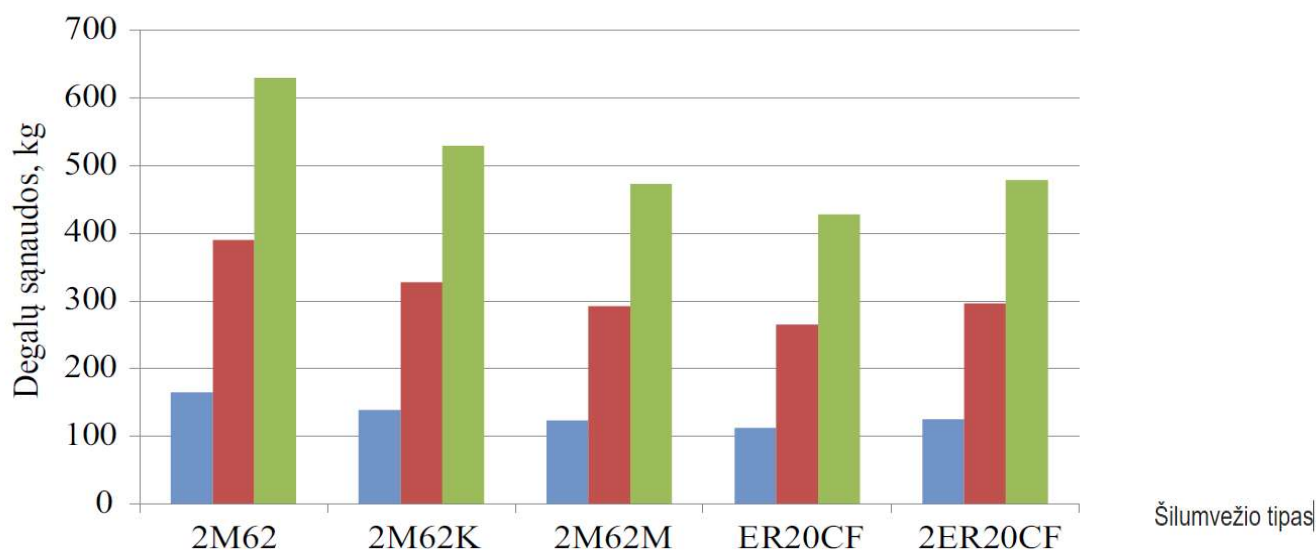
1.6. Traukinių eismo valdymo ir organizavimo tyrimai

Didėjant traukinių greičiui, rizika padaryti klaidų valdant traukinių eismą taip pat didėja. Akivaizdu, kad žmogiškasis faktorius užima vos ne pirmą poziciją rizikų kriterijų sąrašė. Dabartinės eismo valdymo sistemos Lietuvoje neparuoštos valdyti greitesnius nei 160 km/val. greičiu važiuojančius traukinius. Todėl kartu su signalizacijos sistema turi būti atnaujinta ir eismo valdymo sistema. Svarbūs inžineriniai projektai reikalauja ypatingo akcento projekto dalių, susijusių įrenginių vientisumui (Stapelberg 2009). Pavyzdžiui, moksliniai tyrimai nuolat skatina atnaujinti ERTMS/ETCS standartų specifikacijas, tobulinti patikimumą bei sąveiką šiuolaikinėse geležinkelių sistemose (Flamini *et al.* 2012). Analizuojant transporto planavimo ir modeliavimo problemas, transporto ekonominius ir socialinius sprendimus (Ortuzar, Willumsen 2011), pristatomi svarbiausi transporto modeliavimo metodai, jų praktinė svarba, tinkamiausių modeliavimo įrankių pasirinkimai.

Daug dėmesio skiriama keleivių ir operatoriaus sąveikos metodikai, keleivių aptarnavimo algoritmams, paslaugų kokybei (D'Acerno *et al.* 2016). Kalbant apie traukinių greitį, nereikia pamiršti apie degalų sąnaudas. Lietuvos geležinkeliams reiktų atkreipti dėmesį ne tik į dyzeliną sąnaudų mažinimą, bet ir į elektros taupymą. Labai svarbu plėtoti geležinkelį transporto veiklą Rytų ir Vakarų koridoriuose, įgyvendinant žaliojo transporto koridoriaus koncepciją. Tai yra grindžiama žymiu infrastruktūros parametrų kokybės gerinimu, geležinkelio tinklo elektrifikavimu, sąsajos su Klaipėdos uostu stiprinimu, viešųjų logistikos centrų plėtra, intermodalinės sąveikos gerinimu. Tuo pačiu tai smarkiai padidina šio transporto koridoriaus visos logistikos grandinės konkurencingumą. Nelygus važiavimo profilis ir staigus stabdymas lemia kuro sąnaudų didėjimą. Ypač aktualu teisingas traukos skaičiavimas didesniame kaip 7 % įkalnėje. Pastaruoju laiku, pradėjus sparčiai integruoti automatinį eismo valdymo sistemas, pastebėta, kad navigacijos sistemos, automatiškai valdomi traukiniai, centralizuotas traukinių eismo valdymas sumažina pagrindinius resursų naudojimo kriterijus: stabdymo jėgą, signalizacijos gedimus, degalų sąnaudas. Gerina rekuperacijos panaudojimą, keleivių komfortą, didina ruožų pralaidumą (Kondo 2010).

Prenkiant traukos riedmenis tam tikram geležinkelio ruožui, labai svarbu įvertinti prekinų šilumvežių dyzelino sąnaudas, važiavimo greitį, traukos jėgą, aplinkos taršą (Steišūnas, Bureika 2012). Atsižvelgiant į kelio profilio ypatumus ir greičio apribojimus, buvo modeliuojamas skirtingų šilumvežių naudojimas geležinkelio ruože Kaunas–Šeštokai, parenkami skirtingų masių sąstatai, fiksuojamas kelionės laikas, degalų sąnaudos.

Apskaičiuotos skirtingų šilumvežių degalų sąnaudos traukiant 1100 t, 2600 t ir 4200 t sąstatus ruožu Kaunas–Šeštokai. Palyginimas pateiktas 1.1 paveiksle.



1.1 pav. Bendras degalų sunaudojimas pagal LG normas traukiant skirtingos masės sąstatus ruožu Kaunas–Šeštokai

Įvertintos beveik visos išorinės įtakos traukinių eismo valdymo sistemų tobulinimui (Jastremskas 2012). Vadovaujantis racionaliais valdymo režimais, atlikti bandomieji eksploataciniai važiavimai. Jie patvirtino teorines prielaidas ir ilgujų traukinių racionalių valdymo režimų pasirinkimo metodikas. Rezultatas: 1,5–2 kartus sumažintas sąstato išilginių dinaminių jėgų dydis ir sutaupyta iki 5–8 % degalų sąnaudų.

Pradėjus eksploatuoti automatiškai valdomus traukinius ir ERTMS 3 lygio sistemas, optimizuojamas eismo intervalinio reguliavimo algoritmas ir pasiekiamas didesnis eksploatacinis efektyvumas. Centralizuoto automatinio valdymo algoritmo (Баранов *et al.* 2012) ir imitacinio modeliavimo taikymas gerokai sumažina nenumatytų sustojimų skaičių geležinkelio ruožo tarpstotyje, o traukinių prastovą ir elektros energijos naudojimą iki 3–9 %.

Eismo valdymo sistemą sudaro ne tik traukinių eismas, bet ir procesai, kurių visuma užtikrina traukinių važiavimą pagal nustatytą grafiką ir užtikrina eismo saugumą. Visų geležinkelio padalinių eksploatacijos darbo lygis priklauso nuo traukinių eismo grafiko sudarymo kokybės.

Traukinių eismo organizavimas – tai eismo saugumą laiduojančių priemonių visuma, visų geležinkelio padalinių darnus darbas, krovinių pristatymas ir keleivių vežimas trumpiausiais atstumais ir terminais, našių techninių priemonių naudojimas, pažangiausių technologijų taikymas bei traukinių eismo reguliavimas ir valdymas (žr. 1.2 pav.)



1.2 pav. Traukinių eismo valdymo centro veikla

Organizuojant traukinių eismą, sprendžiami šie pagrindiniai uždaviniai:

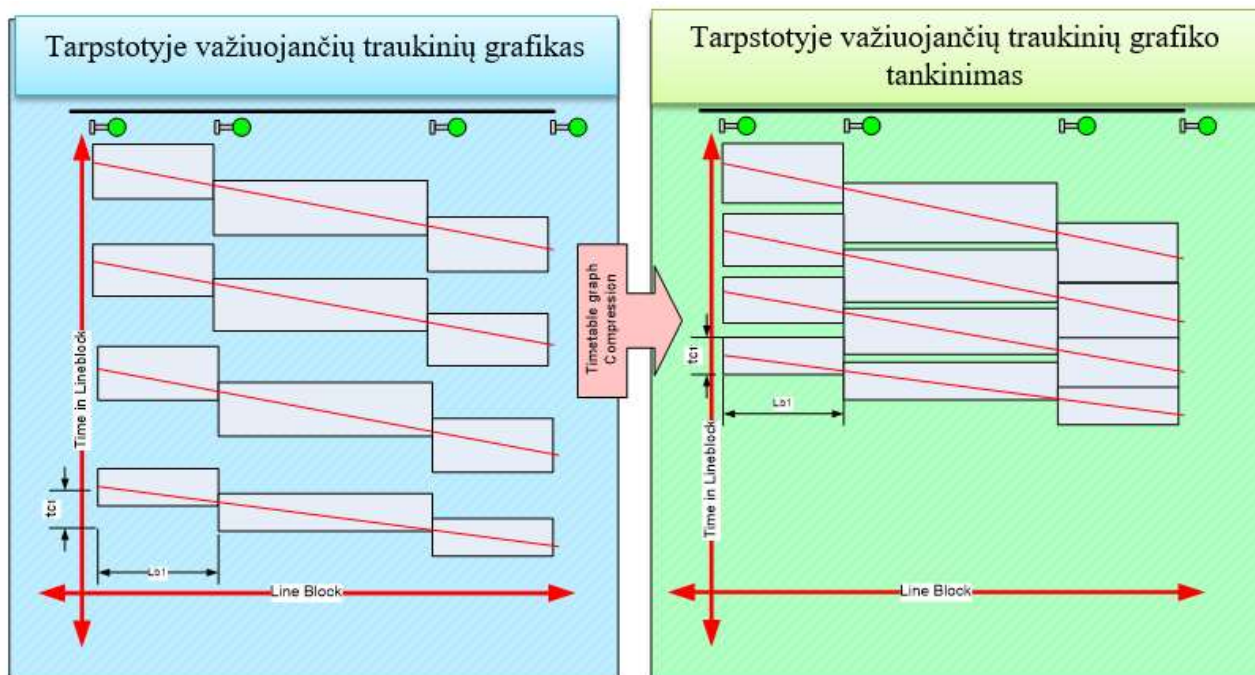
- keleivinių traukinių eismo organizavimas;
- prekinų traukinių eismo organizavimas;

Pagrindiniai traukinių eismo organizavimo principai yra šie:

- stočių darbo organizavimas (traukinių priėmimas, išleidimas, praleidimas, sąstatų išformavimas ir suformavimas, vagonų iškrovimas ir pakrovimas, keleivių įlaipinimas ir išlaipinimas ir t. t.);
- vagonų srautų organizavimas į specializuotus traukinius – paskirtinus maršrutus iš pakrovos vietų ir tam tikros paskirties traukinių formavimas techninėse stotyse (prekinių traukinių formavimo plano sudarymas);
- traukinių eismo organizavimo pagrindo sudarymas (traukinių eismo grafiko sudarymas);
- techninis geležinkelių eksploatacinio darbo normavimas (techninių eksploatacinio darbo normų ir rodiklių nustatymas);
- traukinių eismo ir krovimo darbų operatyvus planavimas, kurio tikslas užtikrinti krovinių vežimo, traukinių eismo grafiko ir techninių normų bei rodiklių vykdymą kiekvieną parą (paros, pamainos operatyvaus darbo plano sudarymas);
- traukinių eismo saugumo užtikrinimas.

Traukinių eismo organizavimo pagrindas yra eismo grafikas, apimantis visų geležinkelio padalinių darbą. Jo laikymasis yra vienas iš svarbiausių geležinkelio darbo kokybės rodiklių.

Vienas iš pagrindinių traukinių eismo organizavimo rodiklių yra ruožų pralaidumas. Nagrinėjami geležinkelio ruožo pralaidumo nustatymo metodai – analitinis (reikiamo ir esamo geležinkelio ruožo pralaidumo nustatymas) ir iteratyvus (tankindant traukinių eismo grafiką, kai naudojamos programinės technologijos). Palyginus šiuos metodus matyti, kad automatizuotas eismo valdymas, grafiko vykdymas ir konfliktinių situacijų sprendimas naudojant programines technologijas, padidina geležinkelio linijos pralaidumą ir užtikrina eismo saugos reikalavimus (Valentinovič, Sivilevičius 2014). Dviejų etapų iteratyvaus metodo bandymai (Jong et al. 2013) parodė ne tik jo efektyvumą, bet ir patobulinto traukinių eismo grafiko pranašumą lyginant su esamu. Intervalinis traukinių reguliavimas plačiai naudojamas kaip šiuolaikiška priemonė optimizuoti traukinių valdymą, mažinti degalų sąnaudas, didinti geležinkelių ruožo pralaidumą. Šio metodo rezultatai pateikti 1.3 paveiksle. Automatizuotos sistemos leidžia sumažinti tarpsojyje traukinio važiavimo laiką ir atstumą tarp traukinių ir praleisti papildomus traukinius didinant ruožo pralaidumą. X – ašyje blokuojamojo ruožo ilgis, m; Y – ašyje traukinių važiavimo laikas tarpsojyje, s.



1.3 pav. Traukinių eismo grafiko tankinimas (Landex *et al.* 2007)

Nepaisant temos reikšmingumo bei numatytos problematikos sudėtingumo, Lietuvoje iki šiol nėra išsamių mokslinių darbų, kurie formuluojant traukinio eismo optimalaus valdymo uždavinį, įvertintų visų važiavimo kriterijų visumą. Norint pritraukti kuo daugiau keleivių ir klientų, norinčių vežti prekes geležinkelio keliais, būtina gerinti vežimo paslaugas, t. y. didinti vežimo geležinkeliais patrauklumą.

2. TRAUKINIŲ IR EISMO VALDYMO METODIKOS MODELIAVIMAS, ANALITINIS IR TEORINIS TYRIMAS

2.1. Traukinių važiavimo greičio ir eismo intensyvumo ryšio su kelio būkle analize

Eismo intensyvumas – vienas svarbiausių eksploatacinių rodiklių, lemiančių prežiūros ir remonto darbus, darbų rūšis ir jų apimtis. Nuo eismo intensyvumo priklauso ir pajamų dydis, kurių tam tikrą dalį galima investuoti į infrastruktūros atnaujinimą ir modernizavimą.

Traukinių važiavimo greitis nagrinėtas kaip kelio parametrų ir jų techninės būklės funkcija $v = f(s)$. Laikoma, kad jį gali reglamentuoti plano, išilginio profilio elementai, kelio konstrukcijos parametrai bei jų techninė būklė. Taip pat laikyta, kad traukinių važiavimo greičiams didelės įtakos turi kelio statyinių laikymo galia ir iešmų, esančių ant pagrindinio kelio, konstrukcija. Žinant, kad traukinių važiavimo greičiui daugiausia įtakos turi gulsčiųjų kreivių spinduliai, vertinant pakylas aukštį ir leidžiamą išcentrinės jėgos skersinį pagreitį, traukinių važiavimo greičiai kreivėse V_k gali būti skaičiuojami pagal formulę:

$$V_k = k\sqrt{R}, \quad (2.1)$$

čia: k – koeficientas, imamas pagal leidžiamą išcentrinės jėgos didejimo pagreitį; R – gulsčiosios kreivės spindulys, m.

Pagal skirtingus kreivių spindulius buvo apskaičiuoti leidžiamieji traukinių važiavimo greičiai kreivėse ir pateikti 1.1 lentelėje

1.1 lentelė. Leidžiamieji nustatyti traukinių važiavimo greičiai kreivėse

Kreivės spindulys R , m	Didžiausias leidžiamasis traukinių važiavimo greitis V_k , km/h			
	Išorinio bėgio pakyla $h=120$ mm		Išorinio bėgio pakyla $h=150$ mm	
	keleiviniams	prekiniams	keleiviniams	prekiniams
350	81	69	86	75
400	86	74	92	80
500	97	82	103	89
600	106	90	122	106
700	122	104	130	113
1000	137	116	146	126
1200	150	128	160	139

Tarpstočiuose esančios tokių spindulių kreivės ir reglamentuoja ruožu važiuojančio traukinio greitį, kai nenuslopintas skersinis pagreitis $a = 0,7 \text{ m/s}^2$.

Kelio išilginiame profilyje greičiams turi įtakos žingsnio nuolydis. Nuo jo dydžio priklauso traukinio važiavimo greitis arba traukinio masė. Jei traukinio masė Q skaičiuojamame ruože laikoma pastovi, tai traukinių važiavimo greitį galima skaičiuoti kaip traukos jėgos F funkciją:

$$F = (P \cdot \omega'_0 + Q \cdot \omega''_0)g \pm (P + Q)g \cdot i, \quad (2.2)$$

čia: P – lokomotyvo masė, t; Q – vagonų masė, t; ω'_0 – varža, tenkanti vienam lokomotyvo kN; ω''_0 – varža, tenkanti vienam vagono kN; g – laisvojo kritimo pagreitis, 9,81 m/s²; i – kelio išilginis nuolydis, ‰.

Traukinių važiavimo greičiai, priklausantys nuo kelio techninės būklės, skaičiuoti pagal įtempius bėgiuose, pabėgiuose ir balaste. Svarbiausių įtempiai bėgyje apskaičiuoti pagal formulę:

$$\sigma_b = \frac{f \cdot 10^{-6}}{4k w_p} P_{ekv-I}, \quad (2.3)$$

čia: f – koeficientas, įvertinantis perėjimą nuo pagrindinių prie briauninių (pakraščio) įtempų; k – koeficientas, kuriuo įvertinamas standumo tarp bėgio ir pagrindo santykis ($k = 0,9/1,8 \text{ m}^{-1}$); P_{ekv-I} – ekvivalentinė apkrova į bėgį įvertinant dinaminį poveikį, N; w_p – bėgio atsparumo momentas ašies, einančios per apatinę bėgio pado plokštumą, atžvilgiu, m³.

Svarbiausių įtempų pabėgyje apskaičiuoti pagal formulę:

$$\sigma_p = \frac{kl \cdot 10^{-6}}{2\omega} P_{ekv-II}, \quad (2.4)$$

čia: l – atstumas tarp gretimų pabėgių ašių, m; k – koeficientas, kuriuo įvertinamas standumo tarp bėgio ir pagrindo santykis; ω – padėklo plotas, m²; P_{ekv-II} – ekvivalentinė apkrova į pabėgį įvertinant dinaminį poveikį, N.

Svarbiausi įtempimai balaste apskaičiuoti pagal formulę:

$$\sigma_{bl} = \frac{kl \cdot 10^{-6}}{2\Omega} P_{ekv-II}, \quad (2.5)$$

čia: Ω – 0,5 pabėgio plotas įvertinant pabėgio įlinkį, m².

Faktiniai įtempiai, gauti skirtinguose elementuose pagal traukinių važiavimo greitį, sulyginti su leidžiamaisiais, leido spręsti apie greičio priklausomybę nuo kelio techninės būklės. 1.2 lentelėje pateikiami įtempiai viršutinės kelio konstrukcijos elementuose.

1.2 lentelė. Leidžiamieji ir faktiniai įtempiai viršutinės kelio konstrukcijos elementuose

Leidžiamieji ir faktiniai įtempiai bėgiuose, MPa			Leidžiamieji ir faktiniai įtempiai pabėgiuose, MPa		Leidžiamieji ir faktiniai įtempiai balaste, MPa	
pagrindiniai	galvutėje	pade	mediniuose	gelžbetoniniuose	skaldos	skaldos
400/-	240/237	320/-	1060/1,52	3,0/2,8	0,5/0,3	0,35/-

Kai kelio konstrukcijos elementai pakankamai kokybiški, problemų dėl traukinių važiavimo greičio neturėtų būti, tačiau jų nuokrypoms nuo projektinės padėties keliami griežti reikalavimai. Keliuose, kuriuose traukiniai važinėja 120–160 km/val greičiu, nuokrypos nuo standartinio vėžės pločio gali būti ne didesnės kaip – 2 + 6 mm, o nuokrypos nuo tiesės – 6 + 6 mm. Norint įvykdyti

tokius griežtus reikalavimus, reikia sudėtingų tyrimų ir specialios taisymo technologijos (Černiauskaitė *et al.* 2001).

2.2. Traukinį veikiančios dinaminės jėgos

Šiuolaikinio matematinio modeliavimo metodologijos esmė yra tiriamojo realaus objekto pakeitimas jo „atvaizdu“ – matematiniu modeliu, o vėliau – virtualiuoju objektu (matematinio modelio kompiuterine realizacija).

Paprastą traukinio dinaminį modelį galima aprašyti pagal antrąjį Niutono dėsnį (Vikulina, Sverdlin 2016):

$$M \frac{d^2 S}{dt^2} = (u_{tr} \ u_{st}) \begin{pmatrix} F_{tr} \\ F_{st} \end{pmatrix} - F_{fr} - F_{gr}, \quad (2.6)$$

čia: M – traukinio masė, t; S – traukinio koordinatė, m; F_{tr} – traukos jėga, KN; F_{st} – stabdymo jėga, KN; F_{fr} – frikcijos jėga, KN; F_{gr} – gravitacinės jėgos projekcija, KN.

Optimizavimo problema (optimalus valdymas) $U(S)$ užrašoma kaip tiesinė sistema (Vikulina, Sverdlin 2016):

$$U(S) = [S_i \ U_i] = \begin{bmatrix} S_1 & \cdots & U_1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ S_n & \cdots & U_n \end{bmatrix}, \quad (2.7)$$

Valdymo sąsajos turi būti lygios $\{0,1,2,3\}$, čia 0 – stabdymas, 1 – riedėjimas, 2 – kruizinis režimas, 3 – trauka. Riedėjimas – režimas, kai stabdymo ir traukos jėga = 0. Kruizinis – režimas, kai traukinys važiuoja nustatytu greičiu, esant atitinkamoms stabdymo ir traukos jėgoms.

Traukinio važiavimo modelyje galima apskaičiuoti suvartojamą ir rekuperacinę energiją pagal lygtį (Vikulina, Sverdlin 2016):

$$E = \int_0^S F_{tr} dS, \quad (2.8)$$

čia: S – nustatyta koordinatė, m; E – suvartojama energija, kJ.

Kadangi rekuperacinė energija priklauso nuo elektrodinaminio stabdymo, tai stabdymo efektas gali būti aprašytas kaip (Vikulina, Sverdlin 2016):

$$E_r = \eta \int_0^S F_{edbr} dS, \quad (2.9)$$

čia: E_r – rekuperacinė energija, kJ; η – į lokomotyvo variklį sugrįžtanti energija, %;

F_{edbr} – elektrodinaminio stabdymo jėga, KN.

Sudarytas algoritmas ir valdymo optimizavimas įrodo, kad automatiškai valdomi traukiniai per trumpą laiką išnaudoja beveik 100 % traukos efektyvumo ir sutaupo apie 14,5 % energijos (Vikulina, Sverdlin 2016).

Traukinio traukos skaičiavimo procese lokomotyvas, traukinio sąstatas pakeičiamas į modelį, kuriame skaičiuojamas taškas yra sąstato viduryje. Jame koncentruojasi traukinio svoris ir tokiu

atveju traukinio važiavimą priimame kaip vieno taško judėjimą. Visos jėgos bus priimtos kaip veikiančios judantį materialųjį tašką.

Judantį lokomotyvą veikia:

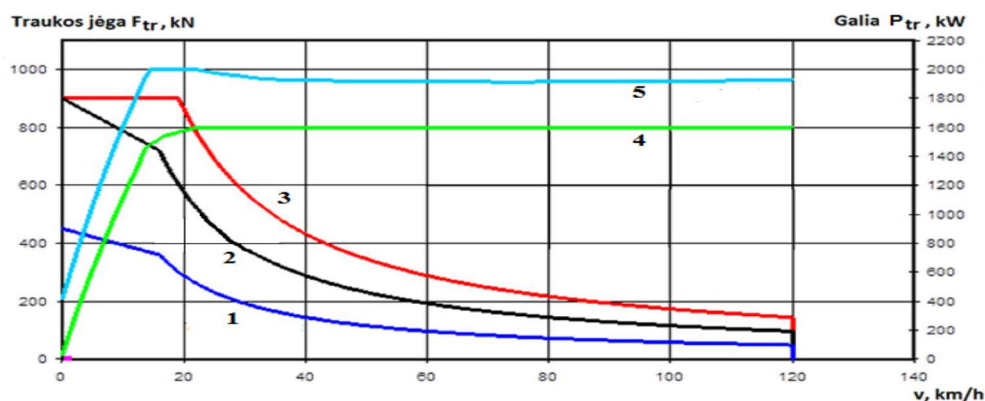
- traukos jėga;
- stabdymo jėga;
- pasipriešinimo jėga.

Traukinių veikiančių išorinių jėgų atstojamąją galima pateikti šia išraiška (Jastremskas 2012):

$$F_{\Sigma} = F_{tr}(v, u(x)) - W'_0(v, u(x)) - W''_0(v) - W_i(x) - W_R(x) - W''_{os}(v) - W_{pg}(v) - W_{sv}(v) - B_{ed}(v, u(x)) - B_p(v, K_{\Sigma}(t), u(t)), \quad (2.10)$$

čia: F_{tr} – traukos jėga, KN; W'_0 – pagrindinė pasipriešinimo jėga, KN; W''_0 – sąstato važiavimo pagrindinė pasipriešinimo jėga, KN; W_i – kelio nuolydžių pasipriešinimo jėga, KN; W_R – kelio kreivių pasipriešinimo jėga, KN; W_{os} – išorinių oro sąlygų pasipriešinimo jėga, KN; W_{pg} – povagoninio generatoriaus pasipriešinimo jėga, KN; W_{sv} – šoninio vėjo pasipriešinimo jėga, KN; B_{ed} – elektrodinaminė jėga, KN; B_p – pneumatinio stabdymo jėga, KN.

Autonominės traukos lokomotyvuose (šilumvežiuose, dyzeliniuose traukiniuose, automotrisėse), vidaus degimo variklio cilindruose degant degalais, paprastai dyzeliniams, cheminė degalų degimo energija paverčiama alkūninio veleno mechaniniu darbu. Toliau vidaus degimo variklio energija per galios pavarą (mechaninę, hidraulinę, elektrinę) perduodama aširačiams, kur paverčiama **lokomotyvo traukos jėga F_k** . Lokomotyvo traukos jėga F_k privalo kisti atvirkščiai proporcingai judėjimo greičiui v . Tokia charakteristika vadinama hiperboline. Ji leidžia lokomotyvą visame greičio diapazone valdyti optimaliai, t. y. visiškai išnaudoti dyzelinio variklio galią (Liudvinavičius, Lingaitis 2012). Šilumvežio traukos jėgos priklausomybės nuo važiavimo greičio grafikas (šilumvežio traukos charakteristika) pateiktas 2.1 paveiksle (Jastremskas 2012).



2.1 pav. Tipinės šilumvežio traukos charakteristikos(Jastremskas 2012):

1 – šilumvežio vienos sekcijos traukos jėgos charakteristika; 2 – šilumvežio dviejų sekcijų traukos jėgos (dviguba trauka) charakteristika; 3 – šilumvežio trijų sekcijų traukos jėgos (dauginė trauka) charakteristika; 4 – šilumvežio aširačių išvystoma galia; 5 – šilumvežio dyzelio galia

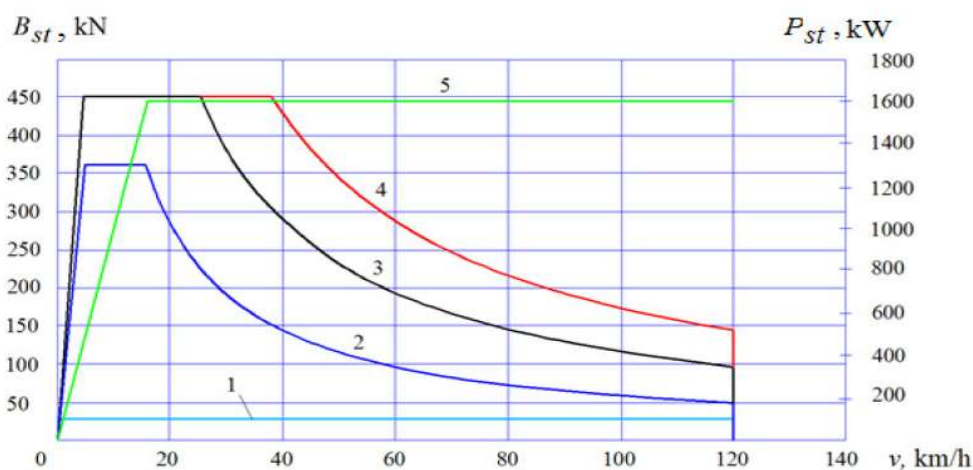
Numatoma, kad traukinį veikianti stabdymo jėga gali būti sukurama elektriniais (rekuperaciniais arba elektrodinaminiais) stabdžiais. Rekuperacinių stabdžių sukurama stabdymo jėga B_{st} priklauso nuo važiavimo greičio v ir valdiklio padėties u . Ji apytiksliai skaičiuojama per tiesines funkcijas, analogiškai kaip traukos charakteristikos. Šilumvežio stabdymo jėgos B_{st} ir stabdymo galios P_{st} priklausomybės nuo važiavimo greičio v grafikas (šilumvežio stabdymo charakteristika) pateiktas 2.2 paveiksle.

Stabdymo jėgos B_p , veikiančios traukinį pneumatinio stabdymo metu, skaičiavimui naudojama formulė (Гребенюк 2004):

$$B_p = n_{tr} \cdot \varphi_{tr} \cdot (v, K(t)) \cdot K(t), \quad (2.11)$$

čia: n_{tr} – traukinio stabdžių trinkelėlių skaičius; φ_{tr} – trinkelėlių trinties į ratą koeficientas.

Trinties koeficientas φ_{tr} priklauso nuo traukinio važiavimo greičio v ir spaudimo į stabdžių trinkelę jėgos K . Jis nustatomas iš empirinės formulės, kurioje koeficientas priklauso nuo stabdžių trinkelėlių tipo, o greitis v matuojamas km/h. Spaudimo į stabdžių trinkelę jėgos $K(t)$ kitimo dėsningumas priklauso nuo stabdžių sistemos suslėgto oro skirstytuvo, o didžiausio spaudimo dydis – nuo stabdymo rūšies (tolygus, staigus).



2.2 pav. Tipinės šilumvežio su elektrine pavara charakteristikos esant elektrodinaminio stabdymo režimui (Jastremskas 2012):

1 – papildomų įrenginių galia; 2 – vieno šilumvežio stabdymo charakteristika $B_{st} = f(v)$; 3 – dviejų šilumvežių stabdymo charakteristika; 4 – trijų šilumvežių stabdymo charakteristika; 5 – šilumvežio aširačių stabdymo galios charakteristika $B_{st} = f(v)$

Šilumvežio judėjimo pagrindinė pasipriešinimo jėga W'_0 , priklauso nuo jo važiavimo greičio ir darbo režimo: traukos arba laisvos jėgos. Papildomos judėjimo pasipriešinimo jėgos traukos režimu W'_0 ir laisvosios eigos režimu W'_{0te} , skaičiuojamos pagal formules:

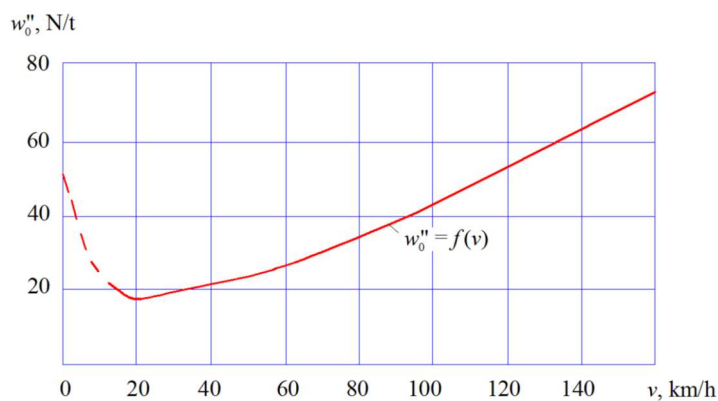
$$W'_0 = P \cdot w'_0(v) \text{ ir } W'_{0te} = P \cdot w'_{0te}(v). \quad (2.12)$$

Pagrindinė pasipriešinimo jėga važiuojančiam sąstatui W''_0 priklauso nuo važiavimo greičio ir vagonų tipo. Ji apskaičiuojama pagal formulę:

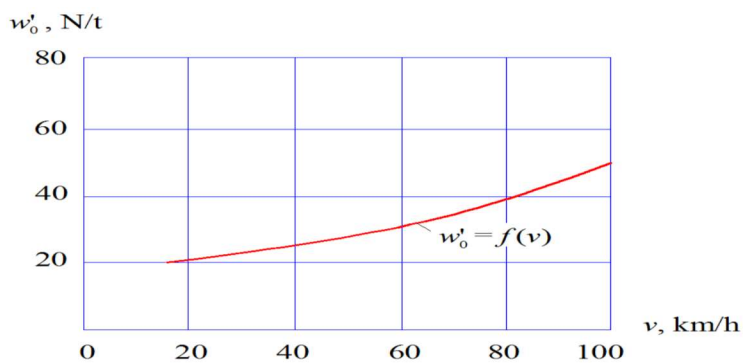
$$W''_0 = Q \cdot w''_0(v). \quad (2.13)$$

Lyginamųjų pasipriešinimo jėgų W'_0 ir W'_{0te} priklausomybės nuo važiavimo greičio pateiktos 2.3 paveiksle.

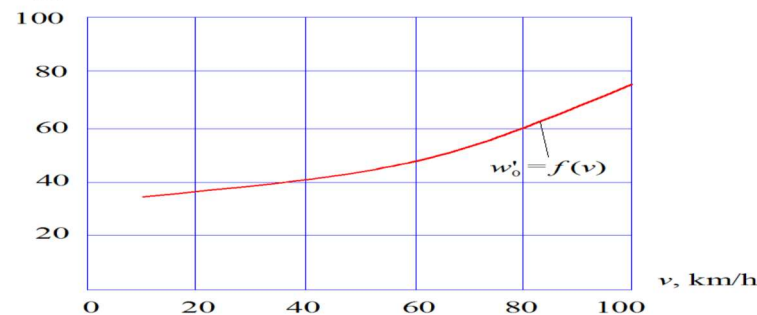
a)



b)



w'_{0te} , N/t



c)

2.3 pav. Tipinės pagrindinės lyginamųjų pasipriešinimo judėjimui jėgų kreivės (Jastremskas 2012):

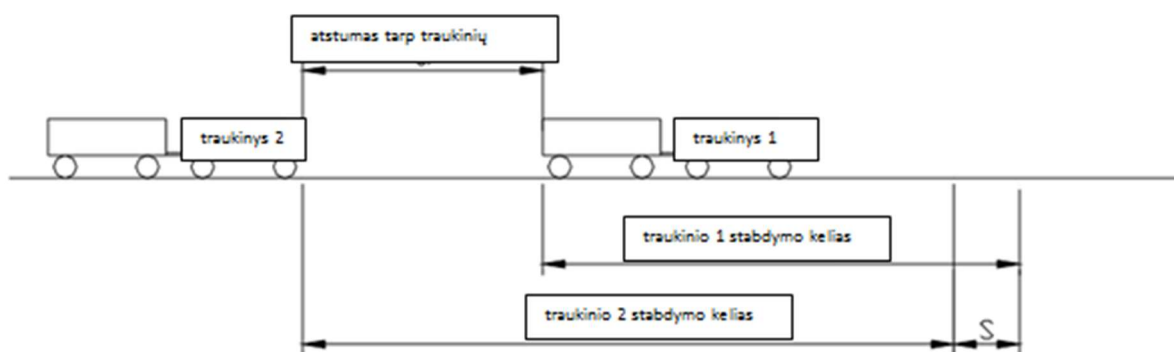
a) keturių ašių vagono; b) šilumvežio traukos režimo; c) šilumvežio riedant laisvąja eiga

2.3. Traukinių atskyrimo principai

Europietiškos vėžės, ypač geležinkelio ruožuose su dideliais traukinių greičiais, pralaidumo skaičiavimas vykdomas atsižvelgiant į 3 pagrindinius traukinių atskyrimo principus:

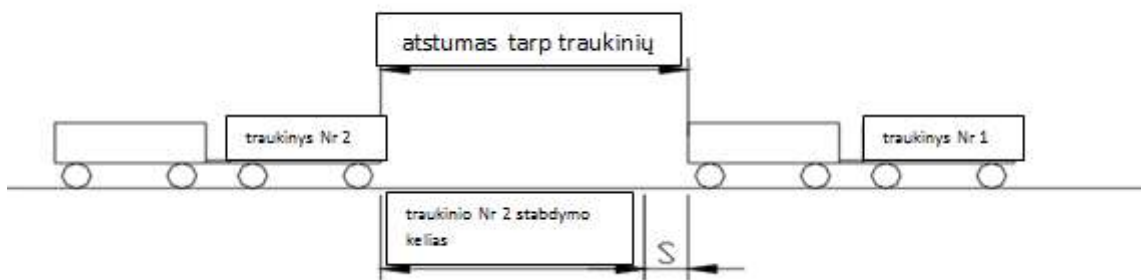
- santykinis traukinių atskyrimas;
- traukinių atskyrimas pagal stabdymo kelią;
- traukinių atskyrimas pagal blokuojamojo ruožo signalus.

