



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

Augustina Dailidaitė

**KINTAMO VĖŽĖS PLOČIO TRAUKINIO VAŽIUOKLĖS
TYRIMAS IR JOS PRITAIKYMO LIETUVOJE TIKSLINGUMO
ANALIZĖ**

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

prof. dr. Alvydas Kondratas

KAUNAS, 2016

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS

KINTAMO VĖŽĖS PLOČIO TRAUKINIO VAŽIUOKLĖS
TYRIMAS IR JOS PRITAIKYMO LIETUVOJE TIKSLINGUMO
ANALIZĖ

Baigiamasis magistro projektas
Mechanikos inžinerija (kodas 621H30001)

Vadovas

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

Recenzentas

(parašas) prof. dr. Žilvinas Bazaras
(data)

Projektą atliko

(parašas) Augustina Dailidaitė
(data)



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Mechanikos inžinerijos ir dizaino

(Fakultetas)

Augustina Dailidaitė

(Studento vardas, pavardė)

Mechanikos inžinerija, 621H30001

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

„Kintamo vėžės pločio traukinio važiuoklės tyrimas ir jos pritaikymo Lietuvoje tikslingumo analizė“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 16 m. birželio 09 d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano, **Augustinos Dailidaitės**, baigiamasis projektas tema „Kintamo vėžės pločio traukinio važiuoklės tyrimas ir jos pritaikymo Lietuvoje tikslingumo analizė“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Dailidaitė, Augustina. *Kintamo vėžės pločio traukinio važiuoklės tyrimas ir jos pritaikymo Lietuvoje tikslingumo analizė. Magistro baigiamasis projektas / vadovas prof. dr. Alvydas Kondratas; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.*

Mokslo kryptis ir sritis: Technologijos mokslai, Mechanikos inžinerija

Reikšminiai žodžiai: *aširatis, kintamas vėžės plotis, traukinys, važiuoklė, Rail Baltica*

Kaunas, 2016. 78 p.

SANTRAUKA

Baigiamajame magistro projekte analizuojama skirtingo geležinkelio vėžės pločio tarp valstybių sukuriama problema ir nagrinėjamas netradicinis jos sprendimo būdas – kintamo vėžės pločio traukinio važiuoklės sistema. Darbe analizuojamos ir palyginamos egzistuojančios kintamo vėžės pločio traukinio važiuoklės sistemos. Atliekamas SUW-2000 sistemos pagrindu sumodeliuoto adaptyvaus aširačio tyrimas, siekiant įvertinti ir iširti silpnąsias sistemos vietas.

Siekiant įvertinti traukinio važiuoklės aširačių sudėtingas darbo ir apkrovimo sąlygas, sukurtas kompiuterinis standartinio aširačio modelis ir atlikta statinė analizė esant skirtingoms apkrovoms ir vėžės pločiui.

Atlikta ekonominė adaptyvaus aširačio panaudojimo Lietuvoje analizė.

Dailidaitė, Augustina. Research of Variable Gauge Train Chassis and Analysis of Its Application Expediency in Lithuania: Master's thesis in Mechanical Engineering / supervisor Prof. Dr. Alvydas Kondratas. The Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Research area and field: Technological Sciences, Mechanical Engineering

Key words: *wheelset, variable gauge, train, chassis, Rail Baltica*

Kaunas, 2016. 78p.

SUMMARY

This final master's thesis analyzes problem created by different rail gauge between countries and examines unconventional solution – variable gauge train chassis system. The thesis analyzes and compares different variable gauge train chassis systems. The computational model of SUW-2000 system is analyzed in order to find, analyze and evaluate weaknesses in the system.

In order to evaluate complex performance and loading conditions of standard wheelset, there was created a computational model, and a static analysis with different rail gauge and loads was carried out.

This thesis also contains economical evaluation of adaptive wheelset use in Lithuania.

TURINYS

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS.....	8
LENTELIŲ SĄRAŠAS	10
SANTRUMPOS IR PAAIŠKINIMAI.....	11
ĮVADAS.....	12
1. TYRIMO OBJEKTAS IR PROBLEMATIKA	13
1.1. Darbo tikslas ir uždaviniai	17
1.2. Darbo naujumas.....	18
1.3. Darbo aktualumas	18
2. LITERATŪROS APŽVALGA	19
2.1. Standartinės traukinio važiuoklės analizė ir darbo sąlygų apžvalga	19
2.1.1. Traukinio vežimėlis.....	19
2.1.2. Aširatis	22
2.1.3. Traukinio važiuoklės darbo sąlygos Lietuvoje	22
2.2. Automatinių aširačio tarpuvėžio pločio keitimo sistemų apžvalga	24
2.2.1. Talgo technologija, Ispanija	26
2.2.2. DBAG/Rafil „Typ V“ sistema, Vokietija.....	28
2.2.3. SUW 2000 sistema, Lenkija	30
2.3. Geležinkelių darbo rodikliai.....	33
2.4. Keleivių ir krovinių vežimo geležinkeliais perspektyvos.....	34
2.5. Antrojo skyriaus išvados.....	36
3. STANDARTINIO TRAUKINIO AŠIRAČIO TYRIMAS NAUDOJANT BAIGTINIŲ ELEMENTŲ METODĄ	37
3.1. Aširačio geometrinis ir skaičiuojamasis modeliai	38
3.2. Skaičiavimo rezultatų vertinimo kriterijai	41
3.3. Skaičiavimo rezultatai.....	42
3.4. Rezultatų apibendrinimas ir išvados	57
4. KINTAMO VĖŽĖS PLOČIO AŠIRAČIO MODELIAVIMAS, ANALIZĖ IR TYRIMAS ..	59
4.1. SUW-2000 tipo adaptyvaus aširačio trūkumų analizė.....	60
4.2. Tampriosios įvorės stiprumo ir patvarumo tyrimas.....	62
4.3. Ketvirtojo skyriaus išvados	65

5. KINTAMO VĖŽĖS PLOČIO TRAUKINIO VAŽIUOKLĖS PANAUDOJIMO LIETUVOJE TIKSLINGUMO VERTINIMAS	66
5.1. Keleivių ir krovinių vežimo apimtys ir dinamika.....	66
5.2. Ekonominis efektas.....	71
5.3. Penktojo skyriaus išvados	72
IŠVADOS.....	73
LITERATŪROS SĄRAŠAS	75
PRIEDAI	78

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Europos žemėlapis pagal valstybėse egzistuojančius geležinkelio vėžės pločius.....	13
1.2 pav. Traukinio vežimėlių keitimo procesas (Brestas, Baltarusija)	14
1.3 pav. Sugretinto kelio įrengimo variantai	15
1.4 pav. Sugretintas geležinkelio kelias atkarpoje Mockava–Šeštokai.....	16
2.1 pav. Vežimėlių su spyruokline pakaba schemas.....	20
2.2 pav. Prekinio vagono aširatis (18-100)	20
2.3 pav. Keleivinio vagono aširatis (KHP-CRI).....	21
2.4 pav. Įrenginys, skirtas „Talgo“ (viršuje) ir CAF (apačioje) sistemoms	25
2.5 pav. Įrenginio, skirto „Talgo“ (viršuje), CAF (viduryje) ir SUW2000 bei „Rafil“ (apačioje) sistemoms, prototipas.....	25
2.6 pav. Talgo sistemos aširačio schema	27
2.7 pav. Talgo sistemos (Ispanija) ratų bazės pakeitimo procesas	28
2.8 pav. Rafil sistemos aširačio vaizdas.....	29
2.9 pav. SUW 2000 sistemos aširatis.....	30
2.10 pav. Ant geležinkelio kelio įrengtas SUW 2000 vėžės pločio keitiklis	31
2.11 pav. Tarpuvėžio pločio keitimo proceso fazės.....	32
2.12 pav. Skirtingų krovininio traukinio vėžės sandūros įveikimo būdų palyginimas laiko ir kaštų sąnaudų atžvilgiu	35
3.1 pav. Ašies apkrovų diagrama.....	37
3.2 pav. Ašies apkrovų diagrama, naudojama skaičiavimuose	38
3.3 pav. Geometrinio aširačio modelio izometrinis vaizdas	39
3.4 pav. Modelio vaizdas su nurodytomis kraštinėmis sąlygomis.....	40
3.5 pav. Baigtinių elementų tinklelis	41
3.6 pav. Ekvivalentinių Mizeso įtempių pasiskirstymas (izometrinis vaizdas), kai tarpuvėžio plotis lygus 1520 mm	43
3.7 pav. Ekvivalentinių Mizeso įtempių pasiskirstymas (izometrinis vaizdas), kai tarpuvėžio plotis lygus 1435 mm	44
3.8 pav. Ekvivalentinių Mizeso įtempių pasiskirstymas (vertikalus pjūvis jėgos veikimo plokštumoje) , kai tarpuvėžio plotis lygus 1520 mm.....	45
3.9 pav. Ekvivalentinių Mizeso įtempių pasiskirstymas (vertikalus pjūvis jėgos veikimo plokštumoje) , kai tarpuvėžio plotis lygus 1435 mm.....	46
3.10 pav. Poslinkių epiūra (izometrinis vaizdas), kai tarpuvėžio plotis lygus 1520 mm	47
3.11 pav. Poslinkių epiūra (izometrinis vaizdas), kai tarpuvėžio plotis lygus 1435 mm	48