Santykinis traukinių atskyrimas. Atstumas tarp traukinių skaičiuojamas kaip važiuojančių traukinių stabdymo kelio ilgio ir saugaus atstumo suma. Santykinio traukinių atskyrimo schema pateikta 2.4 paveiksle



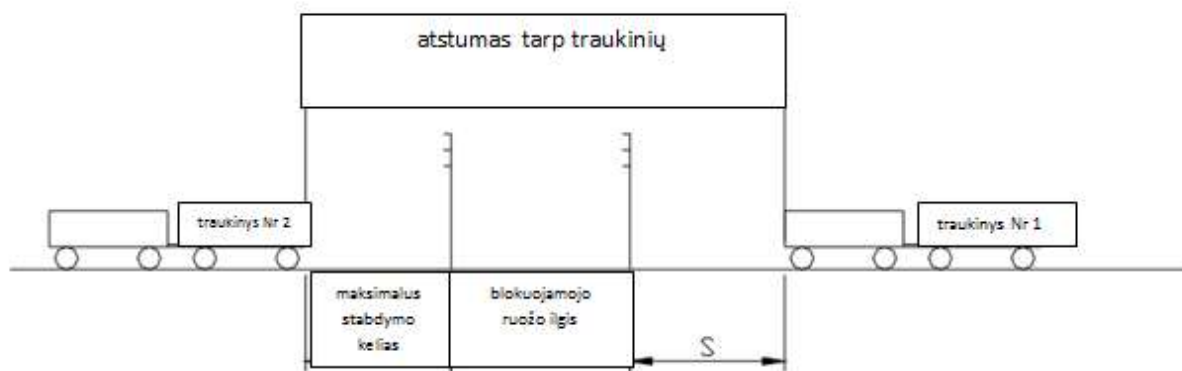
2.4 pav. Santykinis traukinių atskyrimas

Traukinių atskyrimas pagal stabdymo kelią. Atstumas tarp traukinių skaičiuojamas kaip traukinių stabdymo kelio ilgio ir saugaus atstumo suma. Kitaip vadinamas kaip judantis blokas (angl. moving block).



2.5 pav. Traukinių atskyrimas pagal stabdymo kelią

Traukinių atskyrimas pagal blokuojamojo ruožo signalus. Tradicinis ir Lietuvoje taikomas traukinių atskyrimo metodas. Skaičiuojamas kaip stabdymo kelio ilgio, blokuojamojo ruožo ilgio ir saugaus atstumo suma.



2.6 pav. Traukinių atskyrimas pagal blokuojamojo ruožo signalus

čia: S – saugos atstumas.

2.4. Esamos 1520 mm vėžės sistemos, stabdymo kelių skaičiavimai

Blokuojamųjų ruožų ilgio patikrinimas, esant triženklei automatinės blokuotės sistemai, atliktas pagal saugaus traukinio judėjimo sąlygas, atsižvelgiant į prieš tai nurodytą traukinių kategorijų stabdymo kelių skaičiavimus.

Skaičiuojant traukinių stabdymo kelių ilgius ruože Jonava–Gaižiūnai, numatomas bendras mažiausias stabdžių paspaudimas kiekvienai traukinio svorio 100-ajai tonai, kai yra naudojamos ketaus stabdžių trinkelės:

- Pakrautiems prekiniams traukiniams su įrengtais oriniais stabdžiais ir ketaus stabdžių trinkelėmis, esant greičiui iki 90 km/val. – 33 tonos.
- Keleiviniams traukiniams su įrengtais oriniais stabdžiais ir ketaus stabdžių trinkelėmis, esant greičiui iki 120 km/val. – 60 tonų.
- Keleiviniams traukiniams su įrengtais elektriniais oriniais stabdžiais ir kompozicinėmis stabdžių trinkelėmis, esant greičiui iki 140 km/val. – 78 tonos.
- Greitiesiems keleiviniams traukiniams su įrengtais elektriniais oriniais stabdžiais ir kompozicinėmis stabdžių trinkelėmis, esant greičiui iki 160 km/val. – 80 tonų.

Apskaičiavus stabdymo kelią, nustatomas traukinio stabdymo proceso pradžios laikas:

- Greitiesiems ir paprastiems keleiviniams traukiniams su įrengtais elektriniais oriniais stabdžiais – 2 s.
- Keleiviniams traukiniams su oriniais stabdžiais – 4 s.
- Krovininiams traukiniams su įrengtais oriniais stabdžiais – 12 s (sąstatas daugiau nei 300 ašių).

Skaičiuojant stabdymo kelią, kai yra naudojamas automatinis stabdymas, automatinių stabdžių veikimo laikas stabdant su ALS yra ilgesnis 12 s. ALS kodo signalo parodymų pasikeitimo

laikas lygus 6 s. Mašinisto reakcija į gauto ALS kodo pasikeitimo laiką yra 3 s. Priklausomai nuo stabdymo būdo, stabdžių paspaudimo procentinė išraiška yra:

- Stabdymo autostopu režimas – 100 %.
- Visiškas paprastas stabdymo režimas – 80 %.
- Paprastas stabdymo režimas: prekiniais traukiniais – 65 %; keleiviniams traukiniais – 80%.

Pagal žemiau pateiktus skaičiavimus, nustatomi traukinių stabdymo keliai.

1. Skaičiuojamas ruožo nuolydžio santykis visam kelio ruožui procentais:

$$x_{rn} = \frac{L_r \cdot 100\%}{L_k}, \quad (2.14)$$

čia: x_{rn} – ruožo nuolydžio dalis visam kelio ruožui, %; L_r – ruožo ilgis, m; L_k – viso blokuojamojo kelio ilgis, m.

2. Skaičiuojamas vidutinis nuolydis:

$$i_{vid} = \frac{i_{r1} \cdot x_{r1} + i_{r2} \cdot x_{r2} + \dots + i_{rn} \cdot x_{rn}}{100\%}, \quad (2.15)$$

čia: i_{vid} – vidutinis kelio nuolydis visam blokuojamojo kelio ilgiui, ‰.

3. Pagal metodinius nurodymus interpoliavimo būdu, apskaičiuojame vidutinį stabdymo kelią:

$$L_{st} = \frac{(L_{stM} - L_{stN}) \cdot i_{sk}}{2} + L_{stN}, \quad (2.16)$$

čia: L_{st} – stabdymo kelias, m; L_{stM} ir L_{stN} (iš lentelės paimtos didžiausia ir mažiausia stabdymo reikšmės pagal įeinantį į tas ribas nuolydį), m; i_{sk} – nuolydžio skirtumo (tai reiškia, kad jeigu nuolydis yra -3,68, tai reikšmės imamos $L_{stM} - 2$ nuolydžio, o $L_{stN} - 4$. Skirtumas bus nuo mažesnės reikšmės, t. y. $3,68 - 2 = 1,68$) interpoliavimas.

2.5. Intervalų tarp traukinių automatinės blokuotės sistemoje su apsauginiais ruožais, nustatymas

Siekiant nustatyti automatinės blokuotės intervalus tarp traukinių, skaičiuojamuoju traukiniu laikomas prekinis traukinys. Skaičiuojamasis intervalas tarp traukinių, kai išdėstyti automatinės blokuotės šviesoforai, yra 8 min. Pateikiama, kaip automatinės blokuotės intervalas tarp traukinių nustatomas stotyse ir tarpstotyje ruože Jonava – Gaižiūnai, esant triženklei automatinei blokuotei.

Automatinės blokuotės šviesoforų išdėstymas bus atliktas pagal fiksuotą laiką, nubrėžiamas ant prekinų traukinių skaičiuojamosios greičių kreivės su duotomis masių normomis, atsižvelgiant į priimtus traukinių intervalus ir stabdymo kelių skaičiavimus.

Blokuojamųjų ruožų patikrinimas, bus atliktas atsižvelgus į šiuos reikalavimus:

- Kiekvieno blokuojamojo ruožo ilgis turi būti ne mažesnis už stabdymo kelią, skirtą nustatytai vietai, atliekant pilną paprastą stabdymą ir važiuojant maksimaliu greičiu, tačiau

ne didesnis kaip 160 km/val. keleiviniams ir 120 km/val. prekiniams traukiniams; be to, turi būti ne mažesnis nei pusė stabdymo kelio ilgio, kai yra naudojamas staigusis stabdymas nurodytais greičiais, atsižvelgus į kelią, kurį nuvažiuoja per laiką, būtiną dėl automatinės lokomotyvo signalizacijos ir traukinio automatinės stabdžių sistemos suveikimo.

- Kiekvieno blokuojamojo ruožo ilgis turi būti ne mažesnis nei pusė stabdymo kelio, kai yra naudojamas paprastas stabdymas, važiuojant maksimaliu greičiu nustatytoje vietoje, tačiau ne didesniu kaip 160 km/val keleiviniams ir 120 km/val prekiniams traukiniams.

Į paprasto stabdymo kelią, įskaitomas ir kelias, kurį nuvažiuoja traukinys per lokomotyvo šviesoforo parodymų pasikeitimus iš „žalio“ signalo į „geltoną“ signalą, kuris informuoja mašinistą apie du laisvus ruožus, esančius prieš traukinį ir būtinybę sumažinti greitį. ALS kodo nurodymo laikas lygus 6 s, o mašinisto reakcija į juos – 3 s, t. y. iš viso 9 s. Apsauginiai ruožai negali būti trumpesni už staigaus stabdymo kelią. Jie turi apimti kelią, kurį pravažiavo traukinys per laiką, būtiną, kad suveiktų ALS bei automatinio stabdymo įrenginiai ir prasidėtų stabdymas. Tuo metu traukinys pravažiuoja signalizuojantį geltonu žiburiu šviesoforą, leidžiamu sumažintu greičiu. Nustatant apsauginius ruožus, stabdymo kelių skaičiavimai yra atliekami nustatytoms traukinių kategorijoms, kadangi kiekvienam greitajam traukiniui leidžiamas važiavimo greitis per geltonu žiburiu signalizuojantį šviesoforą yra 100 km/val. ir automatinio stabdymo įrenginių stabdymo kelias yra analogiškas kaip krovinių taip ir keleivinių traukinių.

2.6. Ruožo pralaidumo skaičiavimas

Reikiamas linijos pralaidumas (įvairių rūšių ir skirtingos masės keleivinių ir prekinų traukinių, kuriuos būtina praleisti geležinkelių linija, skaičius, įskaitant būtiną rezervą) apskaičiuojamas pagal šią formulę:

$$P_{\text{reik.}} = N_{\text{prek.}} + \sum \varepsilon_i N_i; \quad (2.17)$$

čia: $N_{\text{prek.}}$ – nustatyti prekinų traukinių, kurie visą ruožą važiuoja neperformuojami (tiesioginiai ir ruožo) eismo mastai;

N_i – kitų rūšių traukinių (keleivinių, skubiųjų prekinų, rinktinių ir kt.), kurių važiavimo tarpstočiais laikas kitoks nei prekinų traukinių (tiesioginių, ruožo);

$\sum \varepsilon_i$ – tam tikros rūšies traukinių (keleivinių, skubiųjų prekinų, rinktinių ir kt.) trikdžio koeficientas (skaičius, rodantis, kiek kartų prekinų arba prekinio traukinio dalį eismo grafike sumažina vienas keleivinis, skubasis prekinis, rinktinis traukinys). Šis koeficientas nustatomas pagal esamo geležinkelių pralaidumo apskaičiavimo instrukciją.

Norint organizuoti intensyvesnį traukinių eismą, esamas geležinkelių linijos pralaidumas (pralaidumas, kuris gali būti pasiektas atsižvelgiant į ruožo technines priemones ir įrangą bei

traukinių eismo tvarkymo būdą) pagal visus parametrus turi būti didesnis už reikiamą. Priešingu atveju būtina numatyti priemones, kurios leistų padidinti esamą geležinkelių linijos pralaidumą ir užtikrintų:

- nustatytus keleivių ir krovinių vežimo mastus;
- traukinių eismo saugą;
- patikimą geležinkelių linijų eksploatavimą;
- darbų, reikalingų geležinkelių linijų elementų pajėgumams padidinti, kuriuos atliekant neturėtų būti stočių, tarpstčių, lokomotyvų ir kitų ūkių pralaidumo disproporcijos, kompleksiskumą;
- tinkamas sąlygas šiuolaikiškesniems eksploatacijos darbo metodams taikyti ir gerinti kokybinius riedmenų naudojimo rodiklius – didinti traukinių greitį, mažinti vagonų ir lokomotyvų prastovas ir kt.;
- techninių ekonominių rodiklių gerinimą (darbo našumo didinimas, eksploatacinių išlaidų mažinimas ir kt.);
- galimybę pirmiausia atlikti darbus, reikalingus labiausiai apkrautų geležinkelių linijų elementų pralaidumui padidinti.

Planuojamos organizacinės ir techninės priemonės geležinkelių linijų pralaidumui didinti, turi būti įgyvendinamos iki naujo TEG įvedimo.

Norint užtikrinti sklandų TEG įvykdymą, turi būti laikomasi šių reikalavimų:

- visų geležinkelių transporto techninių priemonių (lokomotyvų, savaeigių sąstatų, vagonų, kelių, signalizacijos ir ryšių įrenginių, kontaktinio tinklo ir kt.) patikimumas ir technologinių procesų tobulumas;
- techninių priemonių patikimumo koeficientas parodo paros laiko dalį, kurios metu traukiniai praleidžiami galimo techninių įrenginių veikimo sutrikimų atvejais. Į šį koeficientą, kuris nustatomas pagal esamo geležinkelių pralaidumo apskaičiavimo instrukcijas, būtina atsižvelgti apskaičiuojant geležinkelių linijų pralaidumą;
- sudaromo TEG pastovumui užtikrinti turi būti numatytas tam tikras pralaidumo rezervas. Šiam tikslui būtina numatyti laisvas laiko juostas, kurios vėliau panaudojamos galimiems traukinių eismo nuokrypiams pašalinti;
- braizant TEG būtina numatyti tarpstčių, ribojančių vienkelių geležinkelių linijų pralaidumą, laiko rezervo juostas (intervalus). Tokio intervalo trukmė turi būti lygi traukinio važiavimo šiuo tarpstčiu laikui. Tarp laiko rezervo juostų turi būti nubraižoma 10%–12% visos paros prekių traukinių skaičiaus;

- dvikelėse geležinkelių linijose laiko rezervo juostas privalu numatyti su poslinkiu kiekviena eismo kryptimi. Laiko rezervo juostų poslinkis suteikia galimybę, praleidus 5% paros traukinių skaičiaus, turėti tam tikrą laiko rezervą, kad prireikus galima būtų operatyviai keisti traukinių praleidimo tvarką ir tuo pačiu šalinti susidariusius traukinių eismo nuokrypius;
- po aplenkimo ar prasilenkimo traukinys turi būti tuoj pat išleistas eismo saugą užtikrinančiu mažiausiu stoties intervalu;
- siekiant sudaryti stabilias TEG vykdymo sąlygas dvikelėse geležinkelių linijose, praleidus 8%–10% paros traukinių skaičiaus, būtina numatyti 6-8 minutėmis didesnį intervalą. Toks intervalas leidžia sumažinti važiavimo tarpstočiais laiko nuokrypių nuo normatyvų įtaką prekinį traukinių ruožo greičiui.

Norint, kad tinkamai būtų vykdomas TEG, laiku atnaujinamas ir vėl organizuojamas sutrikdytas eismas pagal grafiką bei įgyvendinamos pralaidumo didinimo priemonės, geležinkelių dvikelės linijos tarpstočių pralaidumo koeficientas (esamo ir reikiamo pralaidumo santykis) turi būti ne didesnis kaip 0,91 – dvikelėse linijose, 0,87 – mišrioje ir 0,85 – vienkėlėse linijose.

2.7. Traukinio masės skaičiavimo metodika

Kiekviena geležinkelių linija važiuojančių traukinių masė, apskaičiuojama atsižvelgiant į lokomotyvo galingumą ir skaičiuojamąjį geležinkelių linijos nuolydį. Taip, kaip nurodo traukos skaičiavimo reikalavimai. Apskaičiuota traukinio masė tikrinama bandomaisiais važiavimais, atsižvelgiant į atvykimo ir išvykimo kelių talpumą tarpinėse stotyse, kuriose prireikus traukiniai galėtų būti sustabdyti.

Siekiant optimaliai valdyti traukinį ir minimaliai naudoti traukai skirtus degalus, taikomi tokie apribojimai:

- traukinio greitis visame judėjimo ruože neturi viršyti leistinų ribų;
- traukinys turi būti valdomas neviršijant šilumvežio traukos parametrų ir traukinio stabdymo parametrų;
- traukos generatorių ir variklių temperatūra neturi viršyti leistinų ribų;
- turi būti visiškai įvykdyti visi reikalavimai, keliami traukinio stabdžių efektyvumui patikrinti važiavimo metu;
- traukinio judėjimo laiko, apskaičiuoto konkrečiame važiavimo ruože, nukrypimas nuo iš anksto nustatyto eismo tvarkaraščiuose laiko, neturi viršyti leistinio intervalo.

Paprastai tiesioginių traukinių važiavimo kryptimis nustatoma unifikuota traukinio masė, kurią lokomotyvas pajėgia traukti daugelyje šios krypties tarpstočių. Jeigu geležinkelių linijos

dalyje (viename ar keliuose tarpstočiuose), apskaičiuota traukinio masė yra mažesnė už unifikuotą, tai prireikus vežti unifikuotos masės traukinį, gali būti naudojama dviguba lokomotyvo trauka arba stumtuvai.

Unifikuota masė gali būti nustatoma tam tikromis kryptimis važiuojančių prekių traukinių:

- refrižeratorinių;
- konteinerinių ir kontreilerinių;
- specializuotų, kuriais vežami kroviniai, pakrauti į universalius riedmenis;
- žiediniais maršrutais vežančių anglį, rūdą, trąšas ir metalą;
- žiediniais maršrutais vežančių skystuosius krovinius (trąšas, naftos produktus).

Traukinio sąstato svoris apskaičiuojamas pagal formulę (Гребенюк 1997):

$$Q_c = \frac{F_{tr} - P_l \cdot (\omega_p' + i_i)}{(\omega_p'' + i_i)} \quad (2.18)$$

čia: F_{tr} – lokomotyvo traukos jėga, KN; P – lokomotyvo masė, t;

ω_p' – lokomotyvo pagrindinė lyginamoji pasipriešinimo jėga judėjimui, kilogramais tonai;

ω_p'' – vagonų pagrindinė lyginamoji pasipriešinimo jėga judėjimui, kilogramais tonai;

i_i – skaičiuotinas nuolydis, promilėmis.

Lokomotyvo (ω_p') ir vagono (ω_p'') pagrindinė lyginamoji pasipriešinimo jėga apskaičiuojama pagal traukos skaičiavimo reikalavimus.

Pagal traukinių eismo grafiko sudarymo instrukcija traukinio sąstato masė apskaičiuojama pagal formulę:

$$Q = \frac{F_{k.sk} - m_l g (w_0' + i_{sk})}{g (w_0'' + i_{sk})}, \quad (2.19)$$

čia: $F_{k.sk}$ – skaičiuojamoji lokomotyvo traukos jėga, Niutonais;

m_l – lokomotyvo masė, tonomis;

g – laisvai krintančių kūnų pagreitis, metrais per sekundę kvadratu;

w_0' – lokomotyvo pagrindinė lyginamoji pasipriešinimo jėga judėjimui, kilogramais tonai;

w_0'' – vagono pagrindinė lyginamoji pasipriešinimo jėga judėjimui, kilogramais tonai;

i_{sk} – skaičiuotinis nuolydis, promilėmis.

Lokomotyvo (w_0') ir vagono (w_0'') pagrindinė lyginamoji pasipriešinimo jėga apskaičiuojama pagal traukos skaičiavimo reikalavimus.

2.8. Ekonominis „Rail Baltica“ kaštų ir naudos vertinimas

„Rail Baltica Global Forum 2017“ renginyje buvo pristatytos išvados, kad europinės geležinkelio vėžės projektas yra ekonomiškai ir finansiškai patvirtintas ir jis prisidės prie aplinkos taršos mažinimo bei taupys keleivių laiką. Analizę atliko konsultacijų bendrovė „Ernst & Young Baltic“. Specialistai atliko sistemingą kiekybinį visuotinio projekto „Rail Baltica“ investicijų įvertinimą trijose Baltijos šalyse - sąnaudų ir naudos analizę. Nauja sąnaudų ir naudos analizė dar kartą patvirtino, jog projektas naudos visuomenei požiūriu yra reikalingas ir įgyvendinus projektą išauga visuomenės gerovė.

Bendra apskaičiuota trijų valstybių projekto investicijų suma yra apie 5,788 milijardo eurų. (Estija – 1,346 milijardo eurų (valstybės dalis ~268 milijonų eurų); Latvija – 1,968 milijardo eurų (valstybės dalis ~393 milijonų eurų); Lietuva – 2,474 milijardo eurų (valstybės dalis ~493 milijonų eurų. Sumos pateiktos įvertinus 85 proc. ES finansavimą.

Apskaičiuota projekto socialinė-ekonominė nauda apytiksliai lygi 16,226 milijardų eurų (nediskontuota vertė).

Planuojama, kad nutiesus „Rail Baltica“ geležinkelį, keleiviai traukiniu iš Vilniaus į Rygą nuvyks per dvi valandas. Bendras sutaupytas keleivių laikas vertinamas 5,3 mln. valandų per metus.

Atliktos analizės dokumente teigiama:

- Paskaičiuota planuojama projekto socialinė-ekonominė nauda, apytiksliai lygi 16,226 milijardų eurų (nediskontuota vertė), kuri yra žymiai didesnė nei bendros reikalingos nacionalinės investicijos projekto įgyvendinimui. Įvertinta, kad projektas turės ir Baltijos šalių BVP didinimo poveikį, lygų papildomiems 2 milijardams eurų. Greta paskaičiuoto tiesioginio socialinio-ekonominio poveikio naudų, projektas generuos ir išorės poveikio neišmatuojamas naudas, t. y. netiesioginio poveikio ir daugiausiai skatinamojo pobūdžio. Daugiausiai neišmatuojamos naudos galima tikėtis tokiose srityse kaip Baltijos šalių verslo bendruomenės bendradarbiavimo sustiprinimo, geresnio regiono šalių pasiekiamumo kultūros bei kitų pramogų srityse, ar kitokioms visuomeninėms paslaugoms teikti. Taigi projektas naudos visuomenei požiūriu yra reikalingas ir įgyvendinamas, kadangi nauda visuomenei yra žymiai didesnė už projekto kapitalo ir eksploatacijos išlaidas.
- „Rail Baltica“ trijų Baltijos šalių ekonomikoms vidutiniškai atneš paskaičiuotos grynosios socialinės-ekonominės naudos pinigų srautus lygius 6 eurų už kiekvieną iš nacionalinio biudžeto investuotą eurą. Bus gauta ir papildoma nauda iš BVP padidėjimo poveikio bei neišmatuojamos netiesioginio poveikio naudos, t. y. daugiausiai skatinamojo pobūdžio. Be to, vertinant iš visiškai finansinės perspektyvos, likutinė turto vertė nurodyto laikotarpio pabaigoje (2055 m.) viršys bendrą projekto šalių investicijų dydį.

- „Rail Baltica“ projekto statybos darbų įgyvendinimo metu bus sukurta apie 13 000 darbo vietų ir daugiau nei 24 000 darbo vietų bus sukurta netiesiogiai susijusiose arba paskatintose pramonės šakose.
- Skaičiuojama, kad „Rail Baltica“ projekto eksploatacijos etape, kaip saugesnės transporto rūšies naudojimas, leis išgelbėti apie 400 žmonių gyvybių, o tai vidutiniškai prilygsta 30 mln. eurų per metus vertei. Projektas taip pat mažins CO2 emisijų išmetimų kiekius, kurių skaičiuojama nauda lygi 3,0 milijardams eurų, bei mažins oro taršos kiekius, kurių skaičiuojama nauda lygi 3,3 milijardo eurų vertės, - taip ženkliai prisidedant prie pasaulinės Europos Sąjungos lyderystės aplinkos tvarumo srityje.
- Apskaičiuota, kad 2030 m. „Rail Baltica“ geležinkelio linijos visose trijose Baltijos valstybėse infrastruktūros priežiūros išlaidos, pvz., bėgių, priežiūros, tiltų/tunelių, terminalų, stočių ir t. t., bus 58,9 milijonai eurų.

Atlikta analizė patvirtina, kad geležinkelio linijos infrastruktūros valdytojas ateityje taps finansiškai tvarus, praėjus pradiniam 5 metų nacionalinės finansinės paramos laikotarpiui (trijų Baltijos šalių bendra finansinė parama sieks 28,6 milijonų eurų), po to kai „Rail Baltica“ pasieks savo numatomą rinkos potencialą.

Keleivių vežimai. „Rail Baltica“ konkurenciniai keleivių pervežimo pranašumai yra:

- Greitis, taupomas laikas, komfortas, produktyvus keliavimo laikas, saugesni ir ekologiškai tvarūs transporto būdai.
- „Rail Baltica“ keleiviai, tai daugiausiai Baltijos šalių gyventojai keliaujantys tarp pagrindinių regiono centrų ir Baltijos šalių viduje (intensyviai taip pat bus naudojama ir keliaujančiųjų kryptis tarp Baltijos šalių ir Lenkijos, link Varšuvos).
- Tarptautinių traukinių paslauga pagrindinėje „Rail Baltica“ linijoje bus pasiekama bent kas dvi valandas (abiem kryptimis per dieną važiuos aštuonios poros traukinių).
- Skaičiuojamos ilgalaikės vidutinės pajamos iš vieno keleivio, keliaujant Talinas – Ryga, sieks apie 38 EUR; o kelionės trukmė = 1:55 min (palyginimui kelionė automobiliu – kainuoja 68 EUR; o kelionės trukmė = 4:05 (pilnos išlaidos skaičiuojant, kad vienu automobiliu važiuoja vienas keleivis)).
- Skaičiuojamos ilgalaikės vidutinės pajamos iš vieno keleivio, keliaujant Ryga – Vilnius, sieks apie 38 EUR; o kelionės trukmė = 02:01 min (palyginimui kelionė automobiliu – kainuoja 65 EUR; kelionės trukmė = 03:30 (pilnos išlaidos skaičiuojant, kad vienu automobiliu važiuoja vienas keleivis)).
- Skaičiuojama sutaupomo laiko nauda: 2,4 milijardų eurų.

Krovinių gabenimas. Numatoma, kad „Rail Baltica“ pagrindiniu scenarijumi, 2026 m. bus pervežta apie 2 milijonai tonų, 2030 m. – 13,7 milijonų tonų, o 2055 m. – maždaug 20 milijonų tonų.

„Rail Baltica“ konkurenciniai krovinių gabenimo pranašumai:

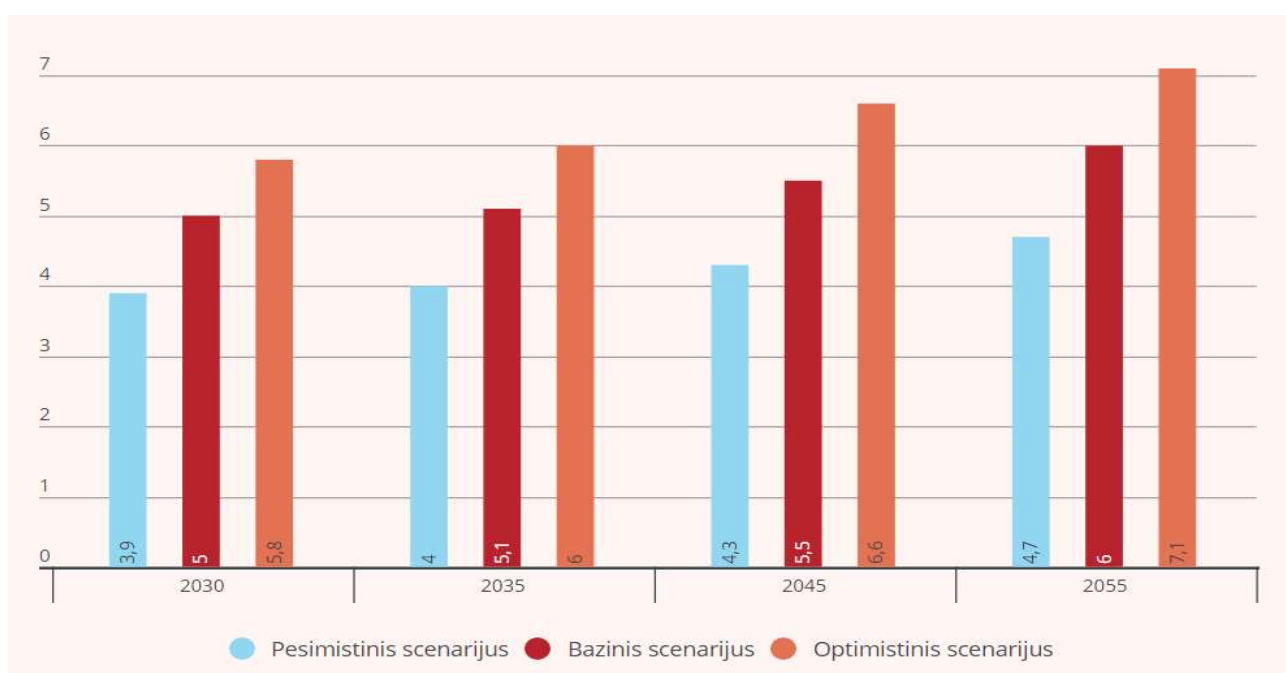
- Greitis – krovinių pervežimas tarp Baltijos šalių ir Centrinės Europos taškų truktų mažiau nei 2 dienas, kai gabenimas sunkvežimiais tuo pačiu maršrutu trunka iki 4 dienų.
- Patikimumas - naudojant iš anksto žinomus, reguliarius tvarkaraščius, ribojant sustojimų skaičių ir turint gerą atsparumą nepalankioms oro sąlygoms, tiekimo grandinės geležinkeliais galima organizuoti reikiamu laiku, ypač kai tai efektyviai suderinama su kitais tarprūšinio tiekimo grandinės elementais (pvz., Suomijos įlankos keltų tvarkaraščiais).
- Pilni kroviniai - „Rail Baltica“ sujungs keletą svarbių sustojimo taškų (centrų), kuriuose galima bus pilnai sukomplektuoti krovinius.
- Transportavimo išlaidos - lyginant su kelių transportu, transportavimo išlaidos geležinkeliu vidutinio-ilgo nuotolio kelionėse sumažės, o tai praplės Baltijos šalių ir Suomijos užsienio prekybos geografinį mastą ir prekybos rinkas, leidžiant už tą pačią kainą tiekti krovinius į tolimesnes vietas ar iš jų.
- Krovinių gabenimo organizavimas: daugiausiai iš tranzito 57% (pvz., Suomija – maždaug 29%; CIS į/iš Lenkiją, Vokietiją ir likusią Europą – maždaug 31%); importas/eksportas (Baltijos šalys) – 43 % (Estija – 10%, Latvija – 10% ir Lietuva – 23%)
- Skaičiuojama sutaupomo laiko nauda: apie 2,9 milijardų EUR.

Atlikta sąnaudų ir naudos analizė yra tik vienas iš sprendimų priėmimo pagalbinių įrankių iš daugybės eilės studijų, tyrimų, analizių ir ekspertizių, kurie buvo arba dar bus atlikti „Rail Baltica“ projekto įgyvendinimo proceso metu. Taigi, šią sąnaudų ir naudos analizę reikia vertinti kartu ir neatsiejamai nuo kitų esminių projekto dokumentų, tokių kaip projekto ilgalaikis verslo planas, komercializavimo galimybių įvertinimas, infrastruktūros valdymo strategijos analizė, tiekėjų rinkos tyrimai, projekto veiklos planu ir kitais susijusiais svarbiais dokumentais.

3. TRAUKINIŲ EISMO VALDYMO OPTIMIZAVIMO METODAI. GELEŽINKELIO LINIJOS PRALAIIDUMO SKAIČIAVIMAI IR REZULTATŲ PALYGINIMAS

3.1. Geležinkelio ruožo pralaidumo savybėms įtakos turintys veiksniai

Analizuojant kiekybinį visuotinio projekto „Rail Baltica“ investicijų įvertinimą, nustatyta, kad projektas naudos visuomenei požiūriu yra reikalingas. Įgyvendinus projektą išaugs visuomenės gerovė. Prognozuojama, kad 2055 m. keleivių skaičius gali siekti nuo 4,7 iki 7,1 mln, o didžioji dalis kelionių vyktų tarp Baltijos šalių – 6 % visų kelionių vyktų tarp konkrečių stočių, 36 % – tarp trijų Baltijos šalių ir tik 19 % – už Baltijos šalių ribų. Analizę atliko konsultacijų bendrovė „Ernst & Young Baltic“. Prognozuojamas keleivių skaičius, nutiesus „Rail Baltica“ geležinkelį, pateiktas 3.1 paveiksle.

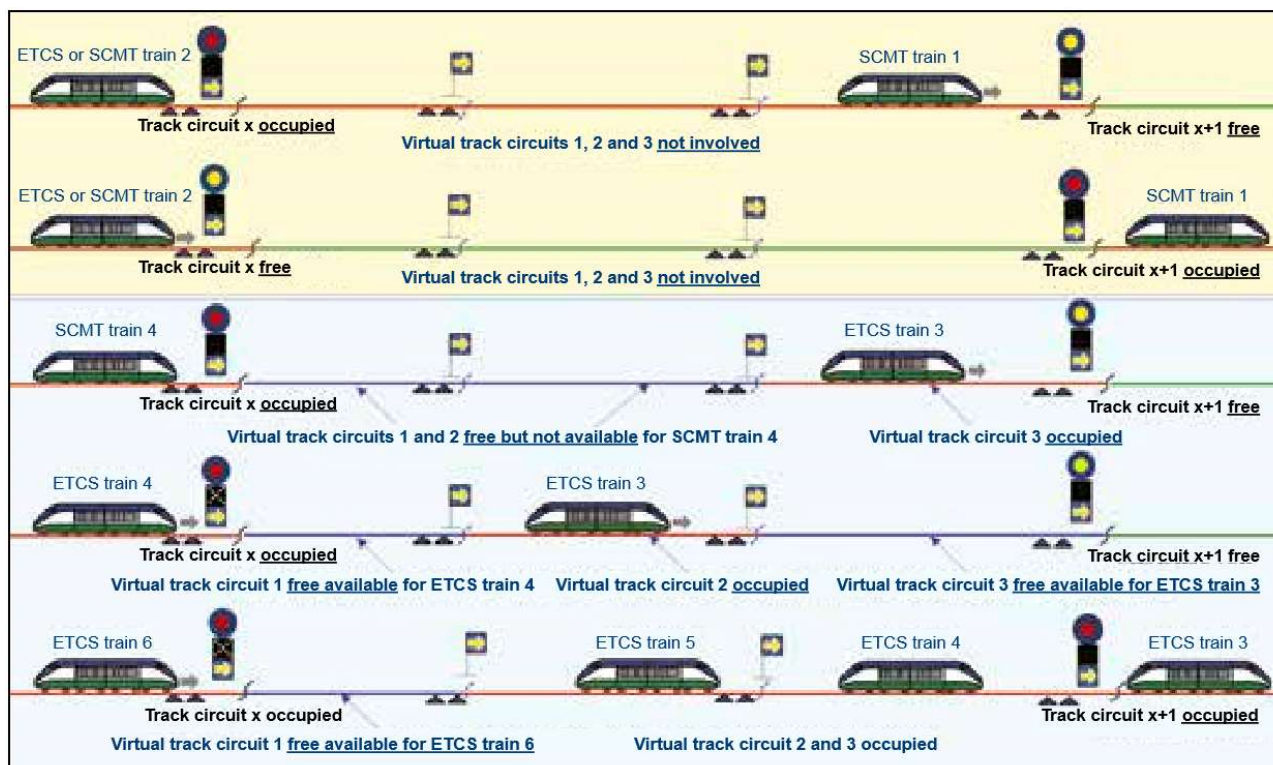


3.1 pav. Prognozuojamas keleivių skaičius (mln) įgyvendinus projektą „Rail Baltica“

Kadangi geležinkelio linijos pralaidumas yra svarbiausias rodiklis, šiame darbe akcentuojama pralaidumo skaičiavimo metodika. Anksčiau naudota skaičiavimo metodika yra pasenusi, todėl rekomenduojama palyginti dvi sistemas ir vėliau atlikti gautų rezultatų ekonominę analizę.

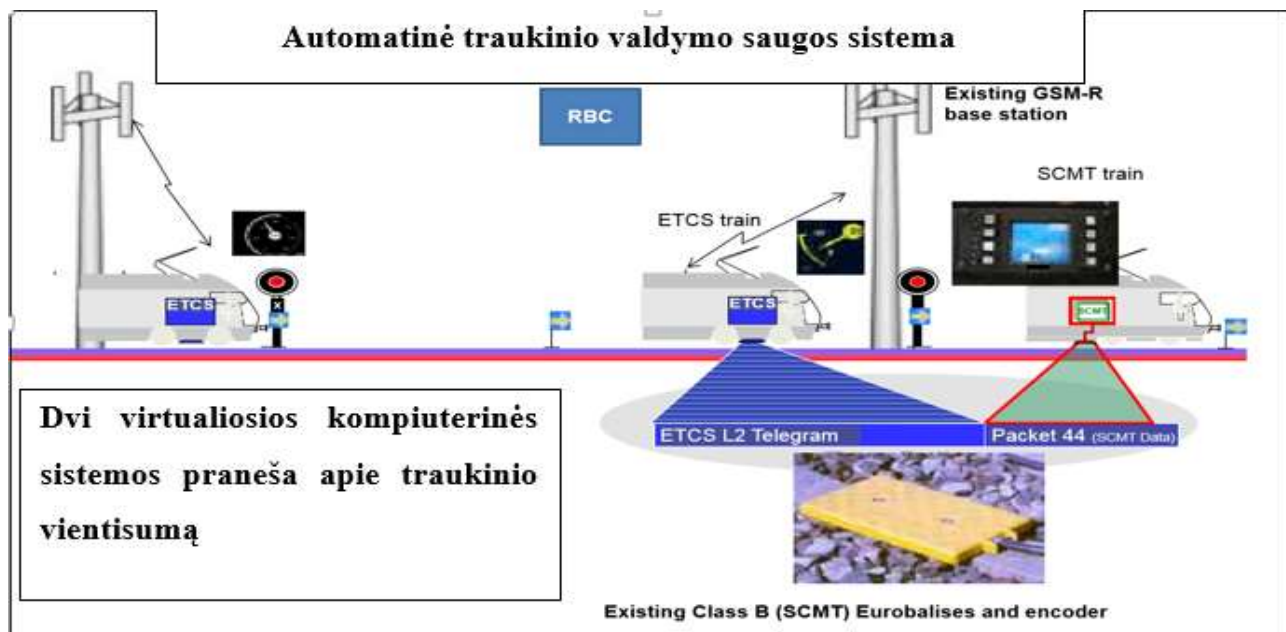
Įrengus naują eismo valdymo sistemą (ERTMS ir susijusias sistemas), traukinių greitį galima padidinti iki 160 km/val. Tokiu būdu bus optimizuojamas ruožų pralaidumas ir traukiniai galės važiuoti didžiausiu leidžiamuoju greičiu. Didžiausią efektą galima pasiekti naudojant ERTMS L3 arba L2 sistemą. Kuo skiriasi skirtingo lygio sistemos? Tradiciniuose geležinkeliuose iki šiol nesurastas būdas, kaip gauti informaciją apie važiuojančio traukinio vientisumą. Trečiojo lygio sistema turėtų atitikti šį reikalavimą. Tačiau informacinės technologijos sparčiai juda į priekį ir

integruojami alternatyvūs variantai, tokie kaip, pvz., virtualiojo bloko naudojimas Italijos geležinkeliuose (RGI 2016). Virtualieji blokai sumažins atstumą tarp traukinių ir padidins geležinkelio linijos pralaidumą. Projektas patvirtintas Europos Komisijos ir bus sėkmingai įgyvendintas 2016–2020 m laikotarpiu. Virtualiųjų blokų schema pateikta 3.2 paveiksle.



3.2 pav. ERTMS L2 virtualiųjų blokų schema (RGI 2016)

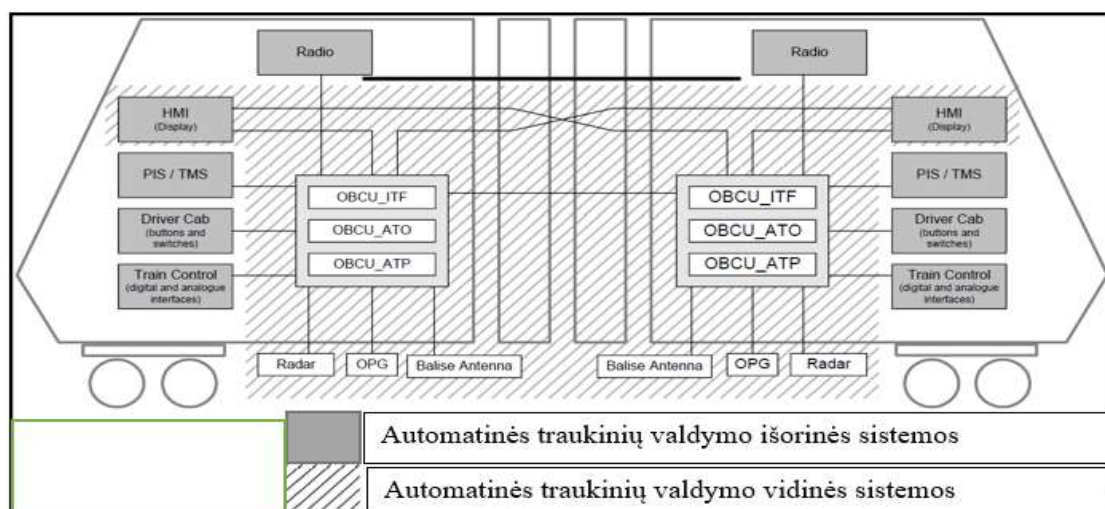
Pokyčių įvyko ir traukinių eismo valdyme. Yra ignoruojamas raudonasis šviesoforo signalas ir kelias padalintas į fiksuotus blokuojamuosius ruožus. Pasiiektas iki 24-ių traukinių per valandą pralaidumas. Traukinio buvimo vietą fiksuoja lauko įrenginiai, skirti perduoti informaciją apie traukinio buvimo vietą, o dvi virtualiosios kompiuterinės sistemos praneša apie traukinio vientisumą. Toks funkcionalumas vis arčiau priartina prie teorinio L3 sistemos lygio. Automatinė traukinio valdymo saugos sistema su mišria operacija pateikta 3.3 paveiksle.



3.3 pav. Automatinė traukinio valdymo saugos sistema (RGI 2016)

Didžiausiam traukinių eismo saugumui užtikrinti ir efektyviai eksploatuoti geležinkelio infrastruktūrą, didinant traukinių pralaidumą, geriausias rezultatas pasiekiamas naudojant kombinuotą sistemą. Daugelis geležinkelių vis dar naudoja bėgių grandines kaip pagrindinį traukinio vietos nustatymo įrenginį, motyvuodami tuo, kad jis atlieka papildomą bėgio vientisumo patikrinimo funkciją. Geležinkelio ruožuose, skirtuose važiuoti tik keleiviniams traukiniams, sėkmingai įdiegta 3 lygio sistema, nes traukinio vietos nustatymo įrenginiai įmontuoti traukinio kabinose. Keleiviniai traukiniai neišformuojami, todėl neprarandama įranga. Prekiniuose traukiniuose, dažniausiai kursuojančiuose trumpais atstumais, ši problema išlieka.

Automatinis traukinių valdymas – viena iš ERTMS posistemių. Programuojamu ATV valdikliu traukinys valdomas be žmogaus įsikišimo. Automatinio traukinių valdymo įrenginių schema pateikta 3.4 paveiksle.



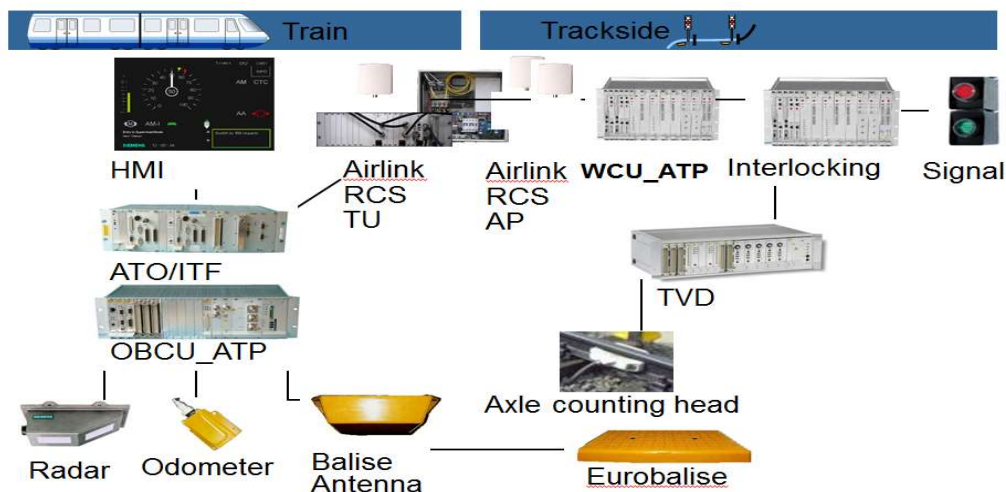
3.4 pav. Automatinio traukinių valdymo įrenginių schema (Siemens 2016)

čia:

- Radio – radijo ryšio sistema;
- HMI – sąsaja žmogus-mašina;
- PIS/TMS – traukinio stebėjimo sistema;
- Driver Cab – mašinisto kabinos stebėjimo sistema;
- Train Control – traukinio valdymo stebėjimo sistema;
- Radar – prietaisas, skirtas nuvažiuotam atstumui matuoti pagal koordinatę;
- OGP – traukinio vientisumos kontrolė;
- Balise Antenna – traukinio jutiklis, kuris skirtas priimti informaciją iš lauko įrenginio, skirtu perduoti informaciją apie traukinio buvimo vietą (*eurobalise*);
- OBCU_ATP – traukinio automatinės saugos modulis;
- OBCU_ATO – traukinio automatinio valdymo modulis;
- OBCU_ITF – traukinio kėbulo įrangos modulis.

ERTMS 3 lygio funkcinuose reikalavimuose yra išdėstyta, kad traukinio vietos ir traukinio vientisumo stebėseną yra atliekami RBC keičiantis informaciją su traukiniu (kuris siunčia pozicijos raportus ir traukinio vientisumo informaciją). Automatiškai valdomo traukinio kabinoje yra įranga, kuri nustato traukinio vientisumą ir siunčia šią informaciją. Lokomotyve esanti įranga kontroliuoja traukinio maršrutų užblokavimą, kelių užimtumą ir laisvumą. Įranga užtikrina, kad traukinys neišvažiuotų už saugos ribų. Pagal traukinio stabdymo modelį, 3 lygio ERTMS apskaičiuoja atsargos (buferinę) zoną ir pagal nustatytą priekyje važiuojančio traukinio buvimo vietą, mažėjant atstumui, tolygiai stabdo. Geležinkelių stoties ribose galima naudoti lauko traukinio vietos nustatymo įrangą.

Lauko ir traukinio automatinės valdymo sistemos, blokuotės ir GSM-R įrangos sąveika pateikta 3.5 paveiksle.

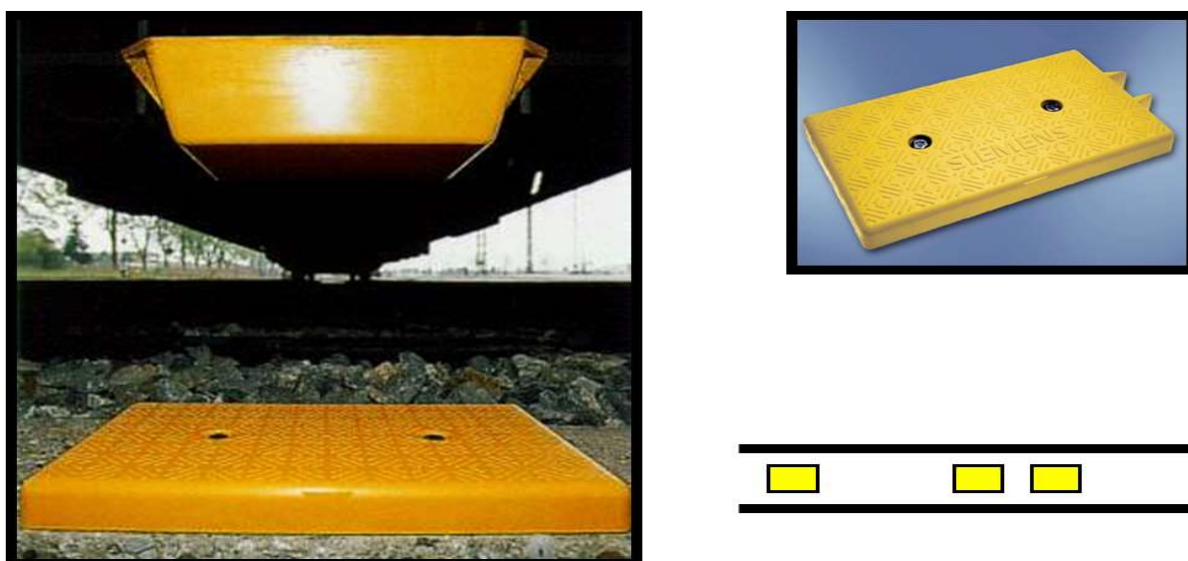


3.5 pav. Automatinės traukinių valdymo sistemos įrenginiai (Siemens 2016)

čia:

- eurobalise – lauko įrenginys, skirtas perduoti informaciją apie traukinio buvimo vietą (dislokaciją);
- balise antenna – traukinio jutiklis, kuris skirtas priimti informaciją iš lauko įrenginio, skirtą perduoti informaciją apie traukinio buvimo vietą (*eurobalise*);
- odometer – prietaisas, kuris skirtas matuoti nuvažiuotam atstumui pagal ratų sukimąsi;
- radar – prietaisas, skirtas nuvažiuotam atstumui matuoti pagal koordinatę;
- OBCU_ATP – traukinio automatinės saugos modulis;
- ATO/ITF – sąsaja tarp traukinio automatinio valdymo ir kėbulo įrangos;
- HMI – sąsaja žmogus-mašina;
- Airlink RCS TU – traukinio automatinio valdymo įranga, kuri perduoda informaciją iš blokuotės (*interlocking*) į mašinisto kabiną per GSM-R sistemą;
- Airlink RCS AP – lauko įrenginiai (pvz., stulpai), kurie skirti perduoti informaciją per GSM-R sistemą;
- WCU_ATP – viena iš sudedamųjų dalių tarp blokuotės ir signalinių GSM-R taškų;
- TVD – bėgių grandinių užimtumo detektorius;
- Axel counting head – traukinio ašių skaitiklis.

Lauko įrenginiai, skirti perduoti informaciją apie traukinio buvimo vietą, išdėstomi pagal geležinkelio ruožo profilį, prie stabdymo punktų. Jų buvimo vieta gali būti keičiama. Traukiniui pravažiavus lauko įrenginį (*eurobalise*), jis perduoda informaciją apie traukinio buvimo vietą. Lauko įrenginio išdėstymas pateiktas 3.6 paveiksle.



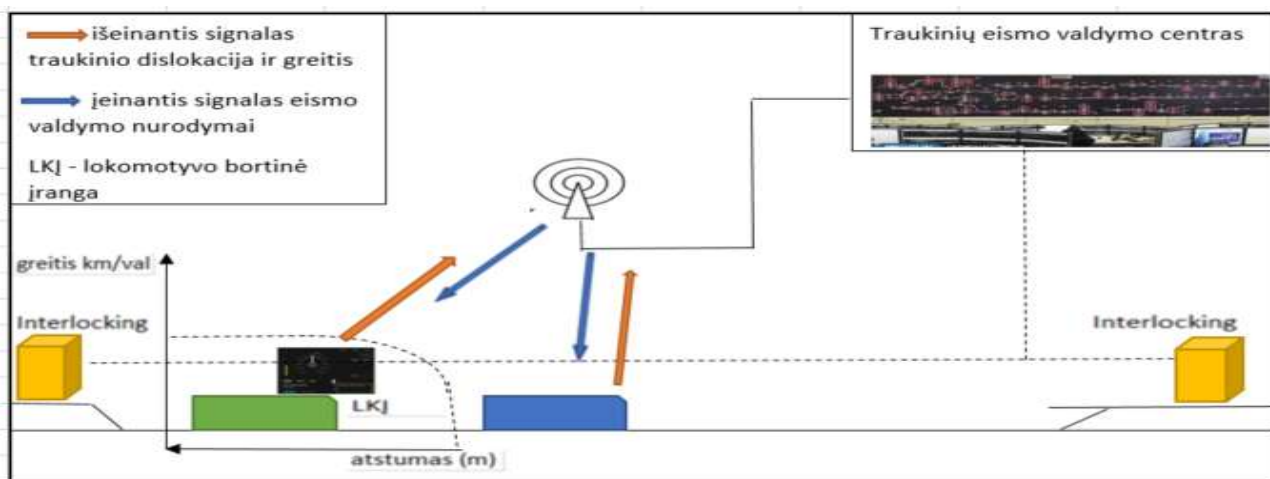
3.6 pav. Lauko įrenginio (*eurobalise*), skirtą perduoti informaciją apie traukinio buvimo vietą, montavimas (Siemens 2016)

3.2. Geležinkelio ruožo pralaidumas, lyginant fiksuoto ir judančio bloko traukinių važiavimus

Geležinkelio ruožo linijos pralaidumo metodika lyginant fiksuoto ir judančio bloko traukinių važiavimus pristatyta, 10-oje tarptautinėje mokslinėje konferencijoje 2017 m. balandžio 27–28 d., Vilniuje (Valentinovič, Sivilevičius 2017).

Pagrindiniai judančio bloko pranašumai yra prisitaikymas prie tam tikro ir reikiamo važiavimo, energijos sąnaudų mažinimas, linijos pralaidumo didinimas ir lauko įrenginių kiekio mažinimas.

Pagrindinė judančio bloko sistemos schema pateikta 3.7 paveiksle.



3.7 pav. Judančio bloko sistemos schema

Šiame darbe akcentuojami judančio bloko pranašumai, skaičiuojant geležinkelio linijos pralaidumą. Teoriškai traukinių pralaidumas skaičiuojamas pagal šias formules:

$$q = \frac{1}{T} = \frac{v}{\delta}, \quad (3.1)$$

$$C = q_{max} = \frac{1}{T_{min}} = \frac{v^*}{\delta_{min}}, \quad (3.2)$$

čia: T – laiko tarpas tarp dviejų traukinių, s; v – traukinių greitis, m/s; v^* – kritinis traukinių greitis, m/s; δ – atstumas tarp dviejų traukinių, m.

$$\delta_{min} = d + L_t + f, \quad (3.3)$$

čia: L_t – traukinio ilgis, m; f – apsauginis ruožas (20 m); d – minimalus leidžiamas atstumas tarp dviejų traukinių, m.

Vieną kartą apskaičiavus δ_{min} , toliau pralaidumą galima skaičiuoti kaip funkciją nuo greičio $q = q(v)$.

Palyginimui reikia apskaičiuoti pralaidumą fiksuotojo ir judančio bloko sistemai.

Kad būtų galima palyginti dvi sistemas, kaip mažiausią leidžiamą atstumą, reikia imti visus blokuojamuosius ruožus iki priekyje važiuojančio traukinio. Skaičiavimai bus aktualūs ir tikslingi,

jei traukiniai važiuos nustatytu greičiu, be apribojimų. Lietuvoje tarpstotyje yra įrengta trifazė automatinė blokuotė, todėl ir atstumas tarp traukinių skaičiuojamas pagal šią formulę:

$$d = 3l_{blok}, \quad (3.4)$$

čia: l_{blok} – vidutinis blokuojamojo ruožo ilgis, m.

Siūlomas naudoti mašinisto reakcijos laikas Q_{min} .

Dabar gaunamas mažiausias atstumas tarp traukinių:

$$\delta_{min} = 3l_{blok} + L_t + f. \quad (3.5)$$

Gaunamas pralaidumas:

$$q = \frac{v}{3l_{blok} + L_t + f}. \quad (3.6)$$

Kadangi mašinisto reakcija turi būti taip pat įvertinta, galutinė pralaidumo formulė:

$$q = \frac{v}{3l_{blok} + L_t + f + Q_{min} \cdot v}. \quad (3.7)$$

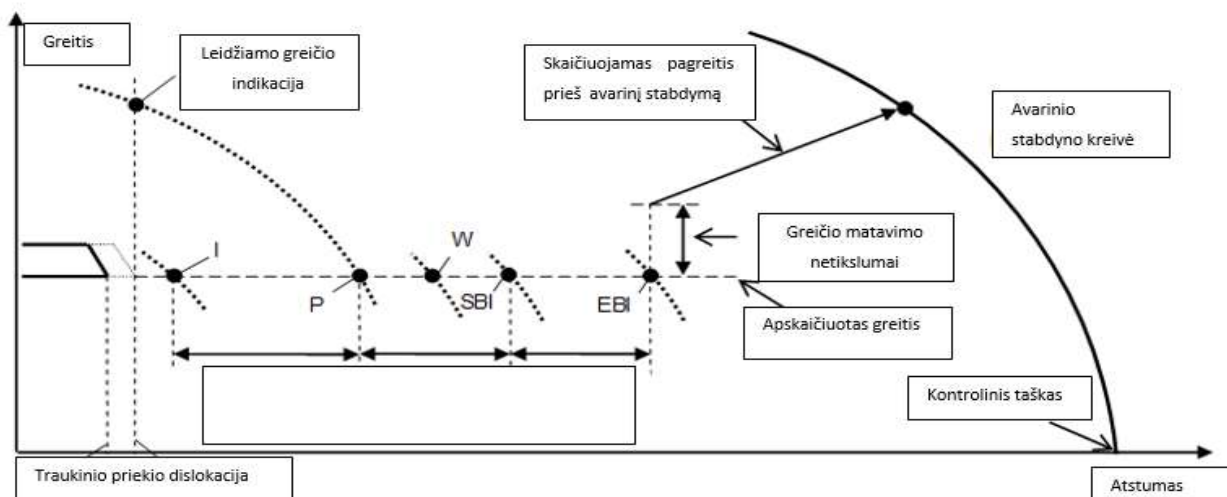
Judančio bloko pralaidumas:

$$q = \frac{v}{k \frac{v^2}{2\gamma} + L_t + f + Q_{min} \cdot v}, \quad (3.8)$$

čia: k – saugos koeficientas, γ – leidžiamo stabdymo kelio ilgis, m.

Traukinių stabdymo kelio skaičiavimai atlikti pagal metodiką, pristatytą Europos geležinkelio agentūroje (European Union Agency for Railways).

Stabdymo kreivė priklauso nuo riedmenų techninės charakteristikos. ETCS automatinė traukinio valdymo įranga turi pranešti mašinistui apie apribojimus. Apribojimai pateikti 3.8 paveiksle.

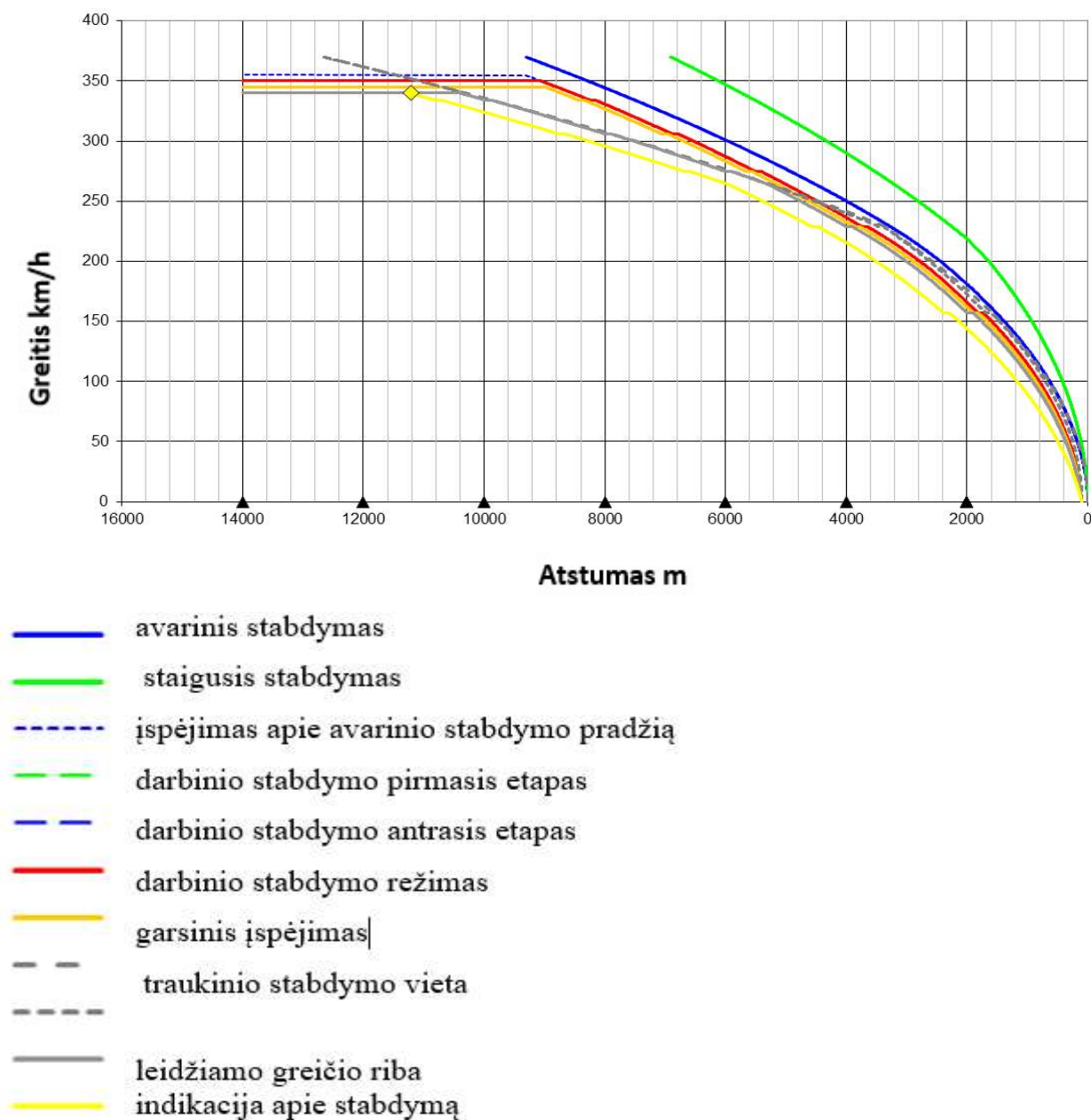


3.8 pav. Informacinių taškų išdėstymas (ERA 2016)

- taškas I – informuoja mašinistą apie tai, kad jis turi pakankamai laiko įjungti eksploatacinį greitį;
- taškas P – informuoja mašinistą apie tai, kad jis viršija greitį ir dar turi laiko įjungti eksploatacinį greitį;

- taškas W – garsiniu signalu informuoja mašinistą apie tai, kad pasiekta riba ir jis turi staigiai stabdyti traukinį;
- taškas SBI – informuoja mašinistą, kad ekstrinis stabdis bus įjungtas automatiškai.

Apskaičiavus atstumus tarp taškų, gauname stabdymo kreivę (žr. 3.9 pav.)

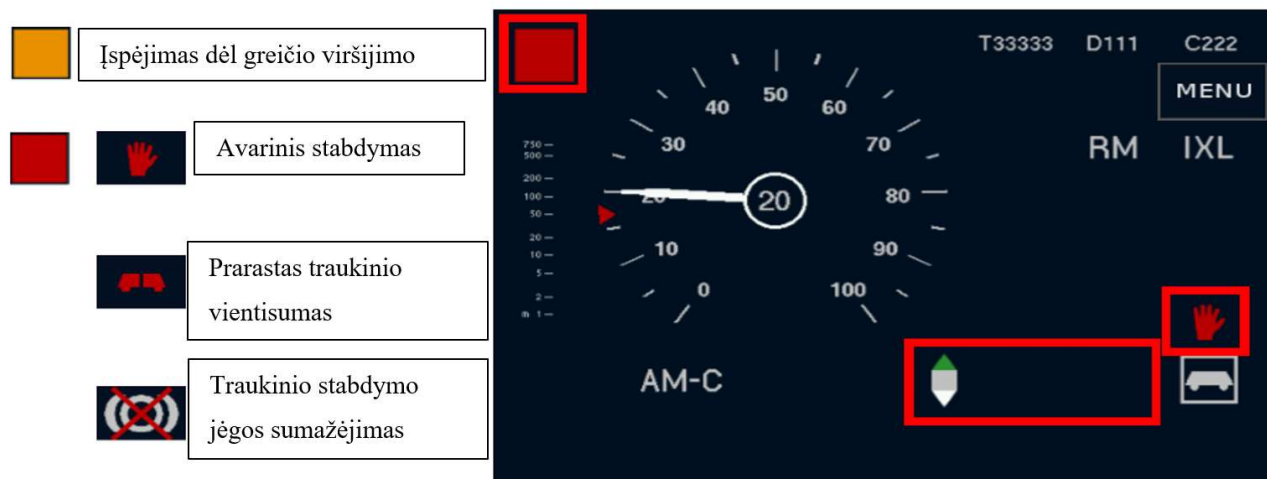


3.9 pav. Informacinių taškų išdėstymo grafikas (ERA 2016)

Automatinė traukinio valdymo įranga nuolat informuoja mašinistą apie leistiną greitį, o valdymo prietaisų rodmenys informuoja apie ekstremalius atvejus.

Valdymo sistemoje yra traukinio greičio apribojimo funkcionalumas. Sistema automatiškai reaguoja į esamą eismo situaciją ir nedelsiant didina, sumažina greitį arba visiškai sustabdo traukinį.

Kai yra viršijamas leidžiamas greitis, sistema įjungia ekstrinį stabdymą ir įsijungia atitinkami valdymo prietaisų rodmenys, kurie pavaizduoti 3.10 paveiksle.



3.10 pav. Traukinio automatinės valdymo įrangos prietaisų rodmenys (Siemens 2016)

3.3. Traukinio masės skaičiavimas

Analizuojant dabartinę traukinio eismo grafiko sudarymo metodiką buvo atkreiptas dėmesys į traukinio masės skaičiavimą. Atliekamas ruožo Gaižiūnai-Jonava skaičiavimas.

Lokomotyvo 2M62M skaičiuojamoji traukos jėga yra 61 000 N, apskaičiuotas greitis $v = 20$ km/val., lokomotyvo masė $m_l = 240$ t.

Apskaičiuojamas lokomotyvo pasipriešinimas ω'_p :

$$\omega'_p = 1,9 + 0,01v + 0,0003v^2 = 1,9 + 0,01 \cdot 20 + 0,0003 \cdot 20^2 \approx 2,22 \text{ N/kN} \quad (3.9)$$

Apskaičiuojamas vagonų pasipriešinimas ω''_p :

$$\omega''_p = 0,7 + \frac{30 + 0,09v + 0,002v^2}{q_a}, \quad (3.10)$$

čia: q_a – apkrova į ašį:

$$\omega''_p = 0,7 + \frac{30 + 0,09v + 0,002v^2}{q_a}, \quad (3.11)$$

čia: q_a – apkrova į ašį, $q_a = 200 \text{ kN/ašiai}$.

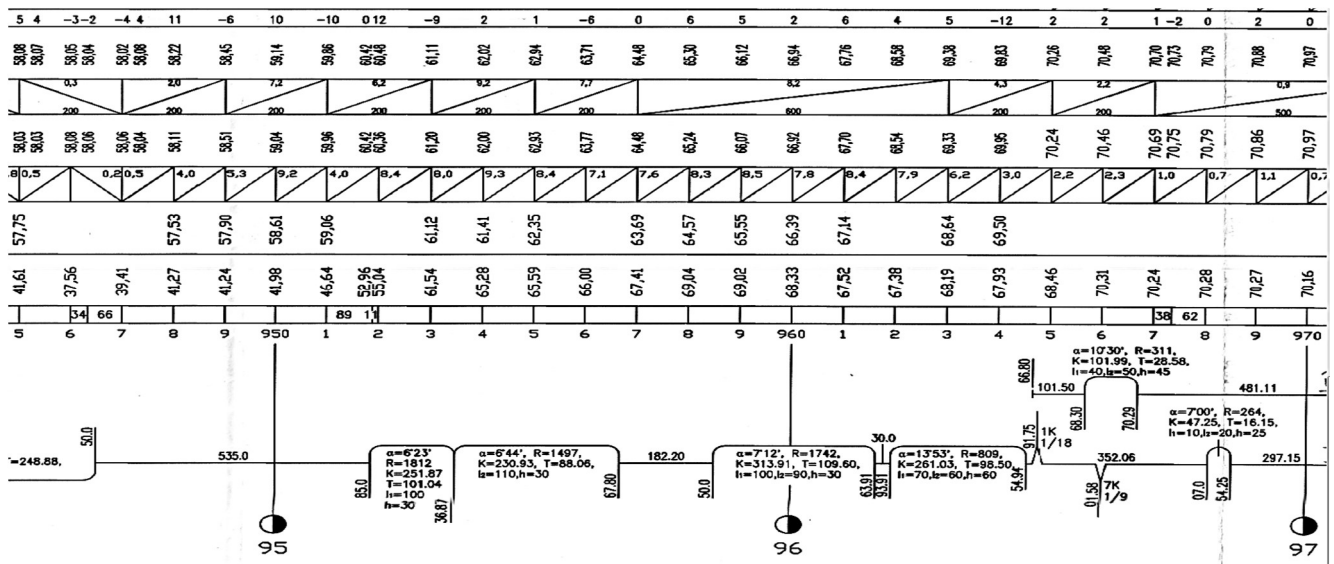
$$\omega''_p = 0,7 + \frac{30 + 0,09 \cdot 20 + 0,002 \cdot 20^2}{200} = 0,86 \text{ N/kN}.$$

Apskaičiuojamas skaičiuojamasis nuolydis. Ruožo Gaižiūnai-Jonava smulkus išilginis profilis pateiktas 3.11 paveiksle.

$$i_{sk} = i'_{sk} + i''_{sk}, \quad (3.12)$$

čia: i'_i - ištisinis išilginis kelio profilis, promilėmis;

i''_i - ištisinis išilginis kelio profilis su papildomu pasipriešinimu (kreivėmis), promilėmis.



3.11 pav. Smulkus išilginis profilis Gaižiūnai-Jonava ruože

Ištininis išilginis kelio profilis:

$$i'_{sk} = \frac{(H_{pr} - H_{pb})}{S}, \quad (3.13)$$

čia: H_{pr} - skaičiuojamojo profilio pradžios taškas; H_{pb} - skaičiuojamojo profilio pabaigos taškas;

S – skaičiuojamojo profilio ilgis, m.

Ištininis išilginis kelio profilis:

$$i'_{sk} = \frac{(69,38 - 62,94)}{800} \cdot 1000 = 8,05 \text{ ‰}$$

Ištininis išilginis kelio profilis su papildomu pasipriešinimu (kreivėmis):

$$i''_{sk} = \frac{700}{l_n} \sum l \frac{S_{kr}}{R_i}, \quad (3.14)$$

čia: l_n – traukinio ilgis, m; S_{kr} – skaičiuojamos kreivės ilgis, m; R_i – kreivės spindulys, m.

$$i''_{sk} = \frac{700}{850} \left(\frac{318}{1497} + \frac{422}{1742} \right) = 0,37 \text{ ‰}$$

Apskaičiuojama didžiausia įkalnė i_i :

$$i_i = 8,05 + 0,37 = 8,42 \text{ ‰}$$

Pagal formulę (2.19) apskaičiuojama sąstato masė Q_c :

$$Q_c = \frac{61000 - 240 \cdot 9,81 \cdot (2,22 + 8,42)}{9,81 \cdot (0,86 + 8,42)} = 6426 \text{ t}$$

Traukinio važiavimo lygtį galima užrašyti taip:

$$\frac{dv}{dt} = \xi(f_k - w_k), \quad (3.15)$$

čia: $\frac{dv}{dt}$ – traukinio pagreitis, m/s^2 ; f_k - visų veikiančių jėgų suma, KN; w_k – pasipriešinimų suma,

KN; ξ – traukinio pagreitis, priklausantis nuo visų veikiančių jėgų, m/s^2 .

Iš apskaičiuotos sąstato masės matyti, kad praktikoje traukinio masė ruože Jonava – Gaižiūnai, turi būti mažesnis (pagal eksperimentinius važiavimus). Vadinas reikia naudoti amortizacijos

koeficientą, kuris kiekvienam šilumvežiui yra skirtingas. Taip pat būtina atsižvelgti į lokomotyvo techninę būklę.

3.4. Analitinis geležinkelio linijos pralaidumas, lyginant fiksuoto ir judančio bloko metodikas

Šio tyrimo tikslas yra analitiškai ištirti fiksuoto ir judančio bloko geležinkelio linijos pralaidumo galimybes. Remiantis gautais rezultatais įrodyti, kad eksploatuojant judančio bloko sistemą, traukinių eismo intensyvumas didesnis. Pateikti išvadas: kokie yra pralaidumo skirtumai ir rezultatai, procentais. Remiantis atliktais skaičiavimais, pateikti pasiūlymus ir rekomendacijas kaip padidinti geležinkelio ruožo pralaidumą.

Riedmenys buvo sumodeliuoti remiantis Europos geležinkelių duomenimis. Riedmenų techninės charakteristikos pateikti 3.1 lentelėje.

3.1 lentelė. Riedmenų techninės charakteristikos

Charakteristikos	Keleiviniai traukiniai	Krovininiai traukiniai
Apkrova	120 t	2000 t
Sukibimo apkrova	73 t	87 t
Ilgis	214 m	600 m
Koeficientas riedančio svorio apskaičiavimui (atsižvelgiant į apkrovą)	1,085	1,07
Maksimalus greitis	160 km/val	120 km/h
Maksimali trauka	200 kN	350 kN
Maksimali akseleracija	1,1 m/s ²	1,0 m/s ²
Maksimalus sulėtinimas	1,0 m/s ²	0.4 m/s ²
Pasipriešinimas	$A + B \cdot v + C \cdot v^2$	
A [kN]	3	29
B [kN/km/h]	0.01	0,25
C [kN/(km/h) ²]	0.0003	0,0043
Traukos galia	2.0 MW	6.4 MW
Stabdymo galia	2.0 MW	6,4 MW
Maksimali rekuperacinė įtampa	29,0 kV	29,0 kV

Siekiant kokybiškai ir tiksliai atlikti skaičiavimus, imami dviejų tipų traukiniai: keleiviniai ir krovininiai. Pagrindinės techninės charakteristikos pateiktos 3.2 ir 3.3 lentelėse.

3.2 lentelė. Keleivinis traukinys

Maksimalus greitis, v (km/val)	160
Masė, m (t)	412
Dinaminė masė, m _d (t)	437
Sulėtinimas, d (m/s ²)	0,8
Traukinio ilgis, Lt(m)	214

3.3 lentelė. Krovininis traukinys

Maksimalus greitis, v (km/val)	95
Masė, m (t)	1000
Dinaminė masė, m _d (t)	1060
Sulėtinimas, d (m/s ²)	0,4
Traukinio ilgis, Lt(m)	600

Skaiciavimai atlikti 50 km ruožui ir imamas 1500 m blokuojamojo ruožo ilgis.

Skaiciavimams naudojama Tipinė šilumvežio traukos charakteristikos schema, pateikta 2.1 sk.

Įsibėgėjimas

Nuo greičio 0 iki didžiausio greičio kiekviename kilometre per valandą.

Pagreičio skaičiavimas pagal formulę:

$$a = \frac{F-D}{m_d}, \quad (3.16)$$

čia: F – traukos jėga, kN; D – pasipriešinimo jėga, kN; m_d – dinaminė masė, t.

Pagreičio laiko intervalo Δt skaičiavimas.

Laikas, per kurį bus pasiektas norimas greitis:

$$t = \sum \Delta t. \quad (3.17)$$

Pasiekto greičio atstumas:

$$S = \frac{V_2 - V_1}{2} \Delta t. \quad (3.18)$$

Važiavimas nustatytu greičiu

Atstumas, kurį traukinys nuvažiuoja nustatytu greičiu:

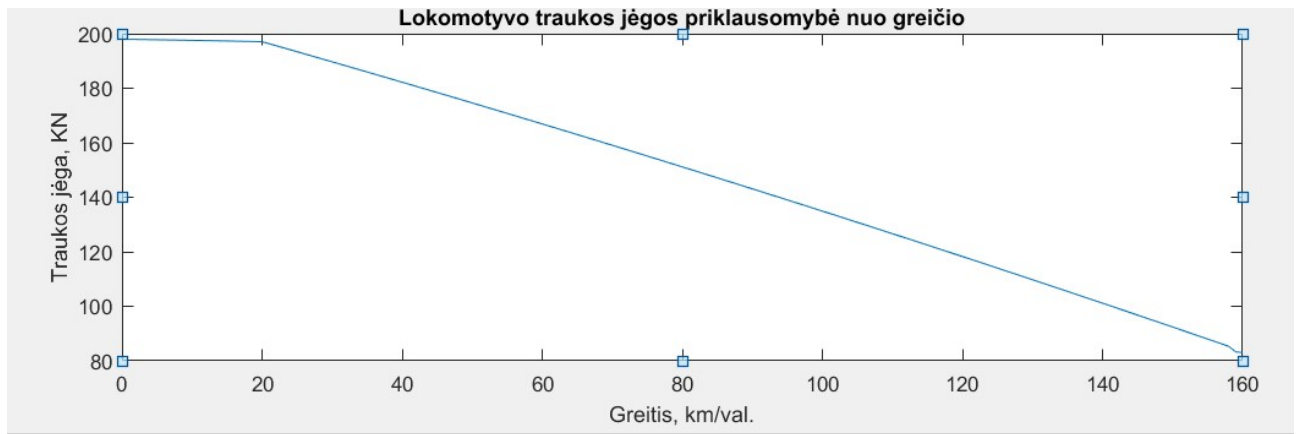
$$S = S_0 + V(t_2 - t_1). \quad (3.19)$$

Sulėtinimas ir stabdymas

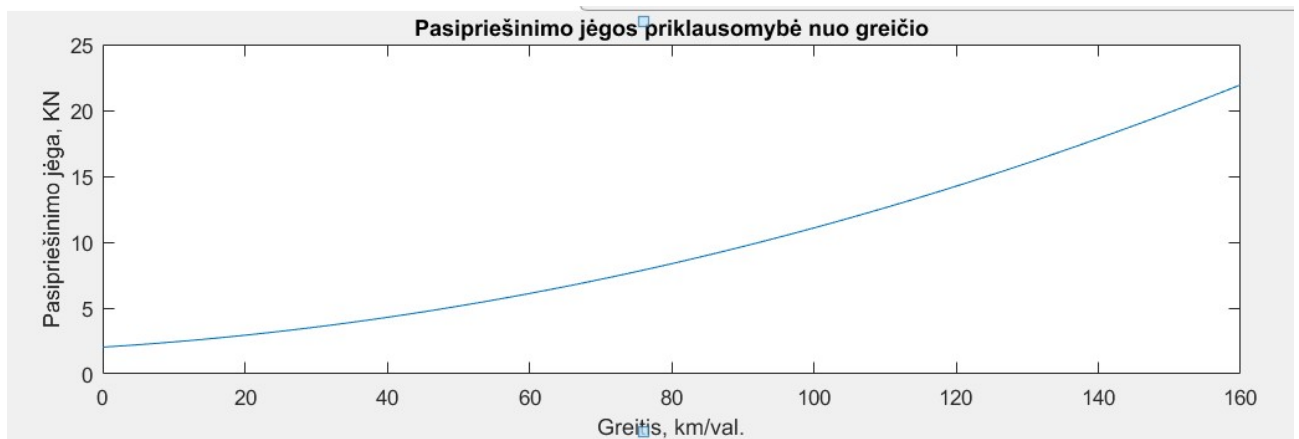
Stabdymo kelio ilgis, skaičiuojamas naudojant stabdymo jėgą.

Pagal supaprastintą traukos charakteristiką skaičiuojame traukos, pasipriešinimo, stabdymo bei begio ir rato sankybio jėgos (žr. 3.12, 3.13, 3.14 pav.)

Skaiciavimai grafiniu būdu pateikti toliau. Skaiciavimo rezultatai pateikti A priede.

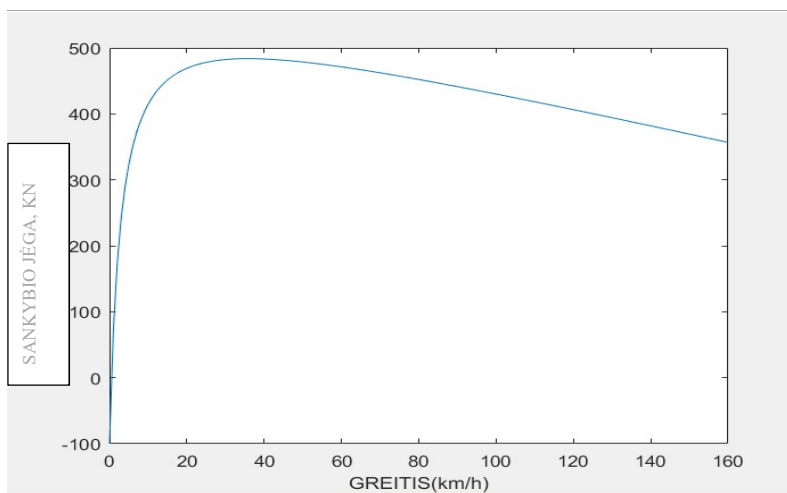


3.12 pav. Lokomotyvo traukos jėgos priklausomybė nuo greičio



3.13 pav. Pasipriešinimo jėgos priklausomybė nuo greičio

Sankybio jėgos dydis turi ribą ir jei jėga, išvystoma varikliu, viršys sankybo jėgą, tai ratai ims buksuoti. Bėgio ir rato sankybio jėgos priklausomybė nuo greičio pateikta 3.14 paveiksle



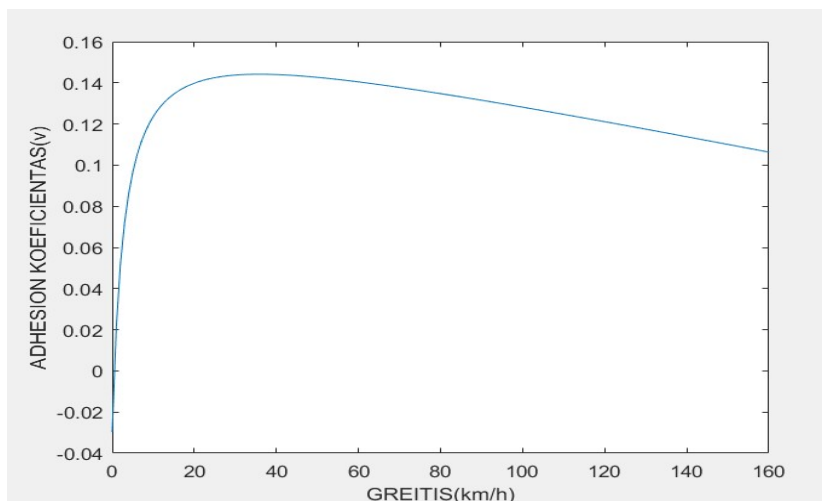
3.14 pav. Bėgio ir rato sankybio jėgos priklausomybė nuo greičio

Rato sankybio (adhezijos) su bėgiais koeficientas skaičiuojamas pagal formulę:

$$\psi = 0,1740 - \frac{0,1875}{100 \cdot 0,0092 + 0,3122 \cdot v} - 0,0004 \cdot v, \quad (3.20)$$

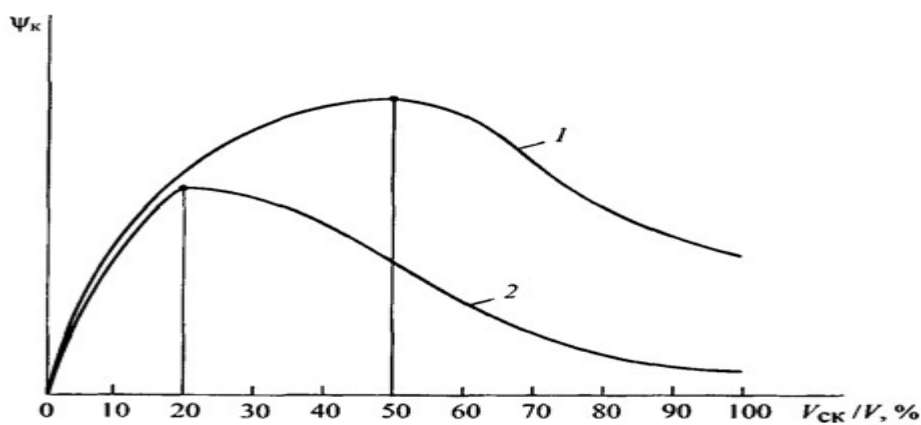
čia: v – traukinio greitis, m/s.

Rato sankybio (adhezijos) su bėgiais koeficiento priklausomybė nuo greičio pateikta 3.15 paveiksle



3.15 pav. Rato sankybio (adhezijos) su bėgiais koeficiento priklausomybė nuo greičio

Traukos jėga pasireiškia ne tik ratams riedant per bėgius, bet ir tuo pačiu metu praslystant. Nustatyta, kad palyginus su traukos režimu stabdymo režime sukibimo koeficientas mažiau priklauso nuo santykinio slydimo greičio (žr. 3.16 pav.). Todėl stabdant traukinį galima leisti didesnę slydimo jėgą.



3.16 pav. Sukibimo koeficiento priklausomybė nuo santykinio slydimo greičio: 1 – stabdymo režimas; 2 – išibėgėjimo (traukos) režimas (Гребенюк 2004).

Santykinis slydimo koeficientas skaičiuojamas pagal formulę:

$$\lambda = \frac{v - \omega \cdot R}{v}, \quad (3.21)$$

čia: v – traukinio greitis, m/s; ω – kampinis greitis, rad/s; R – rato spindulys, m.

Kampinis greitis skaičiuojamas pagal formulę:

$$\omega = 2\pi\vartheta, \quad (3.22)$$

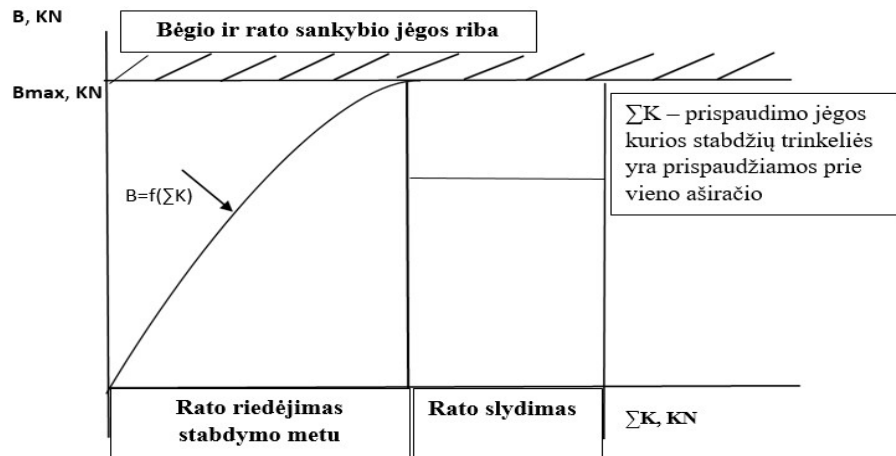
čia: ϑ – dažnis, s⁻¹.

Dažnis skaičiuojamas pagal formulę:

$$\vartheta = \frac{v}{l}, \quad (3.23)$$

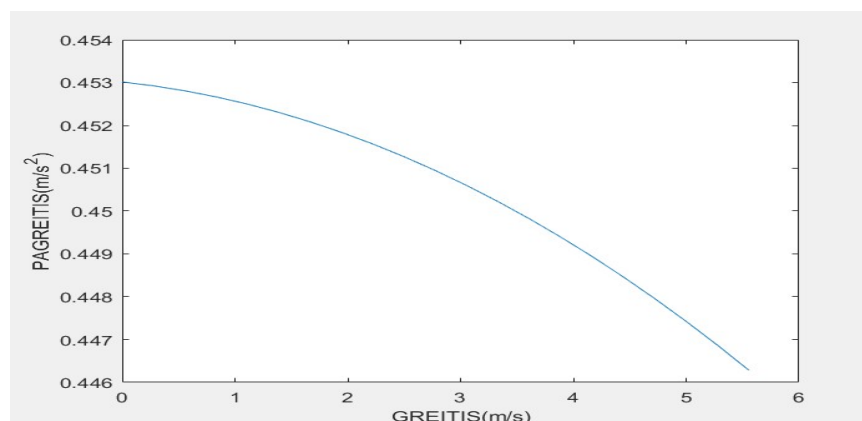
čia: l – rato apskritimo ilgis (πD), m.

Stabdymo metu, jei trinkelės prispaudžiamos prie stabdžių reikia įvertinti rato ir stabdžių disko spindulius. Aširačių praslydimas išvengiamas, apribojant stabdymo jėgą pagal ratų sankybę su bėgiais (žr. 3.17 pav.)

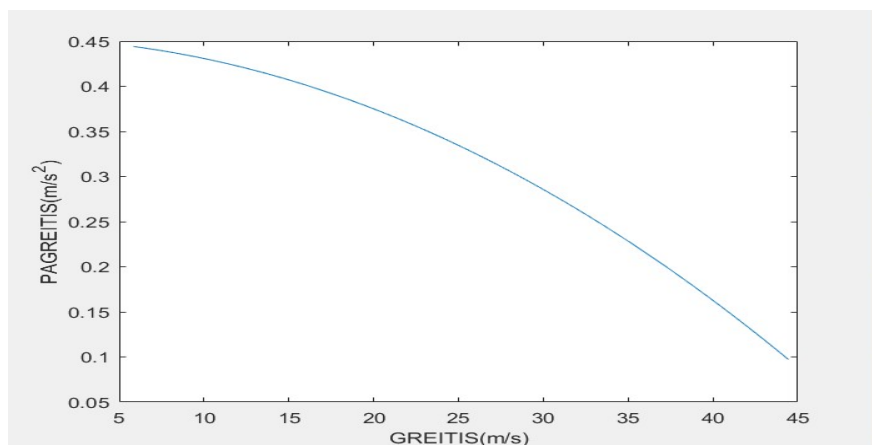


3.17 pav. Stabdymo jėgos kitimas didinant trinkelių prispaudimo jėgas

Taip pat skaičiuojami traukinio pagreičio priklausomybės nuo traukinio greičio (žr 3.18 ir 3.19 pav.).

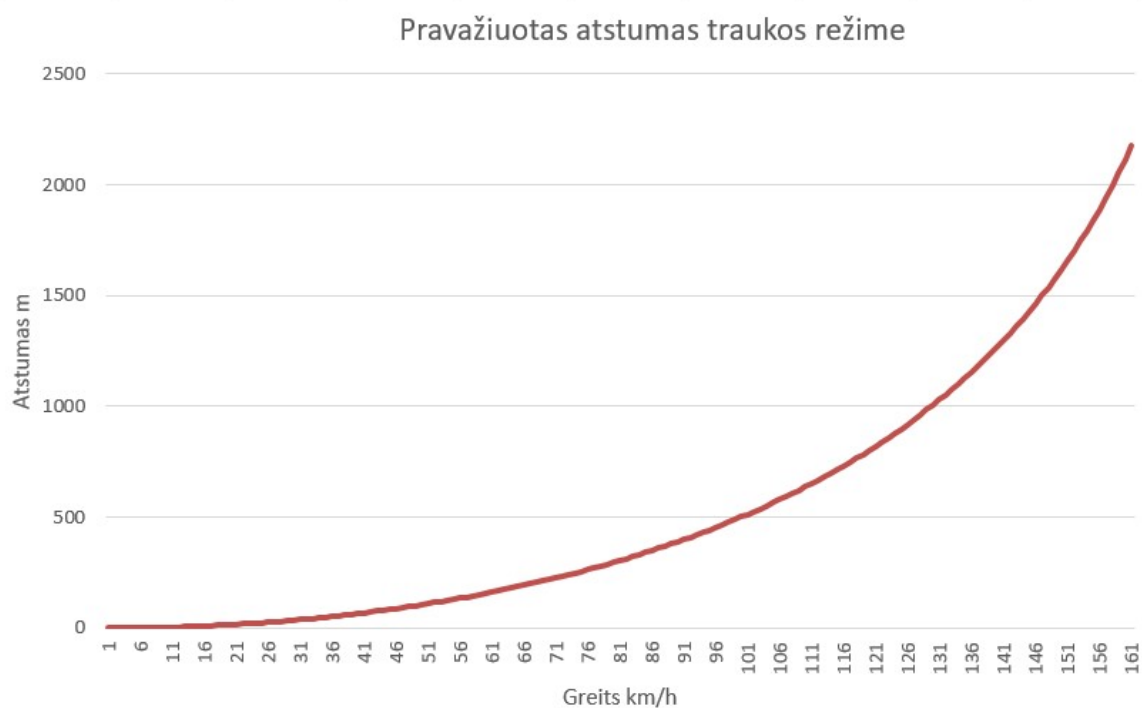


3.18 pav. Traukinio pagreičio grafikas, greitis iki 20 km/val

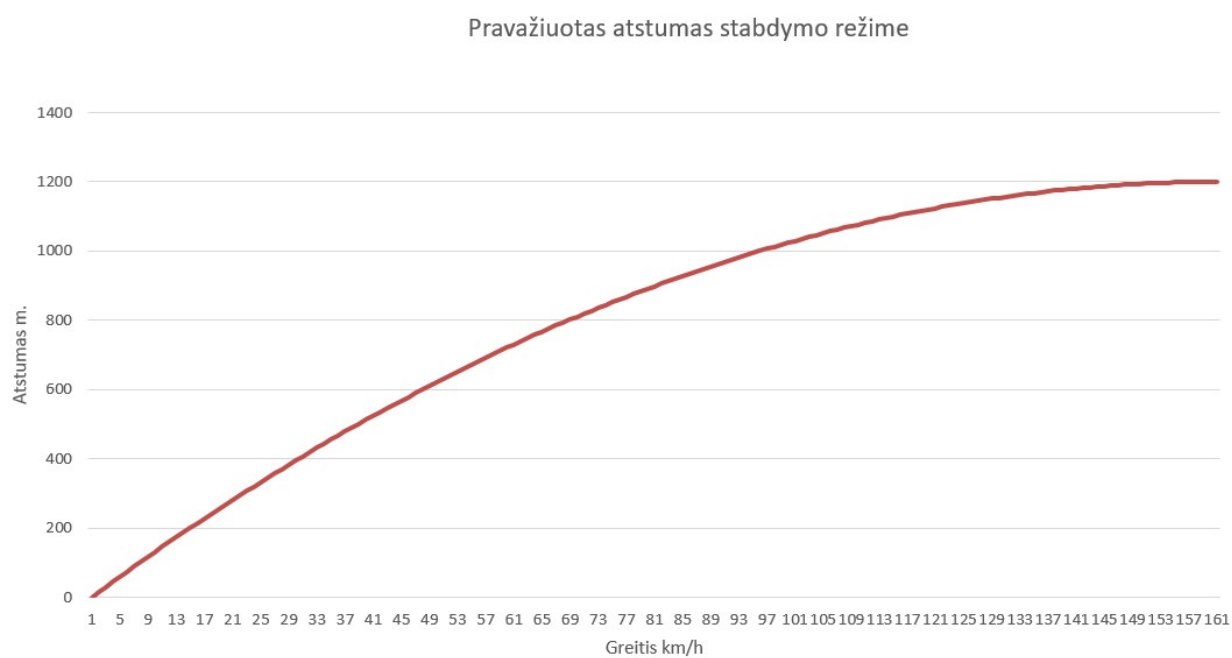


3.19 pav. Traukinio pagreičio grafikas, greitis nuo 20 km/val

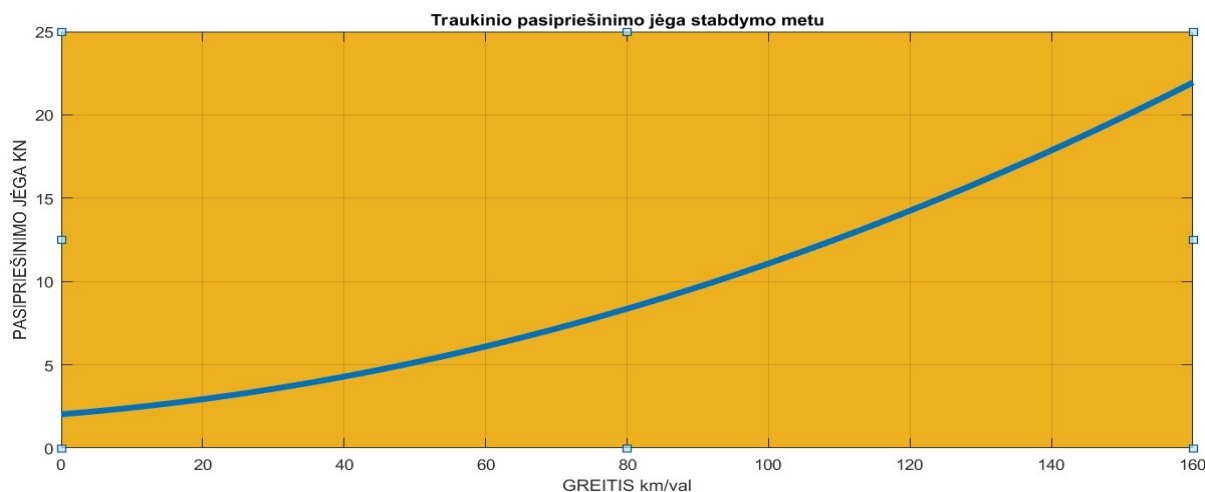
Traukos ir stabdymo režime pravažiuoti atstumai pateikti toliau (žr. 3.20 ir 3.21 pav.)



3.20 pav. Pravažiuotas atstumas traukos režime



3.21 pav. Pravažiuotas atstumas stabdymo režime



3.22 pav. Traukinio pasipriešinimo jėga stabdymo metu

Keleivinio traukinio įsibėgėjimo režimo laikas – 2,643 min.

Keleivinio traukinio įsibėgėjimo režimo pravažiuotas atstumas – 2 km. 175 m.

Keleivinio traukinio stabdymo režimo laikas – 1,15 min.

Keleivinio traukinio stabdymo režimo pravažiuotas atstumas – 1 km. 200 m.

3.4 lentelė. Skaičiavimo rezultatai – keleivinis traukinys

	Laikas (min.)	Atstumas (km)
Traukinio įsibėgėjimo	2.64	2.175
Traukinio važiavimo nustatytu greičiu	17.48	46.625
Traukinio stabdymo	1.15	1.200

Krovininio traukinio įsibėgėjimo režimo laikas – 1,55 min.

Krovininio traukinio įsibėgėjimo režimo pravažiuotas atstumas – 3 km 094 m.

Krovininio traukinio stabdymo režimo laikas – 0,85 min.

Krovininio traukinio stabdymo režimo pravažiuotas atstumas – 585 m.

3.5 lentelė. Skaičiavimo rezultatai – krovininis traukinys

	Laikas (min.)	Atstumas (km)
Traukinio įsibėgėjimo	1.55	3.094
Traukinio važiavimo nustatytu greičiu	29.25	46.321
Traukinio stabdymo	0.85	0.585

Atlikus skaičiavimus gautus rezultatus užrašome į 3.6 ir 3.7 lenteles.

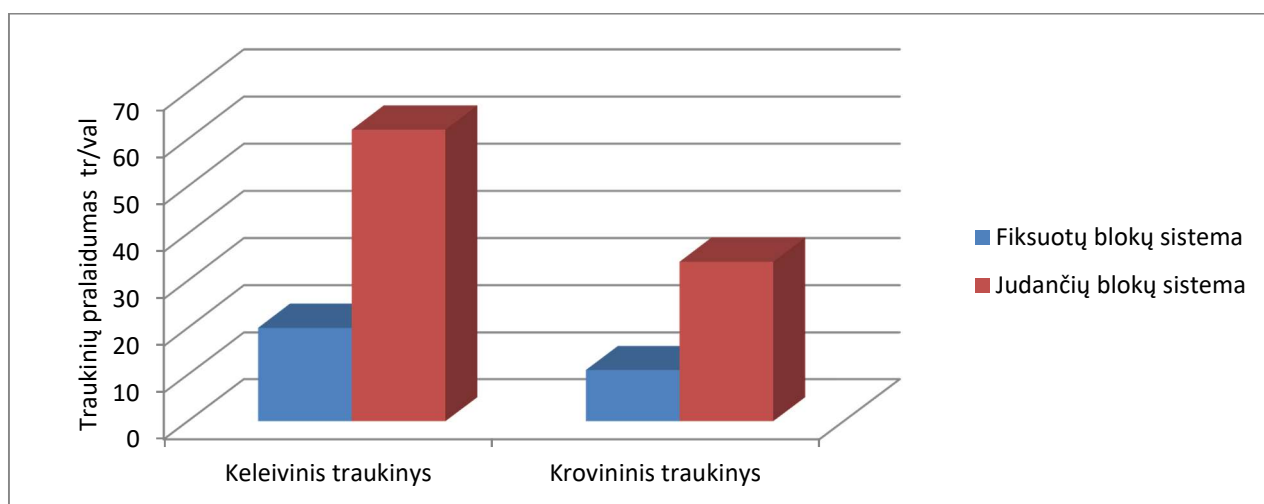
3.6 lentelė. Analitinis rezultatas pagal fiksuoto bloko skaičiavimus

Traukinio tipas	Maksimalus greitis, v (km/val)	Pralaidumas (tr/val)
Keleivinis traukinys	160	20
Krovininis traukinys	95	11

3.7 lentelė. Analitinis rezultatas pagal judančio bloko skaičiavimus

Traukinio tipas	Maksimalus greitis, v (km/val)	Pralaidumas (tr/val)
Keleivinis traukinys	160	62
Krovininis traukinys	95	34

Analitinių rezultatų palyginimai pateikti 3.23 paveiksle



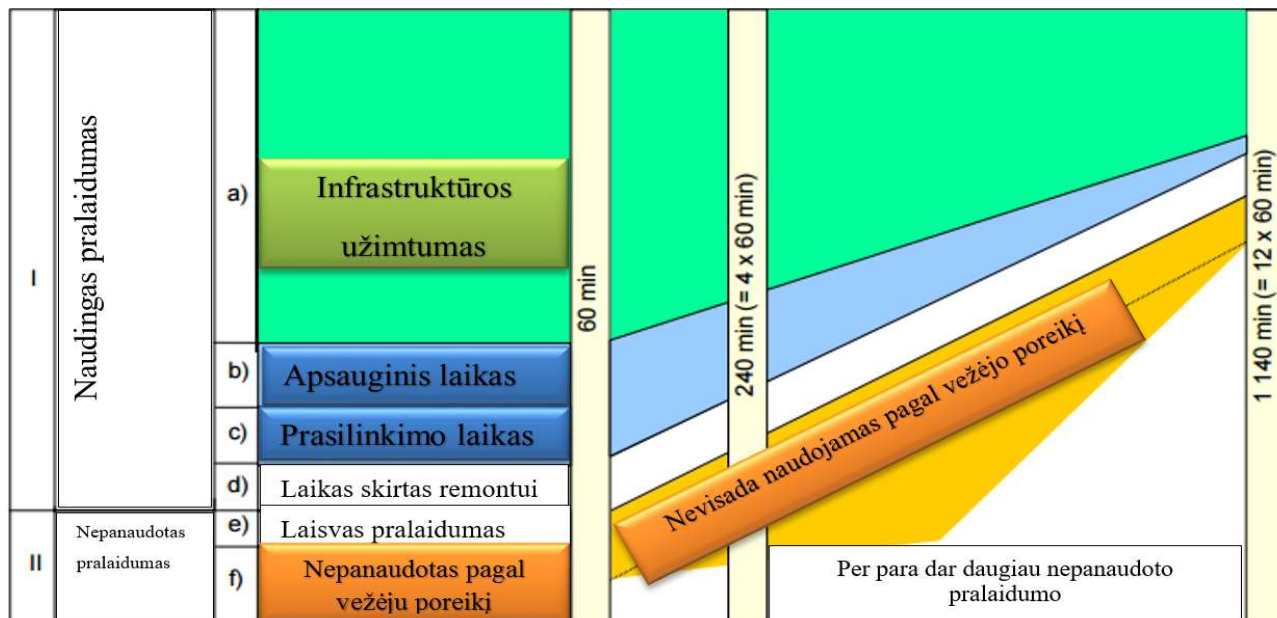
3.23 pav. Geležinkelio linijos pralaidumo analitinio skaičiavimo rezultatai

3.4. Eksperimentiniai geležinkelio ruožo pralaidumo tyrimai

Tyrimo tikslas yra ištirti skirtingo pločio geležinkelio ruožų pralaidumo metodų skirtumą. Po to naudojant gautus rezultatus įrodyti, kad europietiško pločio metodai efektyvūs ir naudojant pateiktą metodiką galima pasiekti geresnių rezultatų didinant geležinkelio ruožo pralaidumą. Taip pat remiantis atliktais tyrimais pateikti pasiūlymų, susijusių su naujos metodikos diegimu. Lyginamosios analizės atlikimas galimas tik tuomet, kai yra išsamiai suprastas kiekvienas atskiras metodas. Būtent dėl šios priežasties tyrimai atlikti realiai veikiančioje gamyboje laboratorijoje. Pirmasis eksperimentas buvo atliktas Vilniaus Eismo valdymo centre, antrasis – Vokietijos Stuttgart 21 geležinkelio linijoje DB su Netz AG bandymo įranga. Vilniaus Eismo valdymo centro laboratorijoje buvo atliktas eksperimentas ir iki maksimalios ribos padidintas geležinkelio ruožo Jiesia–Mauručiai pralaidumas pagal europinį UIC 406 ir CUI grafiko sutankinimo metodą.

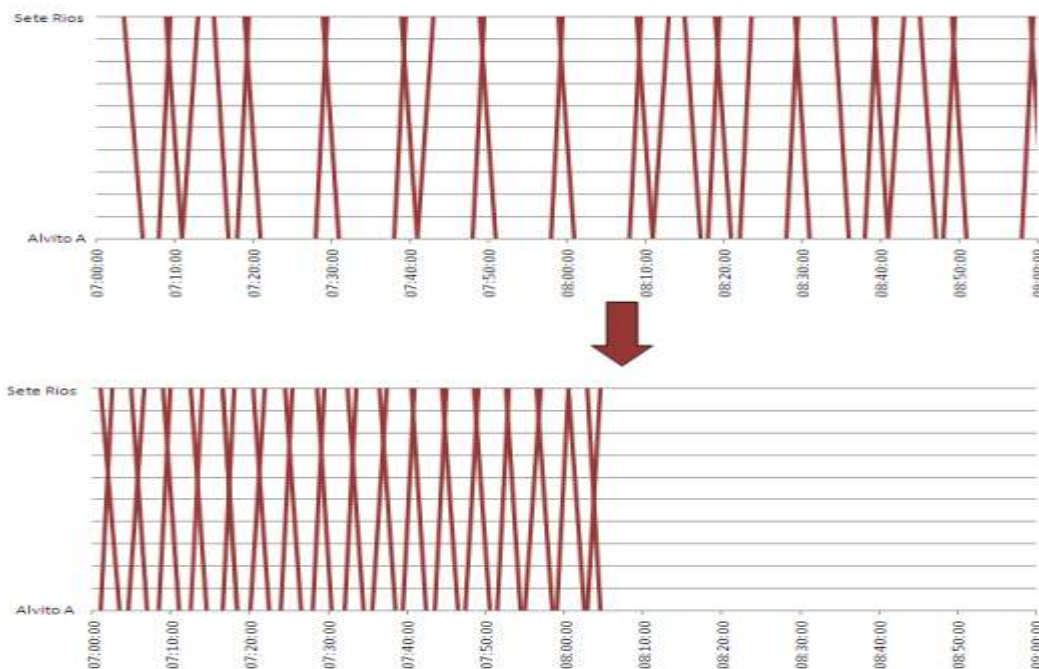
UIC 406 metodo aprašymas

UIC 406 metodas skirtas traukinio eismo grafikui sutankinti. Traukinio važiavimo linijos stumiamos iki minimalaus laiko tarpo tarp traukinių. Saugos laikas sumažinamas iki leidžiamo minimumo. Metodas plačiai taikomas Europos geležinkeliuose. Geležinkelio linijos pralaidumo skaičiavimas pagal UIC 406 metodą pateiktas 3.24 paveiksle



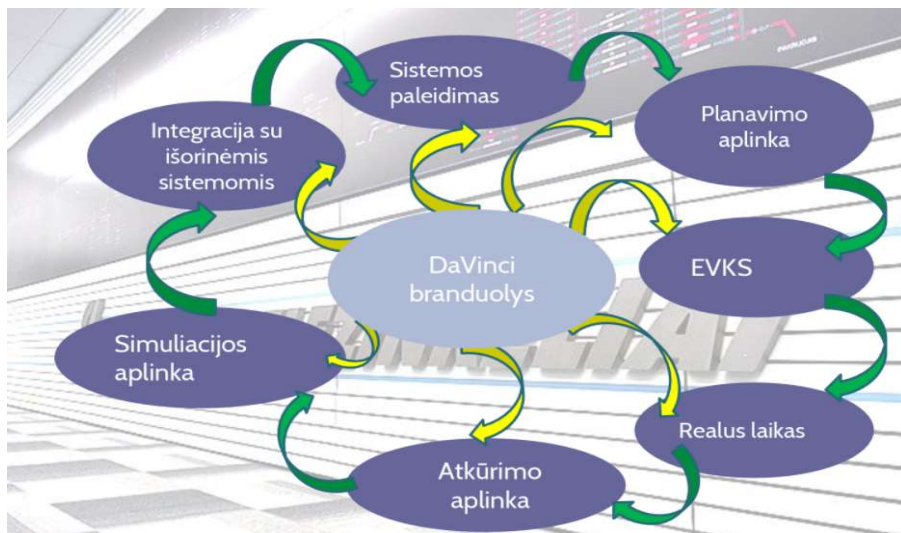
3.24 pav. Geležinkelio linijos pralaidumo skaičiavimas pagal UIC 406 metodą (Stock 2008)

Traukinio eismo grafiko sutankinimo pavyzdys pateiktas 3.25 paveiksle. UIC 406 metodas įgyvendintas Portugalijos geležinkeliuose Sete Rios–Alvito ruože.



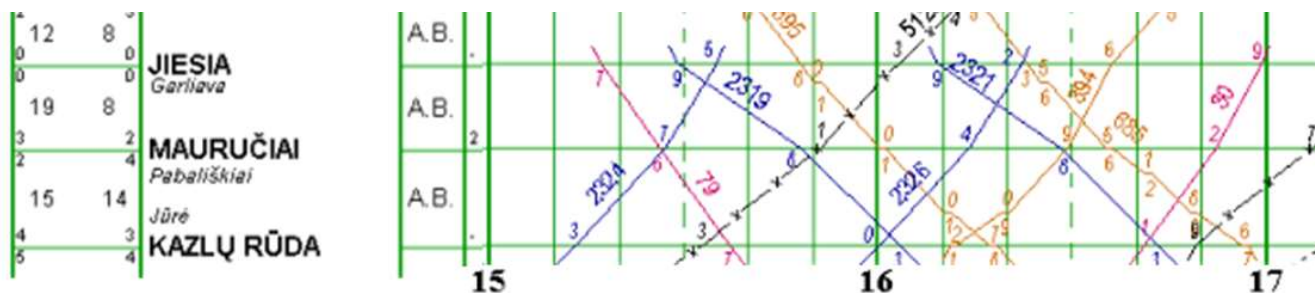
3.25 pav. Traukinių eismo grafiko sutankinimas Portugalijos geležinkeliuose Sete Rios–Alvito ruože (Stock 2008)

Į galiojantį tvarkaraštį buvo įterpti du nauji traukiniai. Naudojant planavimo modulio sistemą, saugos laikas sumažintas iki leidžiamos ribos. Sistema informuoja planuotoją apie riziką eismo saugumui, todėl šis metodas galioja praktikoje ir vykdomas užtikrinant traukinių eismo saugą. 3.26 paveiksle pateikti sistemos moduliai. Pirmasis etapas – planavimo aplinkoje inžinierius planuotojas sudaro naują traukinių eismo grafiką, po to traukinių eismo grafikas perkeliamas į traukinių eismo tvarkdaryų valdymo sistemą, trečiame etape traukinių eismo grafikas naudojamas valdant eismą realiuoju laiku ir jau po kiekvieną žingsnį galima atkurti ir peržiūrėti. Atkūrimo aplinka reikalinga analizuojant įvykius ir avarinių situacijų atsiradimą.



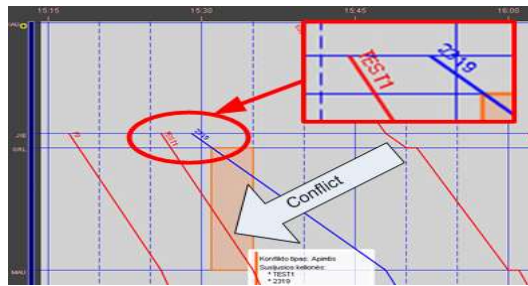
3.26 pav. Sistemos DaVinci moduliai

Eksperimentas atliktas geležinkelio ruože Jiesia–Kazlų Rūda. Laiko tarpas nuo 15 iki 17 valandos. Galiojantis tvarkaraštis pateiktas 3.27 paveiksle



3.27 pav. Galiojantis tvarkaraštis

Kadangi eksperimento tikslas – į galiojantį tvarkaraštį įterpti du naujus traukinius, pirmajame etape numatomas naujų traukinių išvykimo laikas. Traukinys važiuos iškart po tarptautinio traukinio Nr. 79, jo važiavimo laikas pro Jiesios stotį 15 val. 25 min. Kitas traukinys Nr. 2319 pravažiuos pro Jiesios stotį 15 val. 29 min. Planavimo modulio sistema skaičiuoja tarpstočio Jiesia–Mauručiai važiavimo laiką 9 min. 140 km/val. greičiu. Bet sistemoje aptiktas įspėjimas, kuris reikalauja traukinio važiavimo intervalo redagavimo. Įspėjimo atsiradimas pateiktas 3.28 paveiksle



3.28 pav. Traukinio važiavimo intervalo redagavimo reikalavimas

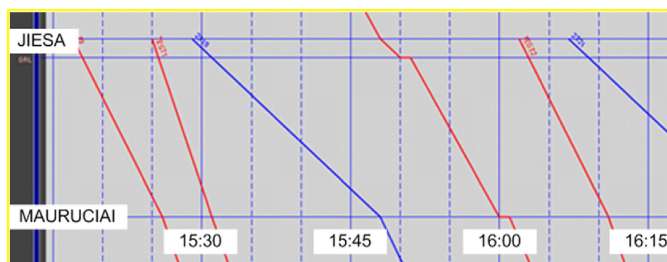
Pagal sistemos skaičiavimus mažiausias laiko tarpas tarp traukinių tarpstotyje Jiesia–Mauručiai 4 min. 41 sek. Vadinas, šį laiką galima sumažinti nuo 7 min. iki 5 min. Koregavimo procedūros pateikta 3.29 ir 3.30 paveiksluose.

Tvarkaraštis Kelionė: Kelionė 1										
Identifikacija					Apskaičiuoti laikai			Priimti laikai		
Tipas	Traukinio numeris	Mazgo kodas	Mazgas	Distancija (km)	Mažiausias laikas	Bazinis laikas	UIC	Laiko tipas	Maršruto/keleivinis sustojimas	Techninis sustojimas
	TEST1	12311	Jiesia							00:00
				109	04:41	06:21		07:00	07:00	
		12320	Mauručiai							
				176	07:33	09:43		10:00	10:00	
		12340	Kazlų Rūda							

3.29 pav. Eksperimentinio traukinio „Test 1“ važiavimo laikas pagal tvarkaraštį

Tvarkaraštis Kelionė: Kelionė 1										
Identifikacija					Apskaičiuoti laikai			Priimti laikai		
Tipas	Traukinio numeris	Mazgo kodas	Mazgas	Distancija (km)	Mažiausias laikas	Bazinis laikas	UIC	Laiko tipas	Maršruto/keleivinis sustojimas	Techninis sustojimas
	TEST1	12311	Jiesia							00:00
				109	04:41	06:21		07:00	05:00	
		12320	Mauručiai							
				176	07:33	09:43		10:00	10:00	
		12340	Kazlų Rūda							

3.30 pav. Eksperimentinio traukinio „Test 1“ važiavimo laikas tarpstotyje sumažintas iki 5 min. Taip pat atliekamas kito eksperimentinio traukinio „Test 2“ įterpimas. Rezultatas ir traukinių eismo grafiko tankinimas pateiktas 3.31 paveiksle



3.31 pav. Eksperimentinių traukinių įterpimas, traukinių eismo grafiko tankinimas
Rezultatus surašome į 3.9 lentelę. 3.8 lentelėje pateiktas galiojantis tvarkaraštis.

3.8 lentelė. Galiojantis tvarkaraštis

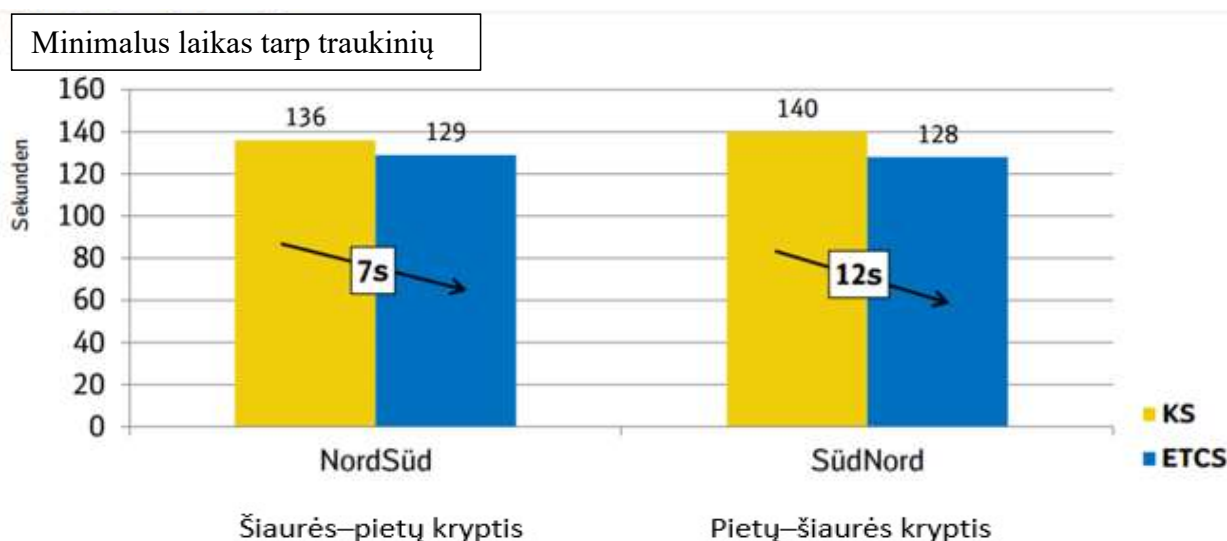
Stotis	Tr. Nr.	Tr. Nr.	Tr.Nr	Tr. Nr.	Tr. Nr.
	79	2319	695	2321	685
Jiesia	15.17	15.29	15.48	16.09	16.23
Mauručiai	15.26	15.48	16.01	16.28	16.35

3.9 lentelė. Tvarkaraštis pagal sutankintą traukinių eismo grafiką

Stotis	Tr. Nr.	Papildomas traukinys	Tr. Nr.	Tr.Nr.	Papildomas traukinys	Tr. Nr.	Tr. Nr.
	79	Test 1	2319	695	Test 2	2321	685
Jiesia	15.17	15.24	15.29	15.48	16.04	16.09	16.23
Mauručiai	15.26	15.32	15.48	16.01	16.12	16.28	16.35

Vokietijos Stuttgart 21 geležinkelio linijoje DB Netz AG bandymo įrangoje buvo atlikti laboratoriniai eksperimentai ir rezultatai pateikti 3.32 paveiksle. Geležinkelio ruožo pralaidumas padidintas 5.3 % ir 9.3 %. Palyginus su dabartine sistema Lietuvoje, geležinkelio ruožo pralaidumas Vokietijos Stuttgart 21 geležinkelio linijoje beveik dvigubai didesnis. Tarp tarpstotyje važiuojančių traukinių laiko tarpas:

- Lietuvoje – 220 s;
- Vokietijoje – 136 s.



3.32 pav. Laboratorinių eksperimentų rezultatai (NETZE 2016)

Minimalus atstumas tarp šviesoforu 400 m ir tarp virtualaus ETCS signalu – 30 m. Sistema tik projektuojama ir įdiegimo darbai prasidės 2018 m.

Laboratorinių eksperimentų rezultatus užrašome į 3.10 lentelę

3.10 lentelė. Laboratorinių eksperimentų rezultatai

Sistema	Šiaurės–pietų kryptis			Pietų–šiaurės kryptis		
	Minimalus laiko tarpas tarp važiuojančių traukinių, s	Teoretiškas pralaidumas, tr/val.	Pralaidumo skirtumas, %	Minimalus laiko tarpas tarp važiuojančių traukinių, s	Teoretiškas pralaidumas, tr/val.	Pralaidumo skirtumas, %
KS	136	26.5		140	25.7	
ETCS	129	27.9	+5,3	128	28.1	+9,3

ETCS turi kontroliuoti visų traukinių eismą pagal interlokingų sistemose nustatytus maršrutus bei užtikrinti sklandų ir saugų visų sistemų savitarpio veikimą. Taip pat įrengta ETCS sistema turės būti sertifikuota.

Ataskaitoje apie traukinio buvimo vietą iš bortinės įrangos į RBC turi būti siunčiama:

- atstumas tarp LRBG ir numanomos traukinio priekio pozicijos;
- patikimumo intervalas šio atstumo atžvilgiu, kaip maksimalus saugus priekio atstumas (priklausomai nuo traukinio krypties, ši padėtis turi būti prieš numanomą poziciją);
- patikimumo intervalas šio atstumo atžvilgiu, kaip minimalus saugus priekio atstumas (priklausomai nuo traukinio krypties, ši padėtis turi būti už numanomos pozicijos);
- LRBG identifikavimo informacija;
- traukinio važiavimo kryptis LRBG atžvilgiu;
- traukinio ilgis;
- traukinio greitis;
- einamasis ETCS režimas ir taikymo lygmuo;
- RBC identifikavimo informacija ir RBC GSM numeris.

„Patikimumo intervalas“ turi būti nustatomas pagal šiuos parametrus:

- Atsižvelgiant į kelio įrangą – balisės vietos tikslumas
- Atsižvelgiant į riedmenų įrangą – ridos skaičiavimo įrenginio (odometro) tikslumas.

Traukinio buvimo vietą, nustatančios BG įrengimo taisyklės turės įrodyti, kad numatoma traukinio buvimo vieta, įskaitant patikimumo intervalą, bus tokia, kad:

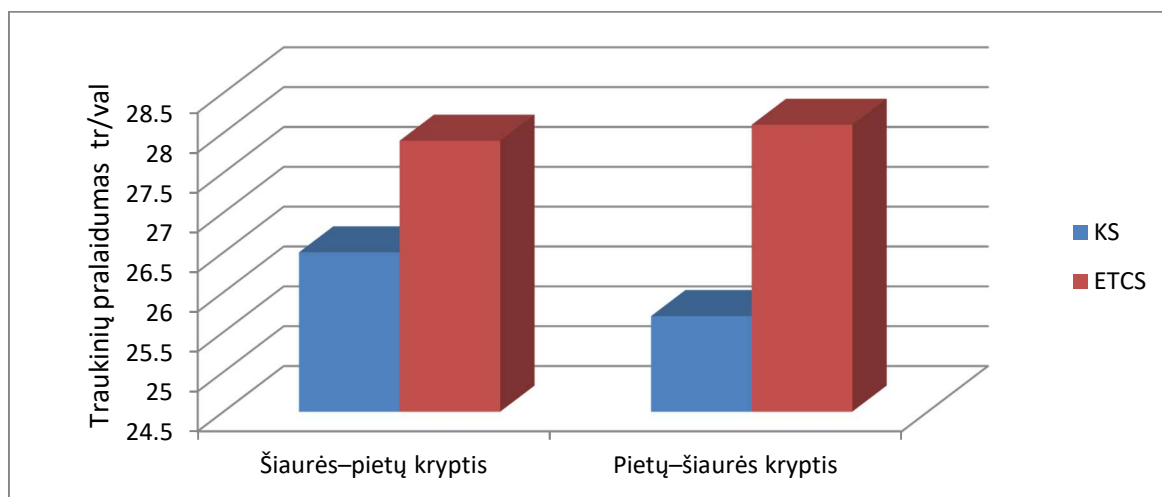
- Traukinio buvimo vietos nustatymo tikslumas garantuos saugų traukinių eismą;
- Traukinio padėties tikslumas atitiks susietą informaciją;
- Traukinio buvimo vietos tikslumas atitiks traukinio važiavimo apribojimus.

Visą kelio įrangos perduodamą su traukinio buvimo vieta susijusią informaciją naudos lokomotyvo įranga, atsižvelgdama į traukinio buvimo vietos patikimumo intervalą. Traukinio buvimo vietos tikslumas turės būti pritaikytas atsižvelgiant į kelio charakteristikas. Traukinio buvimo vietos tikslumas yra kritiškai svarbus sustojimo vietų priartėjimo ruožuose. BG išdėstymas kelyje turi būti ribotas taip, kad traukinio buvimo vietos patikimumo intervalas būtų didesnis, tačiau tuo pat metu atitiktų traukinio važiavimo apribojimus.

Interlokingo sistema į RBC turi pateikti saugius duomenis apie šios objektus:

- traukinio mašinisto ir manevrų maršruto būseną;
- kelio užimtumo būseną;
- maršruto konfigūracijos valdomi greičio apribojimai;
- tvarkdarių valdomi greičio apribojimai;
- greičio apribojimai, atsirandantys dėl pagalbinių aptikimo sistemų būsenos;
- maršruto konfigūracijos valdomi avariniai stabdymai;
- tvarkdarių valdomi avariniai stabdymai;
- avariniai stabdymai, atsirandantis dėl pagalbinių sistemų būsenos;
- techninės priežiūros tikslais realizuojama apsauga;
- įtampos tiekimas į prieš traukinį esančius elektrifikuotus ruožus;
- bet kokie duomenys, reikalingi RBC funkcijų realizavimui.

Geležinkelio linijos pralaidumo eksperimentinio skaičiavimo rezultatai pateikti 3.33 paveiksle



3.33 pav. Geležinkelio linijos pralaidumo eksperimentinio skaičiavimo rezultatai
čia: KS – dabartinė signalizacijos sistema.

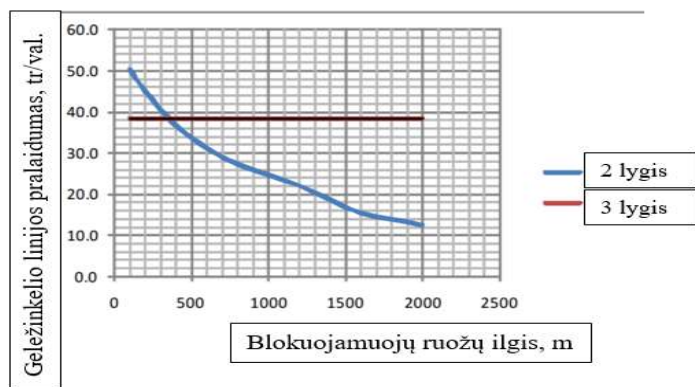
3.5. Teorinių ir eksperimentinių rezultatų analizė

Įvertinus visų važiavimo kriterijų visumą sudarau lentelę 3.11 ir užrašau senų ir naujų metodu privalumus ir trūkumus.

3.11 lentelė. Senų ir naujų metodų trūkumai ir privalumai

Sistema	Trūkumai	Privalumai
Sena traukinių eismo valdymo sistema	Negali būti pritaikyta prie naujos signalizacijos, planuojamos Europinės vėžės geležinkelio ruože. Skiriasi traukinių eismo valdymo principai.	Naujojo Eismo valdymo centro funkcijos gali būti lengvai integruotos į naują valdymo sistemą. Visa informacija apie geležinkelio eismą yra vienoje būstinėje.
ERTMS 2 lygis	Fiksuotu blokuojamuoju ruožų sistema. Geležinkelio ruožo pralaidumas mažesnis. Didesnės sąnaudų išlaidos.	Pritaikyta ir keleiviniams ir kroviniams traukiniams važiuoti. Traukinio vientisumo tikrinimo įrenginiai veikia pagal traukinių eismo saugumo reikalavimus.
ERTMS 3 lygis	Judančių blokų sistema. Pritaikyta tik keleiviniams traukiniams važiuoti. Iki šiol nėra sprendimo dėl krovinio traukinio vientisumo kontroles.	Mažos diegimo ir eksploatacijos išlaidos. Ženkiai padidina geležinkelio ruožo pralaidumą.
ERTMS 2 lygis su virtualiais blokais	Didesnės sąnaudos. Naudinga tik atskiruose geležinkelio ruožuose, kur reikia padidinti pralaidumą.	Kaip ir ERTMS 3 lygio sistema ženkiai didina geležinkelio ruožo pralaidumą.

Pateiktame grafike (žr. 3.34 pav.) galima išanalizuoti geležinkelio ruožo pralaidumą priklausomybę nuo blokuojamųjų ruožų ilgio. Sumažinus ilgį iki 400 m ERTMS 2 lygio sistemoje galima pasiekti 3 lygio sistemos pralaidumą, bet įrenginių kiekis atitinkamai padidės ir padidins sąnaudų išlaidas.



3.34 pav. Geležinkelio linijos pralaidumo priklausomybė nuo blokuojamųjų ruožų ilgio

IŠVADOS, REKOMENDACIJOS

1. Apskaičiuoto traukinio masė ruože Jonava–Gaižiūnai yra – 6426 t . Pagal eksperimentinius važiavimus – 6000 t.
2. Analitinių būdu apskaičiuotas geležinkelio ruožo pralaidumas pagal judančio bloko metodiką tris kartus didesnis už pralaidumą, nustatytą pagal fiksuotojo blokuojamojo ruožo metodiką.
3. Iš Vilniaus eismo valdymo centro eksperimentinių tyrimų buvo nustatyta, kad geležinkelio ruožo pralaidumą galima padidinti naudojant UIC 406 metodą. Tyrimų duomenys parodė, kad ruože Mauručiai–Jiesia nuo 15 val. 17 min. iki 16 val. 23 min. vietoje 5 tvarkaraštyje numatytų traukinių gali važiuoti 7 traukiniai.
4. Iš Vokietijos Stuttgart 21 geležinkelio linijos eksperimentinių tyrimų buvo nustatyta, kad geležinkelio ruožo pralaidumą galima padidinti naudojant judančio bloko metodą. Tyrimų duomenys parodė, kad minimalus laiko tarpas tarp traukinių gali būti sumažintas iki 129 s šiaurės–pietų kryptimi ir iki 128 s pietų–šiaurės kryptimi. Geležinkelio ruožo pralaidumas padidintas 5.3 % ir 9.3 %.
5. Siekiant užtikrinti eismo saugumą ir geležinkelio infrastruktūros optimalų ir efektyvų naudojimą, didesniame kaip 7 % įkalnėje galima lokomotyvo traukos skaičiavimo metodikoje naudoti amortizacijos koeficientą, priklausantį nuo lokomotyvo techninės būklės. Jis gali būti apie 0,8 – 0,9. Parenkant traukos riedmenis tam tikram geležinkelio ruožui, labai svarbu įvertinti prekinį šilumvežių degalų sąnaudas, važiavimo greitį, traukos jėgą, aplinkos taršą.
6. Siekiant užtikrinti geležinkelio infrastruktūros pralaidavimo didėjimą sudarant traukinių eismo grafiką turi būti atsižvelgiama ne tik į jau pasiektą traukinių eismo organizavimo lygį ir efektyvesnį viešosios geležinkelių infrastruktūros išnaudojimą, bet ir į traukinių eismo grafiko realumą, o apskaičiuojami jo elementai (intervalai, važiavimo trukmė ir kt.) pagrįsti ir vykdomi užtikrinant traukinių eismo saugą. Todėl rekomenduotina įvesti saugos koeficientus atskirai kiekvienam geležinkelio ruožui, kad išvengti traukinių susikaupimo, ypač tarpstotyje kur kertasi skirtingo pločio vėžės.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

- Cheli, F.; Melzi, S. 2010. Experimental characterization and modelling of a side buffer for freight trains, *Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers Part F : Journal of Rail and Rapid Transit* 224: 535–545. doi:10.1243/09544097JRRT317
- Černiauskaitė, L.; Podagėlis, I.; Sakalauskas, K. 2001. Nauji geležinkelių eksploatacijos išlaidų skaičiavimo metodai. Vilnius. Transport: 82–91.
- D'Acerno, L.; Placido, A.; Botte, M.; Montella, B. 2016. A methodological approach for managing rail disruptions with different perspectives, *International journal of mathematical models and methods in applied sciences* 8(1): 80–86.
- D'Acerno, L.; Gallo, M.; Montella, B.; Placido, A. 2012. Analysis of the interaction between travel demand and rail capacity constraints, *WIT Transactions on The Built Environment*: 128–137. doi:10.2495/UT120181
- Dailydka, S.; Lingaitis, L.P. 2012. A study on the options of means for railway passenger transportation, *Transport Problems-Problemy Transportu* 7(1): 53–62.
- Dievulis, G. 1995. Srautų paskirstymo transporto tinkle sprendimo būdas, *Transport. Transport Engineering* 1392–1533: 83–96.
- Gailienė, I.; Skerys, K.; Ciparytė, G. 2013. Investigation of traffic safety situation at the level crossings in Lithuania, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 8 (2): 117–123. doi:10.3846/bjrbe.2013.15
- Griškevičienė, D.; Griškevičius, A.; Griškevičiūtė-Gečienė, A. 2011. Peculiarities of passenger flows forecast on the reduced market conditions, *In selected papers of the 8th International Conference "Environmental Engineering"* 3: 898–904.
- Hamilton, B.A.; Edwards & Kelcey, J. 2009. Shared use of railroad infrastructure with noncompliant public transit rail vehicles: A practitioner's guide, *Transit cooperative research program (TCRP), Report 130, National Research Council, Washington*: 110 p.
- ERA. 2016. Introduction to ETCS braking curves. European railway agency. 28 p.
- Farchan, J.; Fwa, T.F. 2009. Pavement maintenance prioritization using Analytic Hierarchy Process, *Transportation Research Record* 2093: 12–24. doi: 10.3141/2093-02.
- Flammini, F.; Marrone, S.; Mazzocca, N.; Vittorini, V. 2005. Modeling system reliability aspects of ERTMS/ETCS by Fault Trees and Bayesian Networks, *Proceeding of the 9th IEEE International Symposium on High Assurance Systems Engineering*: 163–172.
- Jong, J.; Chang, S.; Lai, Y. 2013. Impact of European Railway Traffic Management System on Human Performance in Railway Operations, *Transportation Research Board of the National Academies. Washington*: 44–54.

- Jastremskas, V. 2012. Lokomotyvų efektyvaus naudojimo tyrimas vertinant vežimų apimčių dinamika, Daktaro disertacija, *Technika*: 89 p.
- Junevičius, R.; Bogdevičius, M. 2007. Determination of traffic flow parameters in different traffic flow interaction cases, *Technika* 3(2007): 236–239.
- Junevičius, R., 2011. Transporto srautų modeliavimas sutelktųjų parametrų metodu gatvių tinkle, Daktaro disertacija, *Technika*, 111 p.
- Hu, P.; Sun, Q.; Llu, R.; Wang, F. 2011. A short range prediction model for track quality index, *Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers, Part F : Journal of Rail and Rapid Transit* 225(3): 277–285.
- Kondo, M. 2010. Recent energy saving technologies on railway traction systems, *IEEEJ Transaction on Electrical and Electronic Engineering* 5: 298–303.
- Koc, W. Ph. D., D. Sc. 2012. Design of rail-track geometric systems by satellite measurement, *Journal of Transportation Engineering* 138(1): 114–122.
- Landex, A.; Kaas, A.H.; Jacobsen, E.M.; Schneider-Tilli, J. 2007. The UIC 406 capacity method used on single track sections, *Proceeding of the 2th International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis*.
- Lei, X.; Zhang, B. 2010. Influence of track stiffness distribution on vehicle and track interactions in track transition, *Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers Part F : Journal of Rail and Rapid Transit* 224: 592–603. doi: 10.1243/09544097JRRT318
- Li, F.; Gao, Z.; Wang, D.Z.W. 2013. Train routing model and algorithm combined with train scheduling, *Journal of Transportation Engineering* 139(1): 50–60.
- Liudvinavičius, L.; Lingaitis, P.L. 2012. Lokomotyvų elektros pavarų pratybų darbai, *Technika*: 20–60.
- Maskeliūnaitė, L. 2012. Tarptautinio keleivių vežimo geležinkeliais proceso kokybės tyrimo daugiatis modelis. Daktaro disertacija, *Technika*, 164 p.
- Maskeliūnaitė, L.; Sivilevičius, H. 2012. Expert evaluation of criteria describing the quality of travelling by international passenger train: technological, economic and safety perspectives, *Technological and Economic Development of Economy* 18(3): 544–566. doi:10.3846/20294913.2012.710178
- Nasr, A.; Mohammadi, S. 2010. The effect of train brake delay time on in-train forces, *Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers Part F : Journal of Rail and Rapid Transit*. 224: 523–534.
- NETZE. 2016. Fahrplanrobustheitsprüfung Ks–Signalisierung und ETCS S–Bahn Stuttgart. <https://gecms.region-stuttgart.org/gdmo/Download.aspx?id=62717>

- Ortuzar, J.; Willumsen, L. 2011. Modelling Transport. Fourth Edition. A John Wiley and Sons, Ltd., Publication. United Kindom: 1–20.
- Persson, R. 2010. Tilting train: benefits and motion sickness, *Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers Part F : Journal of Rail and Rapid Transit* 224: 513–522. doi: 10.1243/09544097JRRT282
- RGI. 2016. ETCS Level 2 to boost network capacity. *Railway Gazette International* April 2016: 43 p.
- Sameni, M.K.; Preston, J. 2012. Value for railway capacity assessing efficiency of operators in Great Britan, *Transportation Research Record* 2289: 134–144.
- Sato K.; Tamura K.; Tomii, N. 2013. A MIP–based timetable rescheduling formulation and algorithm minimizing further inconvenience to passengers, *Journal of Transport Planning & Management. London*.
- Sevi, A.; Ge, L. 2012. Cyclic behaviors of railroad ballast within the parallel gradation scaling framework, *Journal of Material in Civil Engineering* 24(7): 797–804. doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-55330000460.
- Siemens. 2016. Traukinio automatinio valdymo instrukcija.
- Smith, P.; Kyriakidis, M.; Majumdar, A.; Ochieng, W. 2013. Impact of European Railway Traffic Management System on Human Performance in Railway Operations. Transportation Research Record, *Journal of the Transportation Research Board* 2374: 83–92. doi: <http://dx.doi.org/10.3141/2374-10>
- Stapelberg, R. F. 2009. Handbook of Reability, Aviability, Maintainability and Safety in Engineering Design, *Springer–Verlag London Limited* 4–38. doi: 10.1007/978-1-84800-175-6
- Steišiūnas, S.; Bureika, G. 2012. Prekinių šilumvežių magistralei „Rail Baltica“ parinkimo algoritmas, *Mokslas – Lietuvos ateitis* 4(4): 386–390. doi:10.3846/mla.2012.62
- Sun, Y.; Xu, R. 2012. Rail transit travel time reliability and estimation of passenger rout choise behavior. Analysis using automatic fare collection data, *Transportation Research Record* 2275: 58–67. doi: <http://dx.doi.org/10.3141/2275-07>
- Vale, C.; Ribeiro, I. M.; Calçada, R. 2012. Integer programming to optimize tamping in railway tracks as preventive maintenance, *Journal of Transportation Engineering* 138(1): 123–131. doi: 10.1061/(ASCE)TE. 1943-5436.0000296
- Valentinovič, L.; Sivilevičius, H. 2014. Railway line capacity methods analysis and their application in “Lithuanian Railways” justification, *In selected papers of the 9th International Conference “Environmental Engineering”* 2029-7092: 1-20. doi: 10.3846/enviro.2014.174

- Valentinovič, L.; Sivilevičius, H. 2017. Development of the train traffic regulation method for “Rail Baltica” line based on the implementation of the European Train Traffic control systems, *In selected papers of the 10th International Conference “Environmental Engineering”*.
- Vikulina, Yu.I.; Sverdlin, V. 2016. Development of an algorithm for energy efficient automated train driving, *Proceeding of the 8th European Congress „Embedded Real Time Software and Systems*.
- Žilinskas, K. 2007. Stochastinio tiesinio programavimo Monte Karlo metodu tyrimas, Doktoro disertacija. *Technika*. 104 p.
- Баранов, Л.А. Воробьев, П. Логинова, Л.Н. 2012. Алгоритмы централизованного управления в системе автоматизированного управления движением поездов. Москва. *Мир транспорта*. 87 с.
- Власенко, С.; Теега, Г. 2010 Системы автоматики и телемеханики на железных дорогах мира. *Интекст*. 487 с.
- Гребенюк, П.Т. 2004. Правила тормозных расчетов. Москва. *Интекст*. 109 с.
- Гребенюк, П.Т. 1997. Тяговые расчеты. Москва. *Транспорт*. 35 с.

PRIEDAI

A Priedas Traukos skaičiavimai įsibėgėjimo režime
1 lentelė

V km/ val	V1 m/s	ΔV1 m/s	Traukos jėga, F, KN	Pasipr. Jėga, W, KN	Sukibimo jėga KN	m t	Xt	m _d t	F-W KN	a m/s ²	Δt s	t s	Δs m	t m
0	0	0	200	2.0320	-99.9942	412	0.06	437	197.9680	0.4530	0	0	0	0
1	0.2778	0.2778	200	2.0715	71.9086	412	0.06	437	197.9285	0.4529	0.6138	0.6138	0.0852	0.0852
2	0.5556	0.2778	200	2.1224	173.7687	412	0.06	437	197.8776	0.4528	0.6139	1.2277	0.0853	0.1705
3	0.8333	0.2778	200	2.1846	240.9204	412	0.06	437	197.8154	0.4527	0.6141	1.8418	0.1706	0.3411
4	1.1111	0.2778	200	2.2581	288.3528	412	0.06	437	197.7419	0.4525	0.6144	2.4562	0.2560	0.5971
5	1.3889	0.2778	200	2.3429	323.5099	412	0.06	437	197.6571	0.4523	0.6146	3.0708	0.3415	0.9386
6	1.6667	0.2778	200	2.4390	350.5080	412	0.06	437	197.5610	0.4521	0.6149	3.6857	0.4270	1.3656
7	1.9444	0.2778	200	2.5465	371.8077	412	0.06	437	197.4535	0.4518	0.6153	4.3010	0.5127	1.8783
8	2.2222	0.2778	200	2.6653	388.9707	412	0.06	437	197.3347	0.4516	0.6156	4.9166	0.5985	2.4768
9	2.5000	0.2778	200	2.7954	403.0359	412	0.06	437	197.2046	0.4513	0.6160	5.5326	0.6845	3.1613
10	2.7778	0.2778	200	2.9368	414.7210	412	0.06	437	197.0632	0.4509	0.6165	6.1491	0.7706	3.9319
11	3.0556	0.2778	200	3.0895	424.5380	412	0.06	437	196.9105	0.4506	0.6170	6.7661	0.8569	4.7888
12	3.3333	0.2778	200	3.2536	432.8618	412	0.06	437	196.7464	0.4502	0.6175	7.3836	0.9434	5.7322
13	3.6111	0.2778	200	3.4290	439.9733	412	0.06	437	196.5710	0.4498	0.6180	8.0016	1.0300	6.7622
14	3.8889	0.2778	200	3.6157	446.0872	412	0.06	437	196.3843	0.4494	0.6186	8.6202	1.1169	7.8791
15	4.1667	0.2778	200	3.8137	451.3702	412	0.06	437	196.1863	0.4489	0.6192	9.2394	1.2041	9.0832
16	4.4444	0.2778	200	4.0230	455.9539	412	0.06	437	195.9770	0.4485	0.6199	9.8593	1.2915	10.3747
17	4.7222	0.2778	200	4.2437	459.9435	412	0.06	437	195.7563	0.4480	0.6206	10.4799	1.3791	11.7538
18	5.0000	0.2778	200	4.4757	463.4240	412	0.06	437	195.5243	0.4474	0.6213	11.1012	1.4670	13.2208
19	5.2778	0.2778	200	4.7190	466.4650	412	0.06	437	195.2810	0.4469	0.6221	11.7233	1.5553	14.7761
20	5.5556	0.2778	200	4.9736	469.1240	412	0.06	437	195.0264	0.4463	0.6229	12.3462	1.6438	16.4199
21	5.8333	0.2778	199.3250	5.2395	471.4488	412	0.06	437	194.0864	0.4441	0.6259	12.9721	1.7387	18.1586
22	6.1111	0.2778	198.6500	5.5168	473.4797	412	0.06	437	193.7770	0.4434	0.6269	13.5990	1.8286	19.9872
23	6.3889	0.2778	197.9750	5.8054	475.2505	412	0.06	437	193.4563	0.4427	0.6280	14.2270	1.9188	21.9060
24	6.6667	0.2778	197.3000	6.1053	476.7904	412	0.06	437	193.1243	0.4419	0.6291	14.8561	2.0095	23.9155
25	6.9444	0.2778	196.6250	6.4165	478.1240	412	0.06	437	192.7810	0.4411	0.6302	15.4863	2.1006	26.0161
26	7.2222	0.2778	195.9500	6.7390	479.2727	412	0.06	437	192.4264	0.4403	0.6313	16.1176	2.1921	28.2082
27	7.5000	0.2778	195.2750	7.0729	480.2551	412	0.06	437	192.0604	0.4395	0.6325	16.7501	2.2842	30.4924
28	7.7778	0.2778	194.6000	7.4181	481.0873	412	0.06	437	191.6831	0.4386	0.6338	17.3839	2.3767	32.8691
29	8.0556	0.2778	193.9250	7.7746	481.7834	412	0.06	437	191.2945	0.4377	0.6351	18.0190	2.4697	35.3388
30	8.3333	0.2778	193.2500	8.1424	482.3557	412	0.06	437	190.8946	0.4368	0.6364	18.6554	2.5633	37.9021
31	8.6111	0.2778	192.5750	8.5215	482.8153	412	0.06	437	190.4834	0.4359	0.6378	19.2932	2.6574	40.5595
32	8.8889	0.2778	191.9000	8.9120	483.1717	412	0.06	437	190.0608	0.4349	0.6392	19.9324	2.7521	43.3116
33	9.1667	0.2778	191.2250	9.3138	483.4337	412	0.06	437	189.6269	0.4339	0.6407	20.5731	2.8474	46.1590
34	9.4444	0.2778	190.5500	9.7269	483.6088	412	0.06	437	189.1817	0.4329	0.6422	21.2153	2.9433	49.1023
35	9.7222	0.2778	189.8750	10.1513	483.7040	412	0.06	437	188.7252	0.4319	0.6437	21.8590	3.0398	52.1421
36	10.0000	0.2778	189.2000	10.5870	483.7254	412	0.06	437	188.2574	0.4308	0.6453	22.5043	3.1370	55.2791
37	10.2778	0.2778	188.5250	11.0341	483.6785	412	0.06	437	187.7782	0.4297	0.6470	23.1513	3.2348	58.5139
38	10.5556	0.2778	187.8500	11.4925	483.5683	412	0.06	437	187.2877	0.4286	0.6487	23.8000	3.3334	61.8473
39	10.8333	0.2778	187.1750	11.9622	483.3994	412	0.06	437	186.7859	0.4274	0.6504	24.4504	3.4327	65.2800
40	11.1111	0.2778	186.5000	12.4432	483.1759	412	0.06	437	186.2728	0.4263	0.6522	25.1026	3.5327	68.8127
41	11.3889	0.2778	185.8250	12.9355	482.9015	412	0.06	437	185.7484	0.4251	0.6540	25.7566	3.6335	72.4462
42	11.6667	0.2778	185.1500	13.4392	482.5796	412	0.06	437	185.2126	0.4238	0.6559	26.4125	3.7351	76.1813
43	11.9444	0.2778	184.4750	13.9542	482.2133	412	0.06	437	184.6655	0.4226	0.6579	27.0704	3.8376	80.0189
44	12.2222	0.2778	183.8000	14.4805	481.8054	412	0.06	437	184.1071	0.4213	0.6599	27.7303	3.9409	83.9598
45	12.5000	0.2778	183.1250	15.0181	481.3585	412	0.06	437	183.5374	0.4200	0.6619	28.3922	4.0450	88.0048
46	12.7778	0.2778	182.4500	15.5670	480.8751	412	0.06	437	182.9564	0.4187	0.6640	29.0562	4.1501	92.1549
47	13.0556	0.2778	181.7750	16.1273	480.3573	412	0.06	437	182.3640	0.4173	0.6662	29.7224	4.2561	96.4110
48	13.3333	0.2778	181.1000	16.6989	479.8071	412	0.06	437	181.7603	0.4159	0.6684	30.3908	4.3631	100.7741
49	13.6111	0.2778	180.4250	17.2818	479.2265	412	0.06	437	181.1453	0.4145	0.6707	31.0615	4.4710	105.2451
50	13.8889	0.2778	179.7500	17.8760	478.6170	412	0.06	437	180.5190	0.4131	0.6730	31.7345	4.5800	109.8251
51	14.1667	0.2778	179.0750	18.4815	477.9805	412	0.06	437	179.8814	0.4116	0.6754	32.4099	4.6900	114.5151
52	14.4444	0.2778	178.4000	19.0984	477.3182	412	0.06	437	179.2324	0.4101	0.6778	33.0877	4.8012	119.3163
53	14.7222	0.2778	177.7250	19.7266	476.6317	412	0.06	437	178.5721	0.4086	0.6803	33.7680	4.9134	124.2297
54	15.0000	0.2778	177.0500	20.3661	475.9221	412	0.06	437	177.9005	0.4071	0.6829	34.4509	5.0268	129.2565
55	15.2778	0.2778	176.3750	21.0169	475.1907	412	0.06	437	177.2176	0.4055	0.6855	35.1364	5.1414	134.3979
56	15.5556	0.2778	175.7000	21.6790	474.4386	412	0.06	437	176.5234	0.4039	0.6882	35.8246	5.2572	139.6551
57	15.8333	0.2778	175.0250	22.3525	473.6668	412	0.06	437	175.8178	0.4023	0.6910	36.5156	5.3743	145.0294
58	16.1111	0.2778	174.3500	23.0373	472.8763	412	0.06	437	175.1009	0.4007	0.6938	37.2094	5.4926	150.5220
59	16.3889	0.2778	173.6750	23.7334	472.0680	412	0.06	437	174.3727	0.3990	0.6967	37.9061	5.6123	156.1343
60	16.6667	0.2778	173.0000	24.4408	471.2427	412	0.06	437	173.6332	0.3973	0.6997	38.6058	5.7334	161.8677
61	16.9444	0.2778	172.3250	25.1595	470.4013	412	0.06	437	172.8824	0.3956	0.7027	39.3085	5.8559	167.7236
62	17.2222	0.2778	171.6500	25.8896	469.5444	412	0.06	437	172.1202	0.3939	0.7058	40.0143	5.9799	173.7035
63	17.5000	0.2778	170.9750	26.6310	468.6729	412	0.06	437	171.3467	0.3921	0.7090	40.7233	6.1053	179.8088
64	17.7778	0.2778	170.3000	27.3837	467.7873	412	0.06	437	170.5619	0.3903	0.7123	41.4356	6.2323	186.0411
65	18.0556	0.2778	169.6250	28.1477	466.8882	412	0.06	437	169.7658	0.3885	0.7156	42.1512	6.3610	192.4021
66	18.3333	0.2778	168.9500	28.9230	465.9763	412	0.06	437	168.9584	0.3866	0.7190	42.8702	6.4912	198.8933
67	18.6111	0.2778	168.2750	29.7097	465.0521	412	0.06	437	168.1396	0.3848	0.7225	43.5927	6.6232	205.5165
68	18.8889	0.2778	167.6000	30.5077	464.1161	412	0.06	437	167.3095	0.3829	0.7261	44.3188	6.7569	212.2734
69	19.1667	0.2778	166.9250	31.3170	463.1689	412	0.06	437	166.4681	0.3809	0.7298	45.0486	6.8924	219.1658
70	19.4444	0.2778	166.2500	32.1376	462.2108	412	0.06	437	165.6154	0.3790	0.7335	45.7821	7.0298	226.1956
71	19.7222	0.2778	165.5750	32.9695	461.2423	412	0.06	437	164.7514	0.3770	0.7374	46.5195	7.1691	233.3647
72	20.0000	0.2778	164.9000	33.8128	460.2639	412	0.06	437	163.8760	0.3750	0.7413	47.2608	7.3103	240.6750
73	20.2778	0.2778	164.2250	34.6674	459.2759	412	0							

A Priedas Traukos skaičiavimai įsibėgėjimo režime
1 lentelė

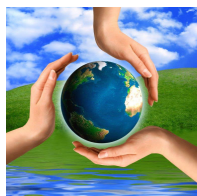
82	22.7778	0.2778	158.1500	42.8680	450.0087	412	0.06	437	154.4998	0.3535	0.7863	54.9126	8.8461	322.0283
83	23.0556	0.2778	157.4750	43.8358	448.9427	412	0.06	437	153.4999	0.3513	0.7914	55.7040	9.0136	331.0419
84	23.3333	0.2778	156.8000	44.8149	447.8703	412	0.06	437	152.4887	0.3489	0.7967	56.5007	9.1840	340.2259
85	23.6111	0.2778	156.1250	45.8053	446.7918	412	0.06	437	151.4662	0.3466	0.8021	57.3028	9.3574	349.5833
86	23.8889	0.2778	155.4500	46.8070	445.7074	412	0.06	437	150.4324	0.3442	0.8076	58.1104	9.5339	359.1172
87	24.1667	0.2778	154.7750	47.8201	444.6173	412	0.06	437	149.3872	0.3418	0.8132	58.9236	9.7136	368.8308
88	24.4444	0.2778	154.1000	48.8445	443.5216	412	0.06	437	148.3307	0.3394	0.8190	59.7426	9.8965	378.7273
89	24.7222	0.2778	153.4250	49.8802	442.4205	412	0.06	437	147.2629	0.3370	0.8250	60.5676	10.0828	388.8101
90	25.0000	0.2778	152.7500	50.9272	441.3143	412	0.06	437	146.1838	0.3345	0.8310	61.3986	10.2727	399.0828
91	25.2778	0.2778	152.0750	51.9855	440.2030	412	0.06	437	145.0934	0.3320	0.8373	62.2359	10.4662	409.5490
92	25.5556	0.2778	151.4000	53.0552	439.0869	412	0.06	437	143.9916	0.3295	0.8437	63.0796	10.6634	420.2124
93	25.8333	0.2778	150.7250	54.1362	437.9661	412	0.06	437	142.8785	0.3270	0.8503	63.9299	10.8646	431.0770
94	26.1111	0.2778	150.0500	55.2285	436.8407	412	0.06	437	141.7541	0.3244	0.8570	64.7869	11.0698	442.1468
95	26.3889	0.2778	149.3750	56.3321	435.7109	412	0.06	437	140.6184	0.3218	0.8639	65.6508	11.2792	453.4260
96	26.6667	0.2778	148.7000	57.4470	434.5768	412	0.06	437	139.4714	0.3192	0.8710	66.5218	11.4930	464.9190
97	26.9444	0.2778	148.0250	58.5733	433.4385	412	0.06	437	138.3130	0.3165	0.8783	67.4001	11.7112	476.6302
98	27.2222	0.2778	147.3500	59.7109	432.2962	412	0.06	437	137.1433	0.3138	0.8858	68.2859	11.9341	488.5643
99	27.5000	0.2778	146.6750	60.8598	431.1500	412	0.06	437	135.9623	0.3111	0.8935	69.1794	12.1619	500.7262
100	27.7778	0.2778	146.0000	62.0200	430.0000	412	0.06	437	134.7700	0.3084	0.9014	70.0808	12.3947	513.1209
101	28.0556	0.2778	145.3250	63.1915	428.8463	412	0.06	437	133.5664	0.3056	0.9096	70.9904	12.6327	525.7536
102	28.3333	0.2778	144.6500	64.3744	427.6890	412	0.06	437	132.3514	0.3029	0.9179	71.9083	12.8762	538.6298
103	28.6111	0.2778	143.9750	65.5686	426.5282	412	0.06	437	131.1251	0.3001	0.9265	72.8348	13.1253	551.7551
104	28.8889	0.2778	143.3000	66.7741	425.3640	412	0.06	437	129.8875	0.2972	0.9353	73.7701	13.3802	565.1353
105	29.1667	0.2778	142.6250	67.9909	424.1965	412	0.06	437	128.6386	0.2944	0.9444	74.7145	13.6413	578.7766
106	29.4444	0.2778	141.9500	69.2190	423.0259	412	0.06	437	127.3784	0.2915	0.9537	75.6682	13.9087	592.6853
107	29.7222	0.2778	141.2750	70.4585	421.8521	412	0.06	437	126.1068	0.2886	0.9634	76.6316	14.1828	606.8681
108	30.0000	0.2778	140.6000	71.7093	420.6752	412	0.06	437	124.8239	0.2856	0.9733	77.6049	14.4637	621.3318
109	30.2778	0.2778	139.9250	72.9714	419.4955	412	0.06	437	123.5297	0.2827	0.9835	78.5884	14.7518	636.0836
110	30.5556	0.2778	139.2500	74.2448	418.3128	412	0.06	437	122.2242	0.2797	0.9940	79.5824	15.0474	651.1310
111	30.8333	0.2778	138.5750	75.5295	417.1274	412	0.06	437	120.9074	0.2767	1.0048	80.5872	15.3509	666.4819
112	31.1111	0.2778	137.9000	76.8256	415.9392	412	0.06	437	119.5792	0.2736	1.0159	81.6031	15.6625	682.1444
113	31.3889	0.2778	137.2250	78.1330	414.7484	412	0.06	437	118.2397	0.2706	1.0275	82.6306	15.9826	698.1270
114	31.6667	0.2778	136.5500	79.4517	413.5550	412	0.06	437	116.8889	0.2675	1.0393	83.6699	16.3117	714.4387
115	31.9444	0.2778	135.8750	80.7817	412.3590	412	0.06	437	115.5268	0.2644	1.0516	84.7215	16.6500	731.0887
116	32.2222	0.2778	135.2000	82.1230	411.1607	412	0.06	437	114.1534	0.2612	1.0642	85.7857	16.9982	748.0869
117	32.5000	0.2778	134.5250	83.4757	409.9599	412	0.06	437	112.7686	0.2581	1.0773	86.8630	17.3565	765.4434
118	32.7778	0.2778	133.8500	84.8397	408.7568	412	0.06	437	111.3725	0.2549	1.0908	87.9538	17.7256	783.1690
119	33.0556	0.2778	133.1750	86.2150	407.5514	412	0.06	437	109.9651	0.2516	1.1048	89.0586	18.1059	801.2749
120	33.3333	0.2778	132.5000	87.6016	406.3438	412	0.06	437	108.5464	0.2484	1.1192	90.1778	18.4980	819.7729
121	33.6111	0.2778	131.8250	88.9995	405.1340	412	0.06	437	107.1164	0.2451	1.1341	91.3119	18.9025	838.6754
122	33.8889	0.2778	131.1500	90.4088	403.9221	412	0.06	437	105.6750	0.2418	1.1496	92.4615	19.3200	857.9954
123	34.1667	0.2778	130.4750	91.8294	402.7081	412	0.06	437	104.2223	0.2385	1.1656	93.6271	19.7512	877.7466
124	34.4444	0.2778	129.8000	93.2613	401.4921	412	0.06	437	102.7583	0.2351	1.1822	94.8093	20.1968	897.9434
125	34.7222	0.2778	129.1250	94.7045	400.2742	412	0.06	437	101.2830	0.2318	1.1995	96.0088	20.6575	918.6009
126	35.0000	0.2778	128.4500	96.1590	399.0543	412	0.06	437	99.7964	0.2284	1.2173	97.2261	21.1343	939.7352
127	35.2778	0.2778	127.7750	97.6249	397.8325	412	0.06	437	98.2984	0.2249	1.2359	98.4620	21.6281	961.3633
128	35.5556	0.2778	127.1000	99.1021	396.6089	412	0.06	437	96.7891	0.2215	1.2552	99.7172	22.1396	983.5029
129	35.8333	0.2778	126.4250	100.5906	395.3836	412	0.06	437	95.2685	0.2180	1.2752	100.9924	22.6701	1006.1730
130	36.1111	0.2778	125.7500	102.0904	394.1564	412	0.06	437	93.7366	0.2145	1.2960	102.2884	23.2206	1029.3936
131	36.3889	0.2778	125.0750	103.6015	392.9275	412	0.06	437	92.1934	0.2110	1.3177	103.6061	23.7923	1053.1859
132	36.6667	0.2778	124.4000	105.1240	391.6970	412	0.06	437	90.6388	0.2074	1.3403	104.9464	24.3866	1077.5725
133	36.9444	0.2778	123.7250	106.6578	390.4648	412	0.06	437	89.0729	0.2038	1.3639	106.3103	25.0047	1102.5772
134	37.2222	0.2778	123.0500	108.2029	389.2311	412	0.06	437	87.4957	0.2002	1.3885	107.6988	25.6483	1128.2255
135	37.5000	0.2778	122.3750	109.7593	387.9957	412	0.06	437	85.9072	0.1966	1.4142	109.1130	26.3190	1154.5445
136	37.7778	0.2778	121.7000	111.3270	386.7588	412	0.06	437	84.3074	0.1929	1.4410	110.5540	27.0185	1181.5630
137	38.0556	0.2778	121.0250	112.9061	385.5204	412	0.06	437	82.6962	0.1892	1.4691	112.0231	27.7490	1209.3120
138	38.3333	0.2778	120.3500	114.4965	384.2806	412	0.06	437	81.0737	0.1855	1.4985	113.5216	28.5124	1237.8244
139	38.6111	0.2778	119.6750	116.0982	383.0393	412	0.06	437	79.4399	0.1818	1.5293	115.0509	29.3112	1267.1356
140	38.8889	0.2778	119.0000	117.7112	381.7966	412	0.06	437	77.7948	0.1780	1.5616	116.6125	30.1479	1297.2835
141	39.1667	0.2778	118.3250	119.3355	380.5525	412	0.06	437	76.1384	0.1742	1.5956	118.2081	31.0254	1328.3089
142	39.4444	0.2778	117.6500	120.9712	379.3071	412	0.06	437	74.4706	0.1704	1.6313	119.8394	31.9468	1360.2557
143	39.7222	0.2778	116.9750	122.6182	378.0603	412	0.06	437	72.7915	0.1666	1.6690	121.5084	32.9155	1393.1712
144	40.0000	0.2778	116.3000	124.2765	376.8123	412	0.06	437	71.1011	0.1627	1.7086	123.2170	33.9354	1427.1066
145	40.2778	0.2778	115.6250	125.9461	375.5629	412	0.06	437	69.3994	0.1588	1.7505	124.9675	35.0107	1462.1173
146	40.5556	0.2778	114.9500	127.6270	374.3124	412	0.06	437	67.6864	0.1549	1.7948	126.7623	36.1460	1498.2633
147	40.8333	0.2778	114.2750	129.3193	373.0606	412	0.06	437	65.9620	0.1509	1.8418	128.6041	37.3467	1535.6100
148	41.1111	0.2778	113.6000	131.0229	371.8076	412	0.06	437	64.2263	0.1470	1.8915	130.4956	38.6187	1574.2287
149	41.3889	0.2778	112.9250	132.7378	370.5534	412	0.06	437	62.4793	0.1430	1.9444	132.4400	39.9686	1614.1973
150	41.6667	0.2778	112.2500	134.4640	369.2981	412	0.06	437	60.7210	0.1389	2.0007	134.4407	41.4039	1655.6012
151	41.9444	0.2778	111.5750	136.2015	368.0417	412	0.06	437	58.9514	0.1349	2.0608	136.5015	42.9330	1698.5342
152	42.2222	0.2778	110.9000	137.9504	366.7841	412	0.06	437	57.1704	0.1308	2.1250	138.6265	44.5655	1743.0997
153	42.5000	0.2778	110.2250	139.7106	365.5255	412	0.06	437	55.3781	0.1267	2.1938			

A Priedas Traukos skaičiavimai stabdymo režime
2 lentelė

V km/h	V1 m/s	V2 m/s	Maks. Sulietis m/s ²	Posir. jėga kN	Stabdymo jėga kN	Susikabinimo jėga kN	A m/s ²	T s	T s	S m	S m
160	44.4444	-0.2778	0,8	21.9424	295.5424	153	-0.6763	0	0	0	0
159	44.1667	-0.2778	0,8	21.7280	295.3280	154	-0.6758	0.4111	0.4111	14.9142	14.9142
158	43.8889	-0.2778	0,8	21.5147	295.1147	154	-0.6753	0.4114	0.8225	14.8210	29.7352
157	43.6111	-0.2778	0,8	21.3025	294.9025	155	-0.6748	0.4117	1.2342	14.7278	44.4630
156	43.3333	-0.2778	0,8	21.0915	294.6915	156	-0.6744	0.4120	1.6462	14.6346	59.0976
155	43.0556	-0.2778	0,8	20.8816	294.4816	156	-0.6739	0.4122	2.0584	14.5414	73.6390
154	42.7778	-0.2778	0,8	20.6728	294.2728	157	-0.6734	0.4125	2.4709	14.4482	88.0872
153	42.5000	-0.2778	0,8	20.4651	294.0651	157	-0.6729	0.4128	2.8837	14.3550	102.4422
152	42.2222	-0.2778	0,8	20.2586	293.8586	158	-0.6724	0.4131	3.2968	14.2617	116.7039
151	41.9444	-0.2778	0,8	20.0532	293.6532	159	-0.6720	0.4134	3.7102	14.1685	130.8724
150	41.6667	-0.2778	0,8	19.8490	293.4490	159	-0.6715	0.4137	4.1239	14.0753	144.9477
149	41.3889	-0.2778	0,8	19.6459	293.2459	160	-0.6710	0.4140	4.5379	13.9821	158.9298
148	41.1111	-0.2778	0,8	19.4439	293.0439	160	-0.6706	0.4143	4.9522	13.8889	172.8187
147	40.8333	-0.2778	0,8	19.2431	292.8431	161	-0.6701	0.4146	5.3668	13.7957	186.6144
146	40.5556	-0.2778	0,8	19.0433	292.6433	161	-0.6697	0.4149	5.7817	13.7025	200.3169
145	40.2778	-0.2778	0,8	18.8448	292.4448	162	-0.6692	0.4151	6.1968	13.6092	213.9261
144	40.0000	-0.2778	0,8	18.6473	292.2473	163	-0.6688	0.4154	6.6122	13.5160	227.4421
143	39.7222	-0.2778	0,8	18.4510	292.0510	163	-0.6683	0.4157	7.0279	13.4228	240.8649
142	39.4444	-0.2778	0,8	18.2558	291.8558	164	-0.6679	0.4160	7.4439	13.3296	254.1945
141	39.1667	-0.2778	0,8	18.0617	291.6617	164	-0.6674	0.4163	7.8602	13.2364	267.4309
140	38.8889	-0.2778	0,8	17.8688	291.4688	165	-0.6670	0.4165	8.2767	13.1432	280.5741
139	38.6111	-0.2778	0,8	17.6770	291.2770	165	-0.6665	0.4168	8.6935	13.0500	293.6241
138	38.3333	-0.2778	0,8	17.4863	291.0863	166	-0.6661	0.4171	9.1106	12.9567	306.5808
137	38.0556	-0.2778	0,8	17.2968	290.8968	167	-0.6657	0.4174	9.5280	12.8635	319.4443
136	37.7778	-0.2778	0,8	17.1084	290.7084	167	-0.6652	0.4176	9.9456	12.7703	332.2146
135	37.5000	-0.2778	0,8	16.9212	290.5212	168	-0.6648	0.4179	10.3635	12.6771	344.8917
134	37.2222	-0.2778	0,8	16.7350	290.3350	168	-0.6644	0.4182	10.7817	12.5839	357.4756
133	36.9444	-0.2778	0,8	16.5500	290.1500	169	-0.6640	0.4184	11.2001	12.4907	369.9663
132	36.6667	-0.2778	0,8	16.3661	289.9661	170	-0.6635	0.4187	11.6188	12.3975	382.3638
131	36.3889	-0.2778	0,8	16.1834	289.7834	171	-0.6631	0.4190	12.0378	12.3043	394.6681
130	36.1111	-0.2778	0,8	16.0018	289.6018	172	-0.6627	0.4192	12.4570	12.2110	406.8791
129	35.8333	-0.2778	0,8	15.8213	289.4213	173	-0.6623	0.4195	12.8765	12.1178	418.9969
128	35.5556	-0.2778	0,8	15.6420	289.2420	173	-0.6619	0.4198	13.2963	12.0246	431.0215
127	35.2778	-0.2778	0,8	15.4638	289.0638	174	-0.6615	0.4200	13.7163	11.9314	442.9529
126	35.0000	-0.2778	0,8	15.2867	288.8867	174	-0.6611	0.4203	14.1366	11.8382	454.7911
125	34.7222	-0.2778	0,8	15.1107	288.7107	175	-0.6607	0.4205	14.5571	11.7450	466.5361
124	34.4444	-0.2778	0,8	14.9359	288.5359	175	-0.6603	0.4208	14.9779	11.6518	478.1879
123	34.1667	-0.2778	0,8	14.7623	288.3623	176	-0.6599	0.4210	15.3989	11.5585	489.7464
122	33.8889	-0.2778	0,8	14.5897	288.1897	177	-0.6595	0.4213	15.8202	11.4653	501.2117
121	33.6111	-0.2778	0,8	14.4183	288.0183	177	-0.6591	0.4215	16.2417	11.3721	512.5838
120	33.3333	-0.2778	0,8	14.2480	287.8480	178	-0.6587	0.4218	16.6635	11.2789	523.8627
119	33.0556	-0.2778	0,8	14.0788	287.6788	178	-0.6583	0.4220	17.0855	11.1857	535.0484
118	32.7778	-0.2778	0,8	13.9108	287.5108	179	-0.6579	0.4223	17.5078	11.0925	546.1409
117	32.5000	-0.2778	0,8	13.7439	287.3439	180	-0.6575	0.4225	17.9303	10.9993	557.1402
116	32.2222	-0.2778	0,8	13.5782	287.1782	180	-0.6572	0.4228	18.3531	10.9060	568.0462
115	31.9444	-0.2778	0,8	13.4136	287.0136	181	-0.6568	0.4230	18.7761	10.8128	578.8590
114	31.6667	-0.2778	0,8	13.2501	286.8501	181	-0.6564	0.4233	19.1994	10.7196	589.5786
113	31.3889	-0.2778	0,8	13.0877	286.6877	182	-0.6560	0.4235	19.6229	10.6264	600.2050
112	31.1111	-0.2778	0,8	12.9265	286.5265	183	-0.6557	0.4238	20.0467	10.5332	610.7382
111	30.8333	-0.2778	0,8	12.7664	286.3664	183	-0.6553	0.4240	20.4707	10.4400	621.1782
110	30.5556	-0.2778	0,8	12.6074	286.2074	184	-0.6549	0.4242	20.8949	10.3468	631.5250
109	30.2778	-0.2778	0,8	12.4496	286.0496	185	-0.6546	0.4245	21.3194	10.2535	641.7785
108	30.0000	-0.2778	0,8	12.2929	285.8929	185	-0.6542	0.4247	21.7441	10.1603	651.9388
107	29.7222	-0.2778	0,8	12.1373	285.7373	186	-0.6539	0.4249	22.1690	10.0671	662.0059
106	29.4444	-0.2778	0,8	11.9829	285.5829	186	-0.6535	0.4252	22.5942	9.9739	671.9798
105	29.1667	-0.2778	0,8	11.8295	285.4295	187	-0.6532	0.4254	23.0196	9.8807	681.8605
104	28.8889	-0.2778	0,8	11.6774	285.2774	188	-0.6528	0.4256	23.4452	9.7875	691.6480
103	28.6111	-0.2778	0,8	11.5263	285.1263	188	-0.6525	0.4259	23.8711	9.6943	701.3423
102	28.3333	-0.2778	0,8	11.3764	284.9764	189	-0.6521	0.4261	24.2972	9.6010	710.9433
101	28.0556	-0.2778	0,8	11.2276	284.8276	189	-0.6518	0.4263	24.7235	9.5078	720.4511
100	27.7778	-0.2778	0,8	11.0800	284.6800	190	-0.6514	0.4265	25.1500	9.4146	729.8657
99	27.5000	-0.2778	0,8	10.9335	284.5335	191	-0.6511	0.4267	25.5767	9.3214	739.1871
98	27.2222	-0.2778	0,8	10.7881	284.3881	191	-0.6508	0.4270	26.0037	9.2282	748.4153
97	26.9444	-0.2778	0,8	10.6439	284.2439	192	-0.6504	0.4272	26.4309	9.1350	757.5503
96	26.6667	-0.2778	0,8	10.5007	284.1007	193	-0.6501	0.4274	26.8583	9.0418	766.5921
95	26.3889	-0.2778	0,8	10.3588	283.9588	193	-0.6498	0.4276	27.2859	8.9485	775.5406
94	26.1111	-0.2778	0,8	10.2179	283.8179	194	-0.6495	0.4278	27.7137	8.8553	784.3959
93	25.8333	-0.2778	0,8	10.0782	283.6782	194	-0.6491	0.4280	28.1417	8.7621	793.1580
92	25.5556	-0.2778	0,8	9.9396	283.5396	195	-0.6488	0.4283	28.5700	8.6689	801.8269
91	25.2778	-0.2778	0,8	9.8021	283.4021	195	-0.6485	0.4285	28.9985	8.5757	810.4026
90	25.0000	-0.2778	0,8	9.6658	283.2658	196	-0.6482	0.4287	29.4272	8.4825	818.8851
89	24.7222	-0.2778	0,8	9.5306	283.1306	197	-0.6479	0.4289	29.8561	8.3893	827.2744
88	24.4444	-0.2778	0,8	9.3965	282.9965	197	-0.6476	0.4291	30.2852	8.2960	835.5704
87	24.1667	-0.2778	0,8	9.2636	282.8636	198	-0.6473	0.4293	30.7145	8.2028	843.7732
86	23.8889	-0.2778	0,8	9.1318	282.7318	198	-0.6470	0.4295	31.1440	8.1096	851.8828
85	23.6111	-0.2778	0,8	9.0011	282.6011	199	-0.6467	0.4297	31.5737	8.0164	859.8992
84	23.3333	-0.2778	0,8	8.8716	282.4716	200	-0.6464	0.4299	32.0036	7.9232	867.8224
83	23.0556	-0.2778	0,8	8.7432	282.3432	200	-0.6461	0.4301	32.4337	7.8300	875.6524
82	22.7778	-0.2778	0,8	8.6159	282.2159	201	-0.6458	0.4303	32.8640	7.7368	883.3892
81	22.5000	-0.2778	0,8	8.4898	282.0898	202	-0.6455	0.4305	33.2945	7.6435	891.0327
80	22.2222	-0.2778	0,8	8.3648	281.9648	202	-0.6452	0.4307	33.7252	7.5503	898.5830
79	21.9444	-0.2778	0,8	8.2409	281.8409	203	-0.6449	0.4309	34.1561	7.4571	906.0401
78	21.6667	-0.2778	0,8	8.1182	281.7182	204	-0.6447	0.4310	34.5871	7.3639	913.4040
77	21.3889	-0.2778	0,8	7.9966	281.5966	205	-0.6444	0.4312	35.0183	7.2707	920.6747
76	21.1111	-0.2778	0,8	7.8761	281.4761	205	-0.6441	0.4314	35.4497	7.1775	927.8522

A Priedas Traukos skaičiavimai stabdymo režime
2 lentelė

75	20.8333	-0.2778	0,8	7.7568	281.3568	206	-0.6438	0.4316	35.8813	7.0843	934.9365
74	20.5556	-0.2778	0,8	7.6385	281.2385	207	-0.6436	0.4318	36.3131	6.9911	941.9276
73	20.2778	-0.2778	0,8	7.5215	281.1215	207	-0.6433	0.4320	36.7451	6.8978	948.8254
72	20.0000	-0.2778	0,8	7.4055	281.0055	208	-0.6430	0.4321	37.1772	6.8046	955.6300
71	19.7222	-0.2778	0,8	7.2907	280.8907	209	-0.6428	0.4323	37.6095	6.7114	962.3414
70	19.4444	-0.2778	0,8	7.1770	280.7770	209	-0.6425	0.4325	38.0420	6.6182	968.9596
69	19.1667	-0.2778	0,8	7.0644	280.6644	210	-0.6423	0.4327	38.4747	6.5250	975.4846
68	18.8889	-0.2778	0,8	6.9530	280.5530	211	-0.6420	0.4329	38.9076	6.4318	981.9164
67	18.6111	-0.2778	0,8	6.8427	280.4427	212	-0.6417	0.4330	39.3406	6.3386	988.2550
66	18.3333	-0.2778	0,8	6.7336	280.3336	212	-0.6415	0.4332	39.7738	6.2453	994.5003
65	18.0556	-0.2778	0,8	6.6255	280.2256	213	-0.6412	0.4334	40.2072	6.1521	1000.6524
64	17.7778	-0.2778	0,8	6.5187	280.1187	214	-0.6410	0.4335	40.6407	6.0589	1006.7113
63	17.5000	-0.2778	0,8	6.4129	280.0129	215	-0.6408	0.4337	41.0744	5.9657	1012.6770
62	17.2222	-0.2778	0,8	6.3083	279.9083	215	-0.6405	0.4339	41.5083	5.8725	1018.5495
61	16.9444	-0.2778	0,8	6.2048	279.8048	216	-0.6403	0.4340	41.9423	5.7793	1024.3288
60	16.6667	-0.2778	0,8	6.1024	279.7024	216	-0.6401	0.4342	42.3765	5.6861	1030.0149
59	16.3889	-0.2778	0,8	6.0012	279.6012	217	-0.6398	0.4343	42.8108	5.5928	1035.6077
58	16.1111	-0.2778	0,8	5.9011	279.5011	218	-0.6396	0.4345	43.2453	5.4996	1041.1073
57	15.8333	-0.2778	0,8	5.8021	279.4021	219	-0.6394	0.4347	43.6800	5.4064	1046.5137
56	15.5556	-0.2778	0,8	5.7043	279.3043	219	-0.6391	0.4348	44.1148	5.3132	1051.8269
55	15.2778	-0.2778	0,8	5.6075	279.2075	220	-0.6389	0.4350	44.5498	5.2200	1057.0469
54	15.0000	-0.2778	0,8	5.5120	279.1120	221	-0.6387	0.4351	44.9849	5.1268	1062.1737
53	14.7222	-0.2778	0,8	5.4175	279.0175	222	-0.6385	0.4353	45.4202	5.0336	1067.2073
52	14.4444	-0.2778	0,8	5.3242	278.9242	223	-0.6383	0.4354	45.8556	4.9403	1072.1476
51	14.1667	-0.2778	0,8	5.2320	278.8320	224	-0.6381	0.4356	46.2912	4.8471	1076.9947
50	13.8889	-0.2778	0,8	5.1410	278.7410	225	-0.6379	0.4357	46.7269	4.7539	1081.7486
49	13.6111	-0.2778	0,8	5.0511	278.6511	226	-0.6376	0.4358	47.1627	4.6607	1086.4093
48	13.3333	-0.2778	0,8	4.9623	278.5623	227	-0.6374	0.4360	47.5987	4.5675	1090.9768
47	13.0556	-0.2778	0,8	4.8747	278.4747	227	-0.6372	0.4361	48.0348	4.4743	1095.4511
46	12.7778	-0.2778	0,8	4.7881	278.3881	228	-0.6370	0.4363	48.4711	4.3811	1099.8322
45	12.5000	-0.2778	0,8	4.7028	278.3028	229	-0.6368	0.4364	48.9075	4.2878	1104.1200
44	12.2222	-0.2778	0,8	4.6185	278.2185	230	-0.6367	0.4365	49.3440	4.1946	1108.3146
43	11.9444	-0.2778	0,8	4.5354	278.1354	231	-0.6365	0.4367	49.7807	4.1014	1112.4160
42	11.6667	-0.2778	0,8	4.4534	278.0534	233	-0.6363	0.4368	50.2175	4.0082	1116.4242
41	11.3889	-0.2778	0,8	4.3725	277.9725	234	-0.6361	0.4369	50.6544	3.9150	1120.3392
40	11.1111	-0.2778	0,8	4.2928	277.8928	235	-0.6359	0.4370	51.0914	3.8218	1124.1610
39	10.8333	-0.2778	0,8	4.2142	277.8142	236	-0.6357	0.4372	51.5286	3.7286	1127.8896
38	10.5556	-0.2778	0,8	4.1367	277.7367	237	-0.6356	0.4373	51.9659	3.6353	1131.5249
37	10.2778	-0.2778	0,8	4.0604	277.6604	238	-0.6354	0.4374	52.4033	3.5421	1135.0670
36	10.0000	-0.2778	0,8	3.9852	277.5852	239	-0.6352	0.4375	52.8408	3.4489	1138.5159
35	9.7222	-0.2778	0,8	3.9112	277.5112	241	-0.6350	0.4377	53.2785	3.3557	1141.8716
34	9.4444	-0.2778	0,8	3.8382	277.4382	242	-0.6349	0.4378	53.7163	3.2625	1145.1341
33	9.1667	-0.2778	0,8	3.7664	277.3664	244	-0.6347	0.4379	54.1542	3.1693	1148.3034
32	8.8889	-0.2778	0,8	3.6957	277.2957	245	-0.6345	0.4380	54.5922	3.0761	1151.3795
31	8.6111	-0.2778	0,8	3.6262	277.2262	247	-0.6344	0.4381	55.0303	2.9828	1154.3623
30	8.3333	-0.2778	0,8	3.5578	277.1578	248	-0.6342	0.4382	55.4685	2.8896	1157.2519
29	8.0556	-0.2778	0,8	3.4905	277.0905	250	-0.6341	0.4383	55.9068	2.7964	1160.0483
28	7.7778	-0.2778	0,8	3.4244	277.0244	252	-0.6339	0.4384	56.3452	2.7032	1162.7515
27	7.5000	-0.2778	0,8	3.3594	276.9594	254	-0.6338	0.4385	56.7837	2.6100	1165.3615
26	7.2222	-0.2778	0,8	3.2955	276.8955	256	-0.6336	0.4386	57.2223	2.5168	1167.8783
25	6.9444	-0.2778	0,8	3.2328	276.8328	258	-0.6335	0.4387	57.6610	2.4236	1170.3019
24	6.6667	-0.2778	0,8	3.1711	276.7711	260	-0.6333	0.4388	58.0998	2.3304	1172.6323
23	6.3889	-0.2778	0,8	3.1107	276.7107	262	-0.6332	0.4389	58.5387	2.2371	1174.8694
22	6.1111	-0.2778	0,8	3.0513	276.6513	265	-0.6331	0.4390	58.9777	2.1439	1177.0133
21	5.8333	-0.2778	0,8	2.9931	276.5931	268	-0.6329	0.4391	59.4168	2.0507	1179.0640
20	5.5556	-0.2778	0,8	2.9360	276.5360	271	-0.6328	0.4392	59.8560	1.9575	1181.0215
19	5.2778	-0.2778	0,8	2.8800	276.4800	275	-0.6327	0.4393	60.2953	1.8643	1182.8858
18	5.0000	-0.2778	0,8	2.8252	276.4252	278	-0.6326	0.4394	60.7347	1.7711	1184.6569
17	4.7222	-0.2778	0,8	2.7715	276.3715	283	-0.6324	0.4395	61.1742	1.6779	1186.3348
16	4.4444	-0.2778	0,8	2.7190	276.3190	288	-0.6323	0.4396	61.6138	1.5846	1187.9194
15	4.1667	-0.2778	0,8	2.6675	276.2675	293	-0.6322	0.4397	62.0535	1.4914	1189.4108
14	3.8889	-0.2778	0,8	2.6173	276.2173	300	-0.6321	0.4397	62.4932	1.3982	1190.8090
13	3.6111	-0.2778	0,8	2.5681	276.1681	308	-0.6320	0.4398	62.9330	1.3050	1192.1140
12	3.3333	-0.2778	0,8	2.5201	276.1201	317	-0.6319	0.4399	63.3729	1.2118	1193.3258
11	3.0556	-0.2778	0,8	2.4732	276.0732	329	-0.6317	0.4400	63.8129	1.1186	1194.4444
10	2.7778	-0.2778	0,8	2.4274	276.0274	344	-0.6316	0.4400	64.2529	1.0254	1195.4698
9	2.5000	-0.2778	0,8	2.3828	275.9828	363	-0.6315	0.4401	64.6930	0.9321	1196.4019
8	2.2222	-0.2778	0,8	2.3393	275.9393	390	-0.6314	0.4402	65.1332	0.8389	1197.2408
7	1.9444	-0.2778	0,8	2.2969	275.8969	430	-0.6313	0.4403	65.5735	0.7457	1197.9865
6	1.6667	-0.2778	0,8	2.2557	275.8557	496	-0.6312	0.4403	66.0138	0.6525	1198.6390
5	1.3889	-0.2778	0,8	2.2155	275.8156	626	-0.6312	0.4404	66.4542	0.5593	1199.1983
4	1.1111	-0.2778	0,8	2.1766	275.7766	630	-0.6311	0.4405	66.8947	0.4661	1199.6644
3	0.8333	-0.2778	0,8	2.1387	275.7387	635	-0.6310	0.4405	67.3352	0.3729	1200.0373
2	0.5556	-0.2778	0,8	2.1020	275.7020	640	-0.6309	0.4406	67.7758	0.2796	1200.3169
1	0.2778	-0.2778	0,8	2.0664	275.6664	700	-0.6308	0.4406	68.2164	0.1864	1200.5033
0	0	-0.2778	0,8	2.0320	275.6320	750	-0.6307	0.4407	68.6571	0.0932	1200.5965



Railway line capacity methods analysis and their application in “Lithuanian Railways” justification

Larisa Valentinovič^a, Henrikas Sivilevičius^b

^aAB “Lietuvos Geležinkeliai” Railway Infrastructure Directorate. Traffic Management Systems Care Center engineer affiliation, Geležinkelio str.16, Vilnius LT-02100, Lithuania

^bVilnius Gediminas Technical University, Faculty of Transport Engineering, Department of Transport Technological Equipment, Plytines str.27, Vilnius LT-10105, Lithuania

Abstract

This article is aimed at analyzing different methods of calculation of railway capacity of lines and applying them in “Lithuanian Railways”, improving efficiency of railroad traffic management by using new and modern technologies, integrated into the new Traffic Management Centre (TMC) and its related systems, allowing the compression of railroad traffic schedule and facilitating conflict resolution during planning time by using new technologies. To assure new traffic prevision for “Lithuanian Railways”, a new calculation method must be used, as today it is being used an old analytical method for capacity calculation on railway line, and this old calculation method does not allow the optimization of the use of the railway network. It is necessary to analyze new programming methods for calculating the train graph and its compression to adopt it in order to optimize the use of the network. This paper will present three methods used for calculating capacity consumption on railway lines and the results of applying one of them, the UIC 406 method, in a practice case. The practice case consist of adding two new trains in an already calculated schedule for the increment of the use of a line, using the new techniques for automatically detect the conflicts that appear after adding these new trains and solving the conflict. This paper will also present the statistical of how passenger’s train demand increases passengers flow.

Keywords: railways line; capacity consumption; train graph; compression of train graph; multiagent solution; iterative application.

1. Introduction

The significance of transport is very high for any branch of economy and is increasingly growing as worldwide globalization takes place when countries situated in different continents are linked with the relationships of trade and free movement of people. Competing with other means of transport, railway transport has to improve the quality of carriage of people and freight. To reach this aim, railway network is being developed, the quality of rolling stock is improved and carriage process is perfected.

Several research studies of passenger transportation by railways were made by Dailydka and Lingaitis [1], Sun and Xu [2]. Different studies by Maskeliūnaitė and Sivilevičius [3], [4] determined that it is very important to have methodology for determining and evaluating of carriage of passengers by different trains that must be based on objective data. As part of studies the General recommendation is the use of multiple criteria model for international train quality evaluation, taking into account that the quality index in the train traffic also depends on the track quality that has a large impact on train parameters that must be taken into account for the increasing of the line [5]. In order to increase the train traffic it is necessary to improve railway line capacity [6]. Li [7] recommended the train routing model and algorithm combined for planning new traffic train graph. Lai [8] described two common capacity evaluation methods: parametric capacity analysis and simulation.

Hu and Lin analyzed the train arrival impact on the frequency of accidents on roads and rail crossings at inclines [9]. Though a number of deaths at level crossings amount to only 2% of the total number of road deaths, it makes 20–30% of the total deaths in Railway [10].

According to recent studies, JSC “Lietuvos geležinkeliai” (further LG) objectives are focused on ensuring the needs of railway transportation up to 2040 and assuring:

- Local habitants needs.
- Transport connections with the EU and other countries.
- Transit transport crossing the territory of Lithuania.
- Railway network capacity increase.

In 2013 LG transported about 4.87 million passengers (more than 1% than in the year 2012). The local passenger transportation volume is 3.8 million, international passenger transportation 520 thousand and transit 543 thousand. According to these data more and more passengers are using the rail transport.

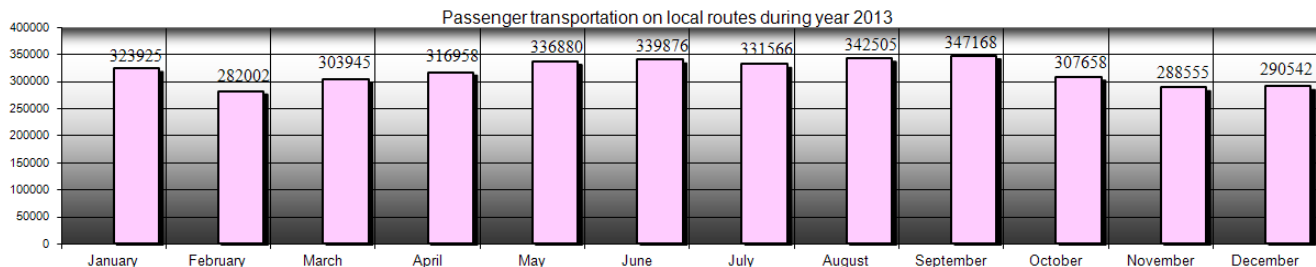


Fig. 1. Passenger transportation on local routes during the year 2013

According to passenger transportation forecast, till 2040, even the pessimistic forecast data demonstrate that the passengers' transportation is expected to be increased by international transportation and local routes (see the forecast data on Table 1 and Table 2). This forecast is supplemented with the fact that the implementation of "Rail Baltica" project and the establishment of new transit passenger terminal in Kaunas (and later in Vilnius), are based on the expectation of an increment in the flow of international passengers, travelling from neighboring and remote Asian countries to Western European countries through the Lithuanian territory [11] (see Table 1. The forecast of international passengers' transportation by Lithuanian Railways till the year 2040 and Table 2. Forecast of local passengers' transportation by Lithuanian Railways on local routes till the year 2040). Therefore it is one of reason to improve Traffic Management.

Table 1. The forecast of international passengers' transportation by Lithuanian Railways till the year 2040

Forecast	2010	2020	2030	2040
Basic	789,6	1 245,2	1 704,4	1 836,6
Optimistic	857,5	1 672,6	2 289,3	2 466,9
Pessimistic	764,1	801,2	985,6	1 177,7
"Black"	735,2	592,9	288,4	44,2

Table 2. Forecast of local passengers' transportation by Lithuanian Railways on local routes till the year 2040

Forecast	2010	2020	2030	2040
Basic	3 278,3	4 713,7	5 523,4	6 129,6
Optimistic	3 560,4	5 474,3	7 350,1	8 958,0
Pessimistic	3 172,6	3 229,8	3 859,1	4 611,6
"Black"	3 093,4	921,7	274,6	81,8

The expected effect in a long-term perspective can be achieved by means of international transportation modernization and acceleration of traffic speed. The improvement of economic relations between Lithuania, neighboring and remote countries also will help in the achievement of this perspective.

For this purpose it is necessary to remodel equipped railway infrastructure, traffic safety organization and control, and make them appropriate for modern trains, flexible schedules, high traffic speed, attractive ticket prices and convenient journey conditions, all of them in coordination with other transport mode and other actuation in the system.

According Luethi building new infrastructures is the most obvious possibility to increase capacity. However, this is expensive and, particularly in bottleneck and station areas, often no longer possible. Therefore, production-based strategies for increasing capacity must be developed (i.e. based on how trains are operated). These strategies essentially allow more trains to be operated on the same infrastructure [12].

According Schobel the design of the railway infrastructure is strongly related with the demand of expected traffic which is defined by a timetable. Therefore, the timetable predicts the infrastructure layout. The timetable is calculated taking into account the topology of the railway network and different time slots that assures the train movement and the safety [13].

In order to increase the number of trains operated, the headway (time) between trains must be decreased. The headway between trains is determined by two components: safety and schedule reliability. The safety component ensures that trains

get separated one from the other with enough distance to prevent collisions. The schedule reliability component is designed to provide reserve (or buffer) time necessary to ensure that trains remain on schedule (i.e. it reduces the impact of delays on system-wide operations).

The process of developing new timetable and communicating them to all affected parties is complex and time consuming. This is why schedule planners add reserve time to timetables. Thereby, three types of reserves were distinguished:

- Reserves for the driving accuracy.
- Reserves for the running times.
- Operational Reserves (reserves between trains) to handle larger delays.

Therefore, reserve time allows both, to reduce the need for rescheduling and to simplify the process of rescheduling. However, reserve time wastes capacity. If it was possible to reduce the amount of reserve, the time network capacity could be increased without constructing new infrastructure. Thus, research about optimizing the amount and distribution of reserves in railroad networks is a key factor of success [12].

The line capacity is also affected by the maintenance type: preventive and corrective. While the first maintenance is scheduled and introduced in the train graph, the capacity of the network is reduced by these trains even more if we take into account that old installation (as actual Lithuanian railway network) requires more preventive maintenance. The second one is unscheduled and can generate conflicts with already scheduled trains that must be solved immediately to assure the rest of the schedule. For these two reasons it is necessary to implement a system that allows the network use optimization and that provides planners with a flexible and powerful conflict resolution module.

Efficient traffic management support systems need to compile actual monitoring data on train positions, headways and detect automatically conflicts between trains in advance, in order to support dispatchers by regularly the actual timetable. Incorporating standard conflicts between only two trains might be solved automatically, whereas route conflicts in heavily occupied networks and complex stations require accurate real-time simulation and optimization of dispatching options according to their expected performance. The effectiveness of different measures may be evaluated and ranked on the basis of the total amount of consecutive delays, links and stations affected and the time to fade out. More detailed, accurate and continuous traffic information with regard to actual deviation from the train schedule, location of trains ahead and occupation and release of block and route sections can help train drivers to anticipate and solve conflicts better [14].

With allowances made for the fact that LG is planning to establish a new TMC in April 2014, new objectives are set, such as railroad traffic organization, railroad traffic schedule optimization, maximum exploitation of railroad infrastructure, freighter's traffic organization strictly in accordance with the schedule, non-standard situations resolution from the single traffic management center and traffic safety insurance.

Solutions to these and other issues may be achieved only by means of technological integration of traffic management systems, which are substantiated by modern informational technologies. The new integrated management system, based on the development and the trends of smart technologies which have become dominant not only in Lithuania, but in the whole world is being created. Therefore supervision and control over the new signalization systems are very important issues in the field of railroad transport.

Main trends proving the need of traffic management system improvement are:

- All new infrastructure projects.
- Improvement of the informational system.
- Priority to the new international routes of various kinds: technological, container-type, cargo type-based and single-operator trains.
- Change of car planning system due to the increased fleet of private cars.
- Work performance improvement.
- Drafting up of a new railway schedule for the trains going by the "Rail Baltica" railways of the European gauge.

The train graph must be created according to the effective capacity for the particular line. In different situations it is possible to use different methods for calculating the railway capacity. The current calculation method used in LG is an old method that must be improved or renewed. The new system uses the UIC 406 methods which the standard UIC leaflet "Capacity" recommends as a procedure to evaluate the infrastructure occupation. It is fast and effective way to evaluate the capacity utilization of railway line. Wahlborg analyzed the capacity calculation according to the UIC capacity leaflet that is broadly used in European Railway companies [15]. Lai described the comprehensive decision support framework, based on three stand-alone tools, for strategic railway capacity planning in North America: "Alternatives Generator", "Investment Selection Model" and "Impact Analysis Module" [16]. In all cases, analytical methods, optimization and simulation are the three general methodologies for the capacity management. According to Zhang, the analytical methods may be a good start for optimization methods and represent a preliminary solution [17]. The optimization and simulation method need to be adapted to each application environment to obtain a desired train schedule and validation.

2. Line capacity calculation, modules and their analysis

Different capacity definitions are used in the railway market:

- "The ability of the Cartier to supply as required the necessary services within acceptable service levels and costs to meet the present and projected demand" – Kahan. 1979 [18].

- “Capacity is the highest volume (trains per day) that can be moved over a subdivision under a specified schedule and operating plan while not exceeding a defined threshold” – Kruger. 1999 [19].
- “Capacity is measured as the count of valid train paths over a fixed time horizon within an optimal master schedule.” – Harod. 2009 [20].
- “The maximum number of trains that may be operated using a defined part of the infrastructure at the same time as a theoretical limiting value is not reached in practice.” – Hancen *et al.* 2008 [21].
- “A unique, true definition of capacity is impossible.” – 2004 [22].

Traditionally in Lithuania the capacity of the railway line is described as follows: “*The maximum amount of freightliner trains of certain mass and length (train-pairs) which can pass this railroad line within a time unit (a day, an hour) with allowances made for railroad line technical equipment and railroad traffic organization method.*”

Railroad line capacity depends on many factors (see Fig. 2. Capacity dependences):

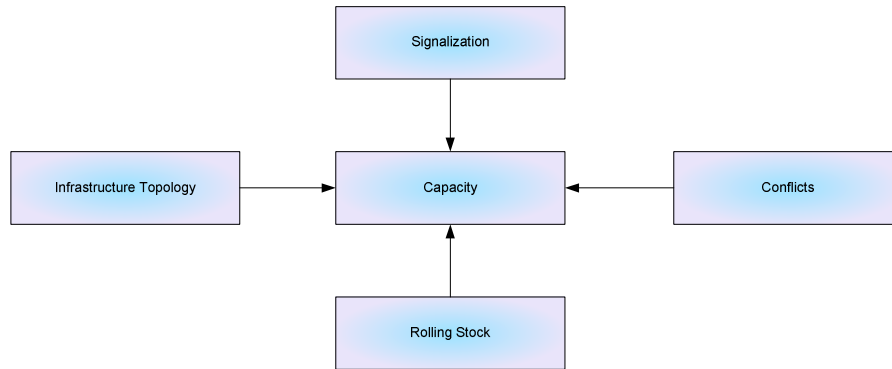


Fig. 2. Capacity dependences

Factors that can affect the capacity of the line, according to Fig. 2 Capacity dependences are:

- Rolling stock has influence on the speed, acceleration and deceleration time.
- Infrastructure topology influences on Railway capacity. Levelling-off of rise and fall, construction of the second way for the single way section between the stations, railway extension allow to increase the capacity of stations and sections between them.
- Signalization equipment. Semi- automatic signalization system allows only one train to be in a lineside and when there is a long distance between station, the one lineblok can cross only be only 2–3- trains in 1 hour. For example, the capacity of the line with a semi-automatic system may be 2–2.5 times smaller than lines with automatic.
- Conflicts may compress traffic trains graph to the point where the average speed drops and correspondingly it reduces line capacity.

2.1. Actual Method

At present, an analytical method is used in Lithuania for calculation of railroad line capacity as described in the methodological literature [23].

The formula for calculating the line capacity in single line with an automatic lineblok (1AB) is:

$$N_{1AB} = \frac{0,4T}{I} \quad (1)$$

The formula for calculating the line capacity in double line with an automatic lineblok (2AB) is:

$$N_{2AB} = \frac{0,85T}{I} \quad (2)$$

where: N – capacity of the line; T – Minutes in a Day (1440); I – minimum interval between the moving trains (minutes).

The calculation of the capacity is based on the calculation of the factor *I* that is the shortest period of time necessary for trains to move in sequence within the sections between the stations and to create conditions for trains to move at the set speeds.

The formula for calculating the factor *I* is:

$$I = 0,06 \frac{(3L_b + L_t)}{V_{vid}} \quad (3)$$

whereas: L_b – inner length of blocking district, (meters); L_t – average length of a train, (meters); V_{vid} – average speed within the railroad district, (km/h); 0,06 – passing rate.

For the calculation purposes, the length of a train shall be selected in accordance with the standard lengths in meters: 850, 950, 1050, 1150 or 1250. Railroad district capacity shall not exceed the capacity of separate districts elements.

During the process of the automatic lineblock system design, stoplights were provided for those which were to be mounted in accordance with the selected interval I . In case of change of operation conditions (moving speeds, locomotive engine type, train mass, etc.), interval I must also be changed. Therefore, due to the modern types of locomotive engine equipment, especially when using electric trains with high moving speeds, interval I between the trains may be decreased to 6–8 min and to 4–5 minutes within the uptown railway regions near the major centres.

2.2. Metro-Train Method

The second analyzed method for increasing the capacity of the line is to use the simple peak and valley time type. This method is based on reducing freight and slowing trains and prioritizing passenger and fast trains during peak time of the day. For example, as the number of passenger trains within the railway district Kazlų Rūda – Kaunas and later Kaunas – Vilnius is planned, we can recommend using the method of “Metro-train schedule” during the peak-hours. It was proven that line capacity depends on the train type (design speed). It is possible to overview and compares two different options. E.g. from 6 am. to 7.30 am. and from 4.00 pm. to 5:30 pm. to allow the passenger trains only. Two schedules will show the difference between the number of trains within the set period.

Next figure (see Fig. 3. Combined schedule versus Metro-Train schedule) reports the comparison in the train graph between the normal scheduled train and the metro-train compression method.

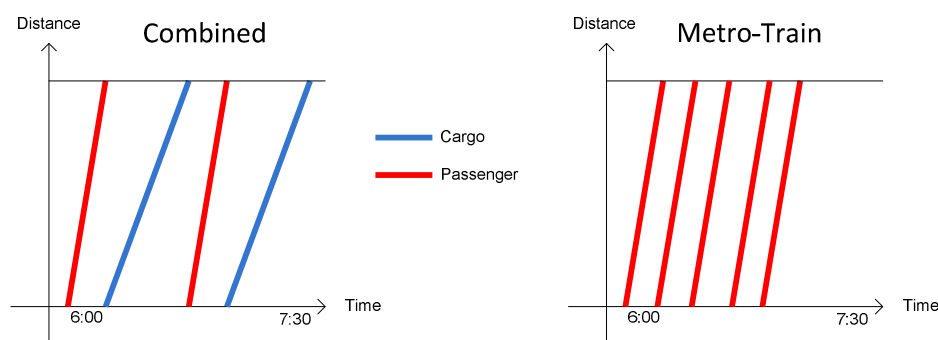


Fig. 3. Combined schedule versus Metro-Train schedule

The advantage of this method is easy to implement and calculate as all trains go at the same speed in double track linesides with automatic lineblock and it is possible to depart trains one after another at the interval of almost two blocks.

The disadvantages is that in Lithuania there is an intensive passenger traffic in the same section and time as the intensive cargo traffic, therefore some wagons may not be moved and delays of locomotives crews and cargo delivery may occur. So it is not recommendable to use of this compression (optimization) method in this case.

2.3. UIC 406 Method

The UIC 406 standard defines a method to measure the available capacity that a railway infrastructure has. This UIC 406 method is widely used (implemented) in the European railways. The capacity is measured by the number of trains that can run along the infrastructure per unit of time. As the UIC 406 standard explains the capacity is influenced by several factors:

- The signaling of the infrastructure.
- The average speed of the trains.
- The stability needed by the administrator in order to avoid huge disruptions in case of minor delays.
- The heterogeneity of the traffic. That means the balance between the number of faster trains and the number slower trains.

The compression process follows under some simple rules:

- All train paths are pushed together up to the minimum headway according to their timetable order, without buffer times.
- The running times, overtaking, crossing, stopping times are not changeable.
- Any occupation time must be incorporated. Also indirect occupation times (times occupied and not available for further train paths).

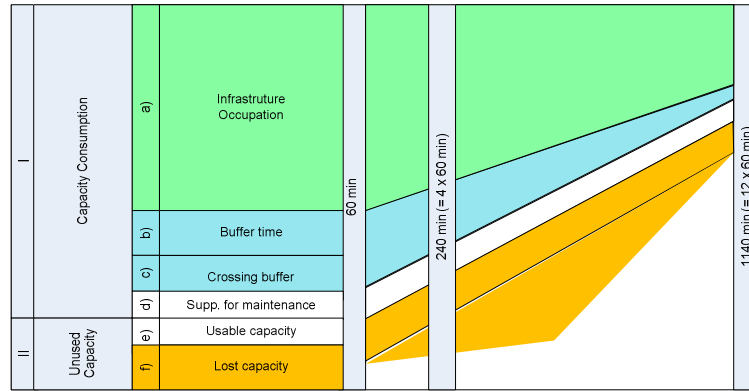


Fig. 4. Determination of capacity consumption – UIC 406 R [24]

The capacity consumption is the sum of the infrastructure occupation and the buffer time (plus other supplements) as it is shown in the drawing on Fig. 4. Determination of capacity consumption – UIC 406 R [24]. It may be determined on the basis of compressed timetable, using the following formulas [25]:

$$K = \frac{k}{U} \cdot 100 \quad (4)$$

and

$$k = A + B + C + D \quad (5)$$

where: K – capacity consumption (%); U – chosen time window (minutes) (parts I+II in Fig. 4 Determination of capacity consumption – UIC 406 R); k – total consumption time (minutes); A – infrastructure occupation (minutes); B – buffer time (minutes); C – supplement for single-track lines (minutes); D – supplement for maintenance (min).

The compression process is applying for:

- Help of the optimal planning of trains during the long time maintenance infrastructure work.
- Improving the utilization of the railway infrastructure.
- Unscheduled trains planning.
- Optimized turnover of the rolling stock and the crew.

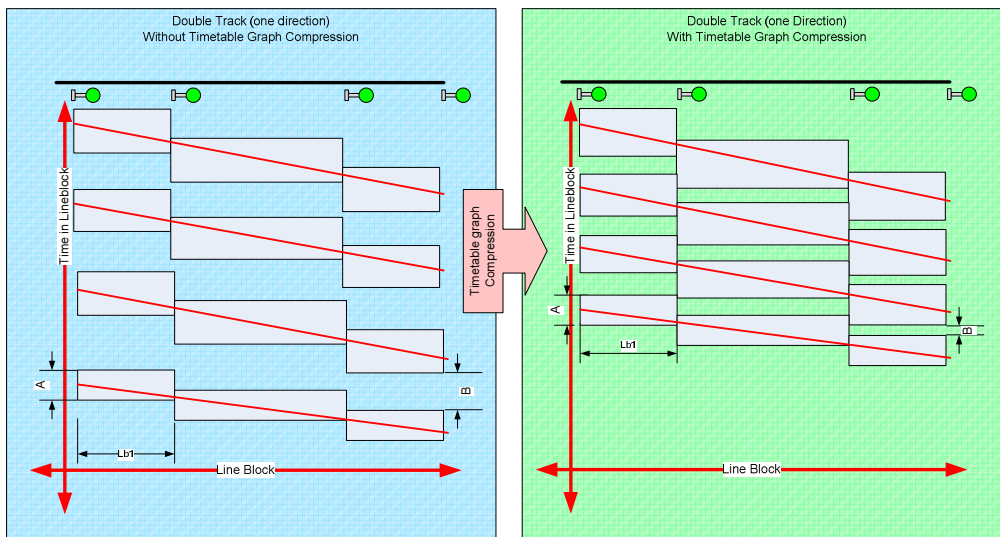


Fig. 5. Double track compression [26]

The result of the compression can be analyzed in Fig. 5. Double track compression [26]. In the picture it can be distinguish between the train graph before the compression and after the compression method have been applied.

3. Method Implementation

3.1. Method Implementation

For the implemented UIC 406 method it is necessary to split the development into several modules. Some of the modules have been drawn in Fig. 6. Modules implementation.

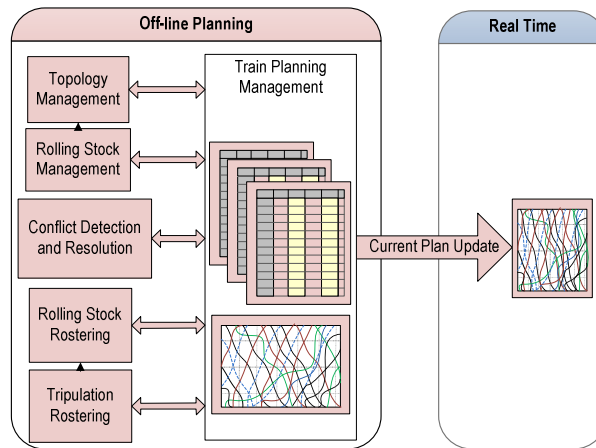


Fig. 6. Modules implementation

In the above mentioned Figure the system is divided into different modules for the Off-line Planning environment:

- **Topology module.** – This module maintains the topology of the railway network updated according to the installation (curves, slopes, distances, etc).
- **Rolling Stock Management Module.** It is – a subsystem, making it possible to introduce the properties of locomotives, wagons, electric trains and self-propelled vehicles into the system, and to perform their connection (create train compositions).
- **Conflict detection and resolution module.** It is – one of the most important real-time modules. It helps in automating solutions due to the increase of passenger trains intensity and speed, non-standard situations will become more complicated and demand faster and more efficient conflict settlement. Human factor must be minimized.
- **Rolling Stock rostering module.** – This module analyzes the availability of the different rolling stock in a similar way to Topology module.
- **Tripulation rostering module.** – This module is similar to Rolling Stock but related with tripulation.

3.2. Modules Development.

New development techniques are based on distributed software that allows modules to work as separate agents. The multiagent technique is based on the use of different agents that works separately for obtaining the final result.

Agents may interact in this way making a multiagent system. Thereby they may perform complicated, multifold tasks and perform specialized functions more efficiently. The multiagent systems face strict requirements, as their abilities of perception, initiative, communication, etc. must be as similar to the human ones as possible. It is especially important for the information business as customers are looking only for that information which appears important to them. It must be updated, precise and useful, adapted for different purposes. The multiagent systems must be useful, consumer-oriented and, of course, reliable, possessing the property of learning capacity and the ability to adapt to constantly changing consumer objectives and environment.

One of the multiagent system purposes in railways is that it helps managing devices, adopts decisions independently, without human interference.

During the conflicts, when it is necessary to repeatedly check the changes in the railway traffic, an interactive method is used. E.g., if the railway traffic replanning is needed, – the system uses the response-to-situation function within the system, and the situation improves at every remove.

During the first step the system coarsely calculates the railway traffic schedule, planning only the way, including the locking districts to be passed by the trains (at this step a conflict in the actual schedule is possible, where two different trains may pass the same locking district). During the second step the system identifies the conflicts and solves them in accordance with the railway traffic priorities. During the third step optimal railway traffic schedule with all delays in complicated situations is drafted up in accordance with the railway traffic priorities. The second and the third steps are repeated till the system recalculates and drafts up the railway traffic schedule, which would satisfy all traffic and safety requirements. It is always possible to change railway traffic priorities, forcing the system to calculate the railway traffic. In accordance with

the schedule, automated systems may allow minimizing the distance between the trains and let pass additional trains thus and consequently increasing the district capacity.

3.3. Analysis of potential impact of non-standard situations on the valid schedule.

Any discrepancy from the valid schedule may be called – “Non-Standard Situation”.

The system is aimed at overviewing and correcting railroad traffic schedule timely and rationally. It is especially important to adapt the function of electronic schedule correction in the intense-traffic lines which are run and will be run by express passenger trains. On all occasions when it is necessary to change (compress) the railroad schedule, first of all, there is an employee in charge of drafting up the schedule who must analyze it according to visual data, if theoretically it is possible to include an additional train into the basic schedule. After the analysis follows next task to add a new train for the same route with all new information related to the new train as speed, mass, and other main information related with the route (station, times to stop, etc.). Then the planning module uses all the provided information for a precise and correct calculation of the train's route. The analysis is conducted and provided with two different railway schedules. The first one is valid, the other one is provided with the compressed railway schedule allowing to insert two more passenger trains moving at an increased speed.

For this analysis a train traffic schedule in the section Jiesia – Kazlų Rūda is used, in the time range starting at 15:30h (see

Fig. 7. Actual train graph). The analysis consists of trying to insert two fast trains circulating to another country from the west European countries.

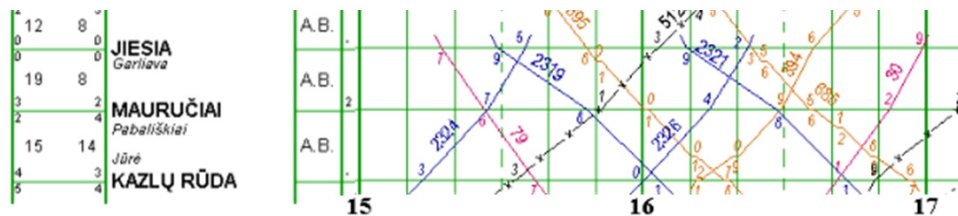


Fig. 7. Actual train graph

The first fast train, TEST1, passes Jiesia at 15:25 h. The next scheduled train, 2319, passes Jiesia at 15:29 h. The system calculates that it will take 7 minutes for the fast train to go from Jiesia to Mauručiai, running at 140km/h. However, the train graph displays that there would be a conflict with the following train 2319. The conflict is displayed in an orange rectangle indicating the conflict type (see Fig. 8. Conflict detection and Fig. 9. Time schedule with detected conflict).

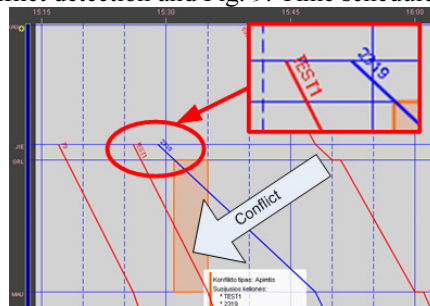


Fig. 8. Conflict detection

Tvarkaraštis Kelionė: Kelionė 1										
Identifikacija				Apskaičiuoti laikai				Priimti laikai		
Tipas	Traukinio numeris	Mazgo kodas	Mazgas	Distancija (hm)	Mažiausias laikas	Bazinis laikas	UIC	Laiko tipas	Maršruto/keleivinis sustojimas	Techninis sustojimas
TEST1	TEST1	12311	Jiesia							00:00
		12320	Mauručiai	109	04:41	06:21		07:00	07:00	
		12340	Kazlų Rūda	176	07:33	09:43		10:00	10:00	

Fig. 9. Time schedule with detected conflict

The minimum time between Jiesia and Mauručiai consist of 04:41 minutes, without recovery margins, supplementary margins, infrastructure speed limits or technical limitations of the rolling stock. Therefore it is valid if in this lineside we reduce the time to 5 minutes (see Fig. 10. Time reduction). The blue colour on the table informs the planner that the time for this lineside is shorter than the basic time. The system allows solving the conflict automatically or manually.

Tvarkaraštis Kelionė: Kelionė 1										
Identifikacija				Apskaičiuoti laikai				Primti laikai		
Tipas	Traukinio numeris	Mazgo kodas	Mazgas	Distancija (km)	Mažiausias laikas	Bazinis laikas	UTC	Laiko tipas	Maršruto/keleivinis sustojimas	Techninis sustojimas
TEST1		12311	Jiesia							00:00
				109	04:41	06:21		07:00	05:00	
		12320	Mauručiai							
				176	07:33	09:43		10:00	10:00	
		12340	Kazlų Rūda							

Fig. 10. Time reduction

After reducing this lineside time we eliminate the conflict for the first fast train TEST1. In a similar way the second fast train TEST2 is inserted in the traffic schedule. The next picture (Fig. 11. Final result) shows the traffic train graph with the two additional fast trains inserted, as the result of applying compression methods.

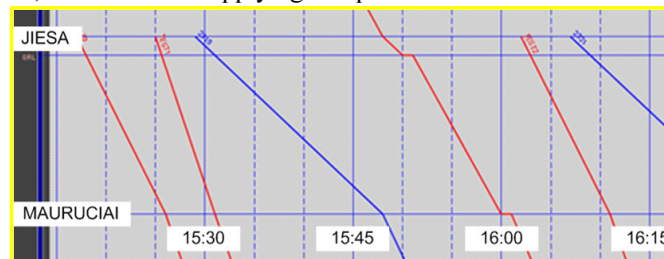


Fig. 11. Final result

The results after the analysis and compression made for both trains are entered in Table 3. Current timetable and Table 4 Timetable after compression.

Table 3. Current timetable

Station	Tr. Nr 79	Tr. Nr 2319	Tr. Nr 695	Tr. Nr 2321	Tr. Nr 685
Jiesia	15.17	15.29	15.48	16.09	16.23
Mauručiai	15.26	15.48	16.01	16.28	16.35

Table 4 Timetable after compression

Station	Tr. Nr 79	Additional Test1	Tr. Nr 2319	Tr. Nr 695	Additional Test2	Tr. Nr 2321	Tr. Nr 685
Jiesia	15.17	15.25	15.29	15.48	16.03	16.09	16.23
Mauručiai	15.26	15.31	15.48	16.01	16.11	16.28	16.35

4. Conclusions

Rapidly growing passenger carriage volumes demand new passenger carriage routes and schedules. A valid railway traffic schedule may change several times a year. The new TMC will have the function allowing compressing the valid railway traffic schedule.

Improvement and modernization of the transport sector of Lithuanian Railways, part of them is the establishment of a new TMC, will assist in a better integration to the EU transport system. As soon as the “Rail Baltica” project is finished, the train traffic speed can be increased up to 160 km/h. Technical properties of the new generation of passenger trains will ensure keeping high speed but this new situation will have a direct impact of the line capacity. Intense railway districts could be passed by a bigger number of passenger trains. The new technology used for train planning will ensure traffic efficiency and flexibility, infrastructure capacity will be improved and the inner speeds can be increased. The new TMC will not only strengthen the position of LG in the transport systems of the nearest countries, but will also keep up its competitive ability in the Baltic States.

In this regard, the objective of the current study is to provide an analysis between the old (Eastern) line capacity calculation method and the European UIC 406, and CUI Timetable Compression Methods. As concerns highly increased passenger trains volumes within the territory of Lithuania (especially within the railway district Vilnius-Kaunas), the “Metro-train” method is acceptable when used in respect of peak hours.

The analysis for the purposes of increasing of Kazlų Rūda-Kaunas line capacity was also conducted. Two new trains which will run on routes Vilnius-Kaunas-Warsaw and Vilnius-Kaunas-Berlin once the “Rail Baltica” is implemented were added to the actual schedule. The example shows that the new system is able to calculate the train schedule nearer to the

minimum mark (decrease the buffer time). The new System also informs the planner about the risks of the traffic safety and does not let decrease the acceptable speed below a certain limit.

The article provides the description of a new multiagent system, which will put together the main functions of the TMC improvement. Every module works individually as a separate agent, but the final result comes down to a single real-time module, which will implement the main organization of railway traffic management.

The new System based on multiagent development procedures will: shorten the response period, increase flexibility and operational efficiency when adopting decisions in case of unplanned events. It will also increase the efficiency of infrastructure use, decrease human intervention when replanning railway traffic and ensure traffic safety.

Therefore time for adding new trains in an traffic train graph already calculated, is reduced as the new method together with the use of technologies help planner to: calculate new schedule, determine possible conflicts, offer to planner different solutions for each conflict and recalculate new schedule.

References

- [1] Dailyka, S.; Lingaitis, L.P. 2012. A study on the options of means for railway passenger transportation, *Transport Problems-Problemy Transportu* 7(1): 53–62.
- [2] Sun, Y.; Xu, R. 2012. Rail transit travel time reliability and estimation of passenger route choice behavior. Analysis using automatic fare collection data, *Transportation Research Record* 2275: 58–67. <http://dx.doi.org/10.3141/2275-07>
- [3] Maskeliūnaitė, L.; Sivilevičius, H. 2012. Expert evaluation of criteria describing the quality of travelling by international passenger train: technological, economic and safety perspectives, *Technological and Economic Development of Economy* 18(3):544–566. <http://dx.doi.org/10.3846/20294913.2012.710178>
- [4] Sivilevičius, H.; Maskeliūnaitė, L.; Petkevičienė, B.; Petkevičius, K. 2012. The model of evaluating the criteria, describing the quality of organization and technology of travel by international train, *Transport* 27(3): 307–319. <http://dx.doi.org/10.3846/16484142.2012.724448>
- [5] Xu, P.; Sun, Q.; Llu, R.; Wang, F. 2011. A short range prediction model for track quality index. Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers, Part F, *Journal of Rail and Rapid Transit* 225(3): 277–285. <http://dx.doi.org/10.1177/2041301710392477>
- [6] Sameni, M. K.; Preston, J. 2012. Value for railway capacity assessing efficiency of operators in Great Britain, *Transportation Research Record* 2289: 134–144. <http://dx.doi.org/10.3141/2289-18>
- [7] Li, F.; Gao, Z.; Wang, D.Z.W. 2013. Train routing model and algorithm combined with train scheduling, *Journal of Transportation Engineering* 139: 1. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000461](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000461)
- [8] Lai, Y.-C.(R.); Liu, Y.-H.; Lin, T.-Y. 2012. The Development of Base Train Equivalents to Standardize Trains for Capacity Analysis. *Transportation Research Record* 2289:119–125. <http://dx.doi.org/10.3141/2289-18>
- [9] Hu, S.-R.; Lin, J.-P. 2012. Effect of train arrival time on crash frequency at highway-railroad grade crossings. General classification regression model, *Transportation Research Record* 2298: 61–69. <http://dx.doi.org/10.3141/2298-07>
- [10] Gailienė, I.; Skerys, K.; Ciparytė, G. 2013. Investigation of traffic safety situation at the level crossings in Lithuania, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 8(2): 117–123. <http://dx.doi.org/10.3846/bjrbe.2013.15>
- [11] Griškevičienė, D.; Griškevičius, A.; Griškevičiūtė-Gečienė, A. 2011. Peculiarities of passenger flows forecast on the reduced market conditions, in *selected papers of the 8th International Conference "Environmental Engineering"* 3: 898–904.
- [12] Luethi, M.; Nash, A.; Weidmann, U.; Laube, F.; Wuest, R. 2007. Increasing Railway Capacity and Reliability through Integrated Real-Time Rescheduling, in *Proceeding of the 11th World Conference on Transport Research*. Berkeley.
- [13] Schobel, A.; Besau, G.; 2012. Timetable Based Design of Railway Infrastructure, in *20th International Symposium*. Žilín
- [14] Hansen, A.; 2009. Railway Network Timetabling and Dynamic Traffic Management, in *selected papers of the 2th International Conference on Recent Advances in Railway Engineering*, 135–145.
- [15] Wahlborg, M. 2004. Banverket experience of capacity calculations according to the UIC capacity leaflet, *Computers in Railways IX*: 665–673.
- [16] Lai, Y.-C.; Barkan, C. P. L. 2011. Comprehensive decision support framework of strategic railway capacity planning, *Journal of Transportation Engineering* 137(10): 738–749. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000248](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000248)
- [17] Zhang, J.; Han, B.; Nie, L. 2011. Research on capacity calculation and assessment framework for Chinese high speed railway based on UIC 406, *Journal of System and Management Sciences* 1(6): 59–75.
- [18] Kahan, A. M. 1979. Railway capacity analysis and related methodology, *Canadian transport commission*: Ottawa/Hull, Canada.
- [19] Krueger, H. 1999. Parametric modelling in rail capacity planning, *Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference*, 1194–1200.
- [20] Harrod, S. 2009. Capacity factors of a mixed speed railway network. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 45(5): 830–841. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tre.2009.03.004>
- [21] Hansen, I. A.; Pahl, J. eds. 2008. *Railway timetable and traffic*. Eurailpress: Hamburg.
- [22] UIC. 2004. *Capacity (UIC code 406)*. International Union of Railways (UIC): Paris, France.
- [23] Petrenko, V. 2012. *Geležinkelio eismo sauga: praktinių darbų metodikos nurodymai*. Vilnius Gediminas Technical University. Vilnius: TECHIKA. ISBN 978-609-457-196-1. <http://dx.doi.org/10.3846/1303-S>
- [24] Landex, A. 2008. *Methods to estimate railway capacity and passenger delays*, in Department of Transport. Technical university of Denmark: Kgs. Lyngby.
- [25] Stock, R. 2008. *Estimation of railway capacity consumption using stochastic differential equations*. University of Trieste.
- [26] Landex, A.; Kaas, A.H.; Jacobsen, E.M.; Schneider-Tilli, J.; 2007. The UIC 406 capacity method used on single track sections, in *Proceeding of the 2th International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis*, eds. I.A. Hansen, A.Radtke, J.P. Pahl, E. Wendler, Germany.

Development of the train traffic regulation method for “Rail Baltica” line based on the implementation of the European Train Traffic control systems

Larisa Valentinovič¹ and Henrikas Sivilevičius²

*Vilnius Gediminas Technical University, Faculty of Transport Engineering, Department of Transport Technological Equipment,
Plytines str 27, Vilnius LT-10105, Lithuania*

E-mails: ¹larisa.valentinovic@gmail.com ; ²henrikas.sivilevicius@vgtu.lt

Abstract. This article focuses on analyzing the systems and methods used for the interval regulation of train movement on “Rail Baltica” line in “Lithuanian Railways”. The method discussed in the article can be viewed as a combination of several management automation solutions and it is based on the implementation of the European Railway Traffic Management System (ERTMS). As it is known, the ERTMS provides an interoperable European railway network. The primary objective is to improve the quality of train traffic and to make railway transport safer and more comfortable. In order to ensure new traffic prevision for Lithuanian Railways, new interval regulation methods and traction calculations must be used. This developed method is more useful than the previous methods as it allows to shape an efficiently automated and optimized scheduling process as well as to improve line capacity and efficiency. This paper proposes the development of a moving block train control system. The calculations were made using the intervals between trains. The interval and block-section borders are not fixed by traffic signs or traffic-lights. Instead, they move after the train in the front, creating a flexible interval regulation system. The results showed that the implementation of the method had a positive impact on the operators’ performance and allowed to reduce energy consumption and to increase the speeds of train movement. The paper also presents a statistical figure portraying railway accidents and railway operation accident reports before and after the implementation of the ERTMS. The results of the analysis showed that the implementation of the European Train Traffic control systems and the interval regulation of train movement method will provide high throughput and carrying capacity, traffic safety and also increase the productivity of operation procedures.

Keywords: railway line, capacity, management automation solution, scheduling process, method of interval regulation.

Conference topic: Roads and Railways.

Introduction

Along with the increasing speed of trains, the risk to make mistakes in the management of train traffic also increases. It is obvious that the human factor takes almost the first position in the list of risks. The current traffic management systems in Lithuania are not prepared for the management of trains faster than 160 km/h. Therefore, there has to be traffic management system updated along with the signalling system. Relevant engineering projects require a special accent for the integrity of the parts of the project (Stapelberg 2009). For instance, scientific studies constantly force to update the specifications of the European Railway Traffic Management System standards and improve the reliability in the contemporary systems of trains (Flamini *et al.* 2012). At the time of the analysis of transportation planning and modelling problems, transportation economic and social solutions (Ortuzar, Willumsen 2011), there are the most important transportation modelling methods, their practical importance and the selection of the most suitable modelling tools presented.

The use of the latest European carrier road is very relevant to the passengers. They are in need of fast communication which may be ensured only after the installation of the effective train traffic management system. If the ERTMS system were installed as fast as possible, the time of travelling of trains from Kaunas to Poland in the distance of 123 km would be shortened till 1 hour. ERTMS would also ensure the full functioning of the public logistics centre of Kaunas and already constructed “Rail Baltica” railway. This will allow to ensure the smooth, timely schedule of trains with no additional checks or settings by national compatible networks. ERTMS (ETCS+GSM-R) systems ensure

a maximum effect for the smaller amount of investment costs in comparison with traditional signalling systems. The general reply from European and other countries about installed the European Railway Traffic Management System is that so after the certain working time they reach a sufficient level of reliability, at least such as traditional signalling system. This may be achieved by intensive testing and improvement using programmes including both the manufacturers and managers of infrastructures. At the time of the study of the scientific works it is to be noticed that after the installation of ERTMS system in other railways of Europe, the indicators of reliability and safety would further increase. Organizations should provide the necessary training to their employees after Global System for Mobile Communication – Railways (GSMR-R) implementation in order to maintain their operational capabilities. At the time of the analysis of 74 events which took place in 14 European countries from 1998 till 2011 (Smith *et al.* 2013), there have been conclusions drawn that the obtained result indicates the positive effect of the GSM-R system. There has been only one event of the failure of GSM-R system from 11 events due to the fault of automatics, signalling and connections. The transition to a more automated traffic management system requires, among other things, changes to infrastructure, rolling stock, and operational procedures. The new systems will strengthen the safety in the railway crossings. It is essential to implement the projects of installation of the safety systems, based on the latest technologies. Despite the fact that the number of deaths in the rail road's amount only about 2 percent of the general number of deaths on the roads, but it amounts to 20-30 percent of all deaths on the rail roads (Gailienė *et al.* 2013). At the time of the increase of the intensity of the train traffic, it is vital to improve the permeability of the rail road lines (Smeni, Preston 2012). Therefore, there have been train permeability models and algorithms provided, which are suitable for the conclusion of the schedule of the train traffic (Li *et al.* 2013). Along with the introduction of automatic trains and ERTMS level 3 systems, the traffic interval adjustment algorithm optimizes and shows a higher level of exploitation efficiency. Centralised automatic control algorithms (Baranov *et al.* 2012) and imitation modelling establishes that their exploitation allow the decrease the number of unexpected stops in the inter station of the railway to the minimum, the outage of trains and the consumption of electricity to 3-9 percent. One of the main indicators of train traffic organisation is the permeability of the lines. Analysed methods of determination of the permeability is analytical (the determination of the necessary and current railway line) and iterative (by compaction of train traffic schedule when there are the methods of programming technology). Their comparison determines the fact that the automatized control of the traffic, the execution of the schedule and solution of conflict situations using the programming technologies, increase the permeability of the railway lines and ensure the requirements of the traffic safety (Valentinovič, Sivilevičius 2014).

Train scheduling is one of the most important and complex elements in the planning process for railway operation. The Two-stage hybrid method was presented (Jong *et al.* 2013). Experimental results demonstrated that this hybrid method not only improved the efficiency of the solution substantially but also provided better timetables compared with the current practice. In the process of train operation, the interaction between train wheels and railway track underneath leads to changes in track geometry. Changes in track geometry result in track irregularity. For managing the mean value of track irregularity is used track quality index (TQI) to quantify track irregularity of a unit track section. TQI is used for planning and scheduling railway track maintenance (Hu *et al.* 2013). The Time rescheduling algorithm based on Mixed Integer Programming was presented (Sato *et al.* 2013). The objective function is calculated on the positive difference between the inconveniences which each passenger suffers on his/her route in a rescheduled timetable and that in a planned timetable. Application of automatic fare collection data were investigated, with a focus on analysis of travel time reliability and estimation of passenger route choice behaviour (Sun Xu 2012).

The "Rail Baltica" project aims to lay a new 1435 mm wide European standard railway line across the Baltic States, replacing the old 1520 mm Russian railway line and providing South-North oriented integration into Europe's railway infrastructure. One of the most important aspects of European 1520 mm rail systems is the high level of existing interoperability with third countries. The installations of new signaling system extend technical collaboration between railway specialists of Baltic States. All requirements are important and one of them is the regulation of train traffic.

The European Train Control System (ETCS), a train control standard, based on in cab equipment able to supervise train movements and to stop it according to the permitted speed at each line section, along with calculation and supervision of the maximum train speed at all times. Information is received from the ETCS equipment beside the track (Balises or radio) depending on the level of operation. The objective of Automatic Train Protection System (ATP) is to constantly monitor the train speed, and compare it to the maximum values that are sent by trackside signalling. This communication that is needed between onboard and trackside, will be provided by means of Balises or by Global System for Mobile Communication – Railways radio connection. GSM-R is the second ERTMS system, the European radio communications standard for railway operations. Based on GSM radio technology, GSM-R uses exclusive frequency bands to communicate the train with traffic control centres, devices beside the track. The analysis identified the factors that have the most significant influence on human performance in the conventional and upgraded railway systems. The analysis result showed that the implementation of GSM-R has had no negative influence on operator performance. In particular, no personal or personal dynamic railway performance-shaping factors were identified as contributing factors to railway accidents and incidents after the implementation of GSM-R (Smith *et al.* 2013).

Therefore, the European Railway Traffic Management System is the European standard for such an ATP that achieves interoperability throughout Europe. Indeed, it allows a train equipped with an ERTMS onboard device made by any supplier to run on track sections equipped with the European Railway Traffic Management System devices

made by other suppliers. This also implies the ability for any onboard equipment installed on any train to behave in exactly the same way under the same circumstances. The European Railway Traffic Management System does not cover all traffic management functions.

European Union agency for railways has the following the ERTMS definitions. The European Rail Traffic Management System project has been set up to create a unique signalling and communication standard throughout Europe.

The Control – Command and Signalling Subsystem is defined as all the equipment necessary to ensure safety and to command and control movements of trains authorized to travel on the network. The Control Command and Signalling Subsystem is divided in to two parts: Onboard Assembly and Track side Assembly. The TSI Control Command and Signalling specifies only those requirements which are necessary to assure the interoperability of the train European rail system and the compliance with the essential requirements. The Control Command and Signalling subsystem includes:

- Train protection.
- Radio communication.
- Train detection.

Within each of the above items two classes are defined:

- Class A: The unified Control-Command and Signalling functions, interfaces and performances, specified in this TSI.
- Class B: Control-Command and Signalling functions, interfaces and performances existing before the entry in force of this TSI, under the responsibility of the corresponding Member State. The Class A train protection system is ERTMS/ETCS whilst the Class A radio system is GSM-R.

For Class A train detection, this TSI only specifies the requirements for the interface with other subsystems. For Class B train protection, Specific Transmission Modules (STMs) installed on board allow a train equipped with ERTMS/ETCS to operate on lines fitted with Class B train protection systems.

On-board ERTMS/ETCS functionality. The Basic Parameter for ERTMS/ETCS on board functionality describes all of the functions to run a train in a safe way. The primary function is to provide automatic train protection and cab signalling:

- Setting the train characteristics (e.g., maximum train speed, braking performance).
- Selecting the supervision mode on the basis of information from track-side.
- Performing odometer functions.
- Locating the train in a co-ordinate system based on Eurobalise locations.
- Calculating the dynamic speed profile for its mission on the basis of train characteristics and of information from track-side.
- Supervising the dynamic speed profile during the mission.
- Providing the intervention function.

Moving block systems are able to increase line capacity and improve traffic fluidity, and thus, energy efficiency. In comparison with traditional fixed block systems, moving block systems are able to offer higher availability, reliability and safety in railway operations due to the distinctly different system configuration and component used in the approach (Wang *et al.* 2014).

There are reviewed Cab Signaling with Moving Block and Cab Signalling with Fixed Block sections. The main reason for having fixed block sections on lines with cab signaling is the need for the checking of the completeness of the trackside train. The main difference from a fixed block system with line side signals is the independence from the approach distance of the line side signal system, is the distance between the signal at the entrance of the block section and the signal in rear that provides the approach indication. The approach time is no longer the running time between these two signals but the running time within the real braking distance based on the supervision curves of the cab signal system. On the lines with Cab Signalling with Moving Block the length of the block sections is reduced to zero. It means that the running time between the block signals will be eliminated. But all other components of the blocking time can also be found in moving block. On most lines, the sum of these other components is much greater even then the part of the blocking time that can be eliminated by moving block. That is why, in comparison with fixed block operation with short block section, moving block will just lead to a moderate improvement of capacity.

The difference from a line with fixed block sections is that only the ‘steps’ of the blocking time stairway will be eliminated. The blocking time diagram will be transformed into a continuous time channel (see Fig. 1).

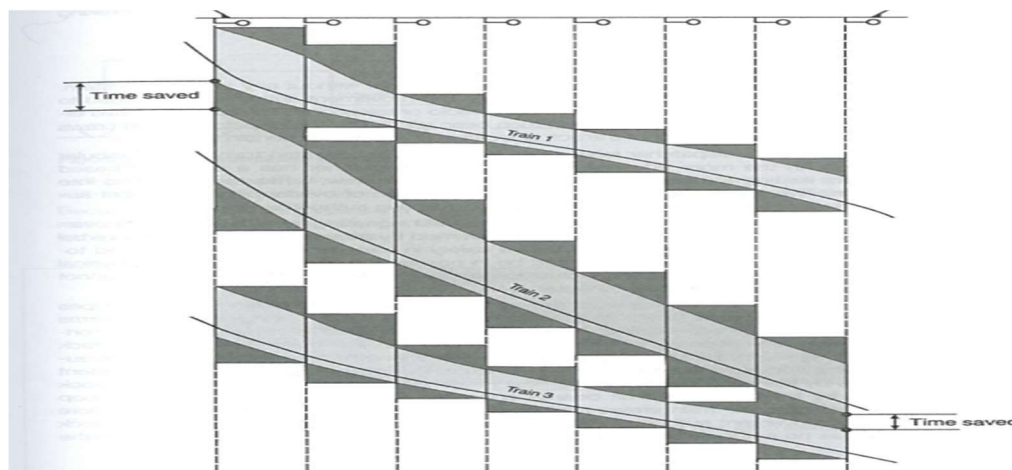


Fig. 1. Blocking time of moving block, in comparison with fixed block.

On lines with mixed traffic of trains running at different speeds, the possible improvement is almost negligible.

Moving block, as explained above, is also called train separation in absolute braking distance. Relative braking distance means that the distance between two following trains equals the difference of the braking distances of the trains plus an additional safety distance. Therefore, the braking distance of both trains must be calculated with braking curves as a function of speed. Train separation in relative braking distance leads to a maximum of the line capacity (Theeg, Vlasenko 2009). Recently, along with the beginning of the integration of automatized traffic management systems, it has been noticed that the navigation systems, which automatically control the trains and centralised train traffic management allow the minimisation of the basic criterion of the exploitation of the resources: the breaking power, failures of signalling and fuel costs. It also improves the usage of recuperation, comfort of passengers, and increases the permeability of the lines and the comfort of passengers (Kondo 2010).

Innumerable studies have contributed to the energy efficiency in train control. The developed algorithm (Vikulina, Sverdlin 2016) of automated train control produces an intelligent control sequence which provides an energy efficient trip. The track profile inclines are taken into account, consumed and recuperated energy is computed. The design of the autopilot with a feature of energy optimality is under discussion and consideration for now. Rough theoretical estimations have shown savings of consumed energy up to 14.5 % as opposed to manual driving. One of the main parts of the ERTMS is the Global System for Mobile Communications-Railway. GSM-R is a telecommunications system specific to railways, endorsed by the International Union of Railways and specified through functional and system requirements (UIC 2016).

Traction calculation, methods and analysis

The new signaling systems are set new objectives, such as railroad traffic organization, railroad traffic schedule optimization, and maximum exploitation of railroad infrastructure. In existing system we could review implementing traction calculations and arrangement of three-aspect automatic block signals in section Šiauliai-Klaipėda, the following train categories are used as main:

- Loaded cargo trains, with a speed up to 80 km/h, weight norm 6000 t.
- Suburban and passenger trains with the speed up to 120 km/h, weight 1000 t.

Examination of block section length, when there is three-aspect automatic block system, was implemented according to the conditions of safe train run, regarding the calculations of braking distances of above mentioned train categories. When calculating braking distances of proposed train categories, the minimum brake press is planned for each 100 tone of train weight in section Šiauliai-Klaipėda, calculating for cast-iron slippers, set according to norm of train movement schedule of the year 2000-2001. Calculation auto block intervals between trains are 8 min. and cargo trains are considered as a calculation object.

The setting of interval between trains is executed regarding the limits of train in the same direction:

- In line side – by three block sections and protective section.
- Leaving the station, also in stop areas (stations and platforms) – by two block sections and protective section.

The separation scheme of trains in order to set intervals between trains when there is three-aspect auto block system with protective sections. Interval between trains according to the time is 0, 3 min. when setting intervals between trains leaving the station, also in stop areas. It is compulsory in:

- Station – because of aspect change acceptance in exit signal and movement start of a train.
- Line side stop areas – because of line side signals acceptance and because of train running unevenness.

In addition, when setting intervals between trains for intercity trains in stop areas, interval includes intercity train stops at the platform.

Traction calculation is executed according to traction calculation rules for train operation of two train run modes on the even track profile:

- Rational (optimal) – because of setting of movement time in line side and auto block intervals between trains.
- Forces (maximal) – because of braking distances in block sections examination with maximal calculated speed.

The length of each block section shouldn't be shorter than braking distance during the complete ordinary brake and running in maximal speed. Also, block section shouldn't be shorter than braking distance during the sudden brake with indicated speed.

After the implementation new signalization in the "Rail Baltica" line, previous braking systems calculation should be changed. The railroad vehicles must be equipped with a group of components: onboard computers, special hardware and software. ETCS onboard computer must predict the decrease of the train speed in the future, from a mathematical model of the train braking dynamics and of the track characteristics ahead. This prediction of the speed decrease versus distance is called a braking curve. From this prediction, the ETCS on-board computer calculates in real time braking distances, which will also be used to assist the driver and to allow him to drive comfortably, by maintaining the speed of the train within the appropriate limits. The European Union Agency for Railways proposes documents which are mainly intended to give a high level description of the ETCS braking curves to people outside the ETCS community. The "Lithuanian Railways" systems integrates to the European railways system and a number of strategies and technologies have been implemented or and being developed to reduce the risk. ETCS braking systems have never described in an existing system in Lithuania. So, preliminary methodology is developed to estimate frequently asked questions: how is to fully harmonize the ETCS braking curves and why it has been so difficult and controversial. The main reason is the clear split of responsibility between the Railway Undertaking and the Infrastructure Manager, which has been enforced by EU directives. The braking curve related to the speed decrease due to the emergency brake is called Emergency Brake Deceleration (EBD) curve.

From the EBD and the measured train speed, the ETCS computer calculates in real time, several times per second, the distance necessary to stop the train from the time the ETCS on-board would command the intervention of the emergency brake. To do so, it is necessary to make worst case assumption:

- On the train dynamics during the lapse of time before the full emergency brake effort is developed (emergency brake build up time), by taking into account the measured acceleration.
- On the actual speed of the train, by taking into account the inaccuracies of the speed measurement.

This distance determines a location called the EBI (Emergency Brake Intervention) supervision limit, i.e. the point beyond which ETCS will bypass the human in charge (see Figure 2) (ERA 2016).

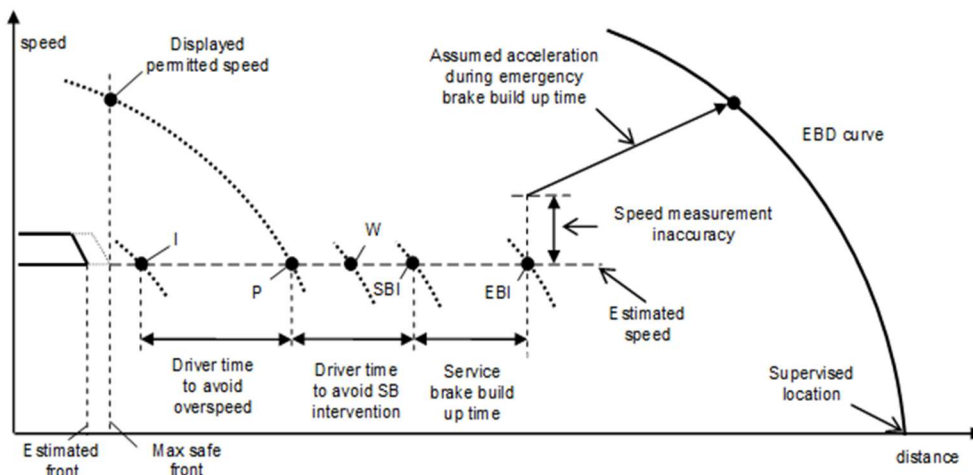


Fig. 2. Overview of the EBD braking curve and its related supervision limits

Difference between systems

It is possible to use optimization model and maximal speed of train depends from the dislocations of the train in the front. What is the difference between Russian 1520 mm and European 1435 mm gauge systems? Why is it important

comparer before ERTMS implementation? ERTMS level 2 or level 3? All this questions will be very important. In the railway traffic system, there are two kinds of signaling systems for safe operations of trains, that is, the fixed-block signalling system and the moving-block signalling systems. As a traditional control method, the fixed-block signalling system, in which the rail line will be divided into different physical segment by signal lights, has been employed more than one hundred years on almost all railways. Trains travel on the rail line according to the following operation strategies. That is, if a train arrives at a signal light and its previous train has not left the second previous segment, then this train must stop before the signal light to avoid the possible occurrence of conflicts; otherwise, the train is allowed to enter the next segment. In the moving-block signalling system the safe headway is guaranteed by checking the distance between adjacent trains in real time and then controlling the following train on the basis of its actual headway. Systems of automatic block system of the Russian 1520 mm are based on rail tracks. The line sections are divided on rail tracks of different lengths. To each of sections sends a signal to the Automatic Locomotive Signalisation (ALS) allowable speed of the train. This system is effective to use on Metro line.

ERTMS level 3 is capable of delivering further infrastructure cost reductions of around 25% on top of the 40% already identified by the ERTMS Programme Team as available for Level 2 without line side signals. The additional cost savings offered by level 3 would be offset to some extent by an increase in the cost of radio communications equipment. The level 3 capacity can be approached by optimizing the level 2 block layouts in line with infrastructure capability. The level 3 environment additional capacity requires no additional trackside hardware. There are lots of benefits, but in another works we can see the opposite side. For example: safety, development risk. The industry associates these risks primarily with block-less (“moving block”) operation and the driver perspective.

However, discussions with some experienced operational personnel and drivers suggest that these concerns may be overstated. In any case, they do not impact safety because in normal operation train movement will be protected by the system. From the driver perspective, a moving block system differs from fixed block working in that train may be given a supervised movement authority to any point on the route. This may cause performance problems because the driver may be unfamiliar with stopping the train at that location and starting it again, as compared with a fixed block system where stops occur always at the same points on the line. Some opinions are that ERTMS does not yet exist; it is nothing more than a misleading marketing pitch.

Analytical estimation of the distance between trains

In ERTMS level 3, traffic is controlled by so called moving block that is associated with the distance between subsequent trains. The difficulties can be grouped in loss of time at the boundaries. The possibilities of frequent update of movement authority through radio transmission enables trains to run closer together and the line capacity been increased by significantly (moving blocks). There are lots of methods to calculate railways line capacity (Landex *et al.* 2007). One is the next formulas:

$$q = \frac{1}{T} = \frac{v}{\delta}, \quad (1)$$

$$C = q_{max} = \frac{1}{T_{min}} = \frac{v^*}{\delta_{min}}, \quad (2)$$

where: T – train headway (temporal train spacing between two following trains); V – train speed; v^* – critical train speed (the highest speed allowed with the given braking distance); δ – distance spacing (between two following trains); $\delta_{min} = d + L_t + f$, where L_t – train length; f – safety margin; d – the minimum distance between two trains that allows the one behind to run not being slowed by the one ahead.

The static moving block keeps a safety distance between trains with an absolute braking distance. The dynamic moving block takes into account the fact that the train ahead has a minimum emergency braking distance and uses this as separation distance to allow the train following to stop in safety. For interval regulation, we can consider fixed and moving blocks. In existing system with signals each block distance between trains is considered by the equation:

$$L_{b, tr} = 0,5l_{tr} + l_{b11} + l_{b12} + 0,5l_{tr}, \quad (3)$$

where: $L_{b, tr}$ – the distance between trains; l_{tr} – train length; l_b – block length between signals in block line.

In moving block, the running distance between two trains is reduced to the space needed to the train in rear to completely stop from the actual speed. This space represented by the coefficient η :

$$\eta = k \frac{v^2}{2\gamma}, \quad (4)$$

where: v – train speed; γ – deceleration rate (assumed constant); k – safety coefficient (normally equal to 1.1).

So the throughput can be expressed by:

$$q = \frac{v}{k \frac{v^2}{2\gamma} + L_t + f}. \quad (5)$$

Numerical simulation

Numerical simulation is one of the main development trains traffic process and tools (Vale *et al.* 2012). Opportunities are arising with the implementation of simulation:

- Quality improvements
- Cost savings
- Increase in productivity
- Higher quality of drafts
- Better design control
- Less iteration

Along with the introduction of the automatically controlled trains and ERTMS level 3 systems, the traffic interval adjustment algorithm optimizes and indicates a higher level of exploitation.

As the ERTMS level 3 system has not been yet introduced, we can make simulation of optimizing the speed profile with parallel computing techniques in order to demonstrate the advantage of computation time and possibility of applying to the distance between trains:

$$[k - 1] = T_{xj}^{*g} [k - 1] + TV_{xj}^* [k - 1], \quad (6)$$

where: $T_{xj}^* [k - 1]$ – the rescheduling time; $T_{xj}^{*g} [k - 1]$ – the scheduling time; $TV_{xj}^* [k - 1]$ – time variable.

So, this interval regulation of train movement provides high throughput and carrying capacity. Flexible train regulation system can enhance the global natural resources saving. Significant advances have been made to improve the efficiency of the train motion: minimization of resistant forces, construction improvements, recuperation capabilities (Kondo 2010). For optimal control problem it is possible to use basic Dynamic Programming. One can obtain discretized linearized state equation (2) and (3) using first-order Taylor expansion and trapezoidal rule for approximation of integral.

$$\psi_k = \left(I - \frac{A\Delta t}{2}\right)^{-1} \left(I + \frac{A\Delta t}{2}\right) \psi_{k-1} + \left(I - \frac{A\Delta t}{2}\right)^{-1} B f_0 \Delta t, \quad (7)$$

$$J_k = J_{k-1} + \xi(u) m \frac{\Delta t}{2} (f(u, u_k) v_k + f(u, u_{k-1}) v_{k-1}), \quad (8)$$

where: $A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ \alpha & \beta \end{pmatrix}$; $B = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$; $\psi = \begin{pmatrix} x \\ v \end{pmatrix}$; $f_0 = f(u_{k-1}, v_{k-1}) - r(x_{k-1}, v_{k-1}) - \alpha v_{k-1} + \beta x_{k-1}$;

$$\alpha = f_v(u_{k-1}, v_{k-1}) - r_v(x_{k-1}, v_{k-1}); \quad \beta = -r_v(x_{k-1}, v_{k-1}).$$

After the transform terminal boundary conditions to penalty function:

$$\phi(x(T), v(T)) = \lambda_1 (x(T) - L)^2 + \lambda_2 (v(T))^2. \quad (9)$$

Thus, optimal problem is approximately converted into the following N-stage decision process without terminal boundary conditions:

$$\min \{J + \phi(\psi_N)\}, \quad \{u_k\}_{k=1}^N \quad (10)$$

A penalty value ($\phi(x_N, v_N)$) is given for each lattice point on the N-th phase, the phase k is set to N-1, and the forward search is done from an origin along the trajectory already created by the backward-search procedure described above (see Fig. 2).

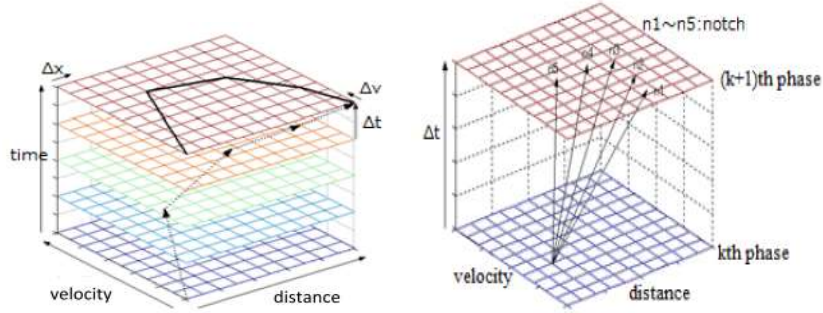


Fig. 2. Spatial and time discretization. Finding the optimal control input at each lattice point.

Here, it is possible to combine track conditions, such as discontinuity of multistage notches, velocity limitation, and gradient resistance, which are difficult to be combined as solution method into simulations easily. Even if the actual trajectory becomes away from the optimal one due to some disturbances by signaling and so on, it is able to recover the trajectory to the optimal one. If the closest lattice point from the point which can detect its position and velocity can be given as primary value and notch value which optimizes cost function can be read out. Here, notch value gives command for powering and brake in the case of train operation (Matsuura Miyatake 2014).

The one of main role in line capacity plays stochastic disturbance (Yang *et al.* 2010). To show the different dynamic characteristics of the movements of train, two kinds of traffic flow were used (see Fig. 3).

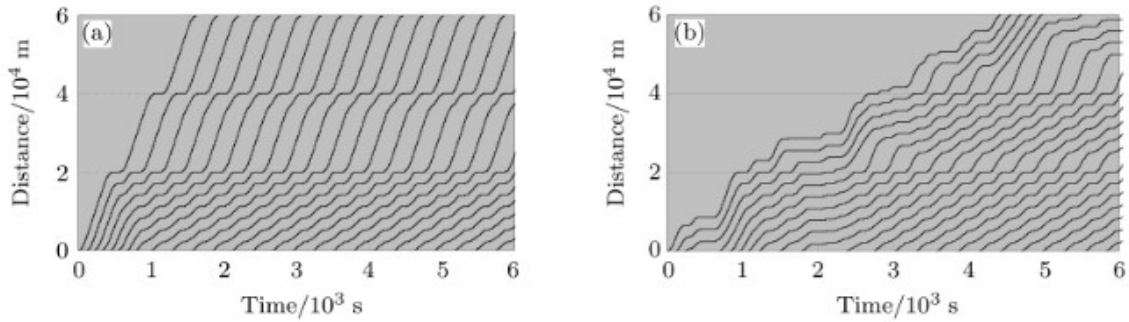


Fig. 3. The train traffic flow

Figure 3 (a) shows that without the stochastic disturbance, the minimal safe headway between adjacent trains can generally be guaranteed since the dwelling time at stations 2 and 3 is large enough. In Figure 3 (b), for analysing the dynamic characteristics of train traffic flow conveniently, there was only the stochastic disturbance acting on the head train considered. It is easy to see that all trains will dwell at stations 2 and 3 for 100 seconds for unloading and loading passengers. Before each station, each train will brake for entering the station and then dwell at it for 100 seconds. In order to keep a safe distance from the previous train, the following train has to brake and stop before the station until the previous train leaves the station. In real time, if the delay time of a train on railway line is too large, it can be considered to be rescheduled. However, when the stochastic disturbance occurs, the acceleration of the train will change. When the acceleration is positive, the train is performing the traction operation. If the acceleration is negative, the train is performing the braking operation. If the acceleration equals zero, then the train is stopping or moving with a uniform speed. From this it follows that the main task of the simulation to determine the minimal safe headway between the adjacent trains.

Conclusion

This paper gives recommendation value of the design the ERTMS level 3 in Lithuanian Railways. First of all, the implemented system should be safe. Also, during the performance, the new system should be observed in case of maintenance in the future.

This paper proposes positive impact for the development of moving block train control system. Although, the fixed-block signalling system can guarantee safe operations of trains, the traffic capacity of the rail line cannot be

utilized sufficiently. With the development of communication techniques, more and more railways will be equipped with the moving-blocking systems to utilize the railway traffic sources more efficiently. Different from fixed block systems, moving block train control systems permit to reduce the distance between trains up break distance with safety coefficient.

Before implementation of new signalling system, it is needed to use numerical simulation for showing how will be changed discrete-time dynamic model when stochastic disturbance occurs. The results will show that the stochastic disturbance can not only decrease the traffic capacity of the rail line but also make more delays in the train traffic flow. The application of this methodology will contribute to bridging the gap between traditional, highly abstracted formal methods. Theoretically, this method can be a suitable candidate for moving block train control system development. The proposed method can be extended to develop existing Lithuanian Railways system used in railway signalling, such as improving line capacity in moving block train control system. Moreover, a moving block system could be an interesting study, for example, using new methods of Numerical simulation, optimization methods.

The dynamic characteristics of train traffic flow with particular dates can be investigated in the future researches during the ERTMS system implementation in "Lithuanian Railways".

References

- Gailienė, I.; Skerys, K.; Ciparytė, G. 2013. Investigation of traffic safety situation at the level crossings in Lithuania. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*. 8 (2): 117-123.
- ERA. 2016. *European rail Traffic Management System* [online]. European Union Agency for Railways [November 2016]. Available from Internet:
<http://www.era.europa.eu/Core-Activities/ERTMS/Pages/home.aspx>
- Flammini, F.; Marrone, S.; Mazzocca, N.; Vittorini, V. 2005. Modeling system reliability aspects of ERTMS/ETCS by Fault Trees and Bayesian Networks. *Proceeding of the 9th IEEE International Symposium on High Assurance Systems Engineering*. 163-172.
- Jong J.; Chang S.; Lai Y., 2013, Impact of European Railway Traffic Management System on Human Performance in Railway Operations. *Transportation Research Board of the National Academies*. Washington: 44-54.
- Hu, P.; Sun, Q.; Llu, R.; Wang, F. 2011. A short range prediction model for track quality index. *Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 225(3): 277-285.
- Kondo M.; 2010. Recent energy saving technologies on railway traction systems. *IEEJ Transaction on Electrical and Electronic Engineering* 5, 298-303.
- Landex, A.; Kaas, A.H.; Jacobsen, E.M.; Schneider-Tilli, J.; 2007. The UIC 406 capacity method used on single track sections. *Proceeding of the 2th International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis*.
- Li, F.; Gao, Z.; Wang, D.Z.W. 2013. Train routing model and algorithm combined with train scheduling. *Journal of Transportation Engineering*, 139(1): 50-60.
- Matsuura, G.; Miyatake, M. 2014. Optimal train speed profiles by dynamic programming with parallel computing and the fine-tuning of mesh. *Computers in Railways XIV*. 135: 767-777.
- Ortuzar J.; Willumsen L. 2011. *Modelling Transport*. Fourth Edition. A John Wiley and Sons, Ltd., Publication. United Kindom: 1-20.
- Sameni, M.K.; Preston, J. 2012. Value for railway capacity assessing efficiency of operators in Great Britan. *Transportation Research Record*. No 2289: 134-144.
- Sato K.; Tamura K.; Tomii N. 2013 A MIP-based timetable rescheduling formulation and algorithm minimizing further inconvenience to passengers. *Journal of Transport Planning & Management*. London.
- Smith P.; Kyriakidis M.; Majumdar A.; Ochieng W. 2013 Impact of European Railway Traffic Management System on Human Performance in Railway Operations. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2374, Transportation Research Board of the National Academies. Washington: 83-92.
- Stapelberg, R. F. 2009. *Handbook of Reability, Aviability, Maintainability and Safety in Engineering Design*. Springer-Verlag London Limited. 4-38.
- Sun, Y.; Xu, R. 2012. Rail transit travel time reliability and estimation of passenger rout choise behavior. *Analysis using automatic fare collection data. Transportation Research Record*. No 2275: 58-67.
- Theeg, G.; Vlasenko, S. 2009. *Railway Signalling and Interlocking*. Hamburg.
- UIC. 2016. *GSM-R* [online]. International Union of Railways [November 2016]. Available from Internet:
<http://www.uic.org/1922-UIC-a-long-life-organisation>
- Vale, C.; Ribeiro, I. M.; Calçada, R. 2012. Integer programming to optimize tamping in railway tracks as preventive maintenance, *Jurnal of Transportation Engineering* 138(1): 123-131.
- Valentinovič L.; Sivilevičius H. 2014. Railway line capacity methods analysis and their application in "Lithuanian Railways" justification. *In selected papers of the 9th International Conference "Environmental Engineering"*, ISSN 2029-7092: 1-20.
- Vikulina, Yu.I.; Sverdlin V. 2016. Development of an algorithm for energy efficient automated train driving. *Proceeding of the 8th European Congress „Embedded Real Time Software and Systems*.

- Wang, H.; Tang, T.; Roberts, C.; Gao, C.; Chen, L.; Schmid, F. 2014. A novel framework for supporting the design of moving block train control system schemes, *Journal of Rail and Rapid Transit* 228(7): 784-793.
- Yang, L.; Li, F.; Gao, Z.; Li, K. 2010. Discrete-time movement model of a group of trains on a rail line with stochastic disturbance. *Chinese Physical Society and IOP Publishing*.
- Баранов Л.А. Воробьев П. Логинова Л.Н. 2012. Алгоритмы централизованного управления в системе автоматизированного управления движением поездов. Москва. Мир транспорта. 84-87.