3.12 pav. Poslinkių epiūra (vaizdas iš priekio), kai tarpuvėžio plotis lygus 1520 mm	49
3.13 pav. Poslinkių epiūra (vaizdas iš priekio), kai tarpuvėžio plotis lygus 1435 mm	50
3.14 pav. Trinties įtempiai ašies ir rato kontakto zonoje (vaizdas statmena apkrovai kryptimi), kai tarpuvėžio plotis lygus 1520 mm.....	51
3.15 pav. Trinties įtempiai ašies ir rato kontakto zonoje (vaizdas statmena apkrovai kryptimi), kai tarpuvėžio plotis lygus 1435 mm.....	52
3.16 pav. Įtempiai ašies kakliuko skerspjūvyje	54
3.17 pav. Įtempiai ašies postebulinės dalies skerspjūvyje	54
3.18 pav. Įtempiai ašies centriniame skerspjūvyje	55
3.19 pav. Suminiai poslinkiai	55
3.20 pav. Įtempiai kontakto zonoje (ašis – ratas)	56
3.21 pav. Įtempių svarbiausiuose pjūviuose palyginimas	56
4.1 pav. Sumodeliuotas kintamo vėžės pločio aširatis remiantis SUW-2000 sistema (viršuje – izometrinis vaizdas, apačioje – vertikalus pjūvis)	59
4.2 pav. Fretinginio dilimo pavyzdžiai (a – standartinio aširačio stebulės tvirtinimo paviršiaus kraštas, b – automatinio vėžės keitimo įrenginio postebulinė dalis)	60
4.3 pav. Standartinio aširačio (ratas užpresuotas ant ašies) darbo sąlygos postebulinėje dalyje	60
4.4 pav. Adaptyvaus aširačio (ratas neužpresuotas ant ašies) darbo sąlygos postebulinėje dalyje ...	61
4.5 pav. Pažeista tamprioji įvorė (trūksta vieno dantuko).....	62
4.6 pav. Skaičiuojamasis modelis su nurodytomis kraštinėmis sąlygomis	62
4.7 pav. Kraštinių sąlygų aprašymas.....	63
4.8 pav. Ekvivalentinių Mizeso įtempių pasiskirstymas, vaizdas iš viršaus	63
4.9 pav. Ekvivalentinių Mizeso įtempių pasiskirstymas, vaizdas iš apačios	64
4.10 pav. Poslinkiai, vaizdas iš šono.....	64
4.11 pav. Nuovargio bandymo rezultatai	65
5.1 pav. Krovinių vežimas visų rūšių transportu	67
5.2 pav. Krovinių apyvarta visų rūšių transportu	67
5.3 pav. Keleivių vežimas visų rūšių transportu.....	68
5.4 pav. Keleivių apyvarta visų rūšių transportu	68
5.5 pav. Krovinių vežimas geležinkelių transportu	69
5.6 pav. Krovinių apyvarta geležinkelių transportu.....	69
5.7 pav. Keleivių vežimas geležinkelių transportu.....	70
5.8 pav. Keleivių apyvarta geležinkelių transportu	70

LENTELIŲ SĄRAŠAS

2.1 lentelė. Leistini įtempiai pagal skerspjūvius.....	23
2.2 lentelė. Automatinio vėžės pločio keitimo sistemų palyginimas.....	26
3.1 lentelė. Aširačio tipas	38
3.2 lentelė. Medžiagos charakteristikos	39
3.3 lentelė. Bandymo sąlygos ir modelio geometriniai parametrai	40
3.4 lentelė. Leistini įtempiai pagal skerspjūvius.....	42
3.5 lentelė. Bandymo rezultatų suvestinė.....	53
3.6 lentelė. Analitiškai apskaičiuotos ir tyrimo metu gautos reakcijos jėgos palyginimas.....	57

SANTRUMPOS IR PAAIŠKINIMAI

- **NVS** – Nepriklausomų Valstybių Sandrauga (šalys narės: Armėnija, Azerbaidžanas, Baltarusija, Kazachstanas, Kirgizija, Moldavija, Rusija, Tadžikija, Uzbekija).
- **1435 mm** – geležinkelio vėžės plotis, vadinamas standartiniu arba europiniu.
- **1520 (1524) mm** – geležinkelio vėžės plotis, vadinamas rusiškuoju.
- **SUW-2000** – Lenkijos geležinkelių užsakymu sukurta kintamo vėžės pločio sistema.

ĮVADAS

Geležinkelių transportas šiandien atgauna savo populiarumą. Tai lemia jo teikiami privalumai: greitis, galimybė pervežti labai sunkius, taip pat pavojingus krovinius, tvarkaraščio tikslumas, maža krovinių vežimo savikaina. Lietuvos atveju didelį vaidmenį vaidina ir geografinė padėtis bei neužšalantis Klaipėdos uostas. [1]

Būtent dėl ypatingos geografinės padėties ir istorinių aplinkybių, Lietuvos geležinkelių tinklą sudaro skirtingų vėžės pločių keliai. 1520 mm pločio vėžės geležinkeliai driekiasi į Baltijos valstybes bei NVS šalis, 1435 mm pločio vėžės geležinkeliai jungia Lietuvą su Lenkija, o per Lenkiją – ir su kitomis Vakarų ir Vidurio Europos valstybėmis [2], [3]. Šis egzistuojantis 85 mm vėžės pločių skirtumas sukuria daug techninių problemų, nes standartiniai traukinių aširačiai turi pastovų tarpuvėžio plotį, todėl traukiniai gali važiuoti tik viena – arba europine, arba rusiška – geležinkelio vėže.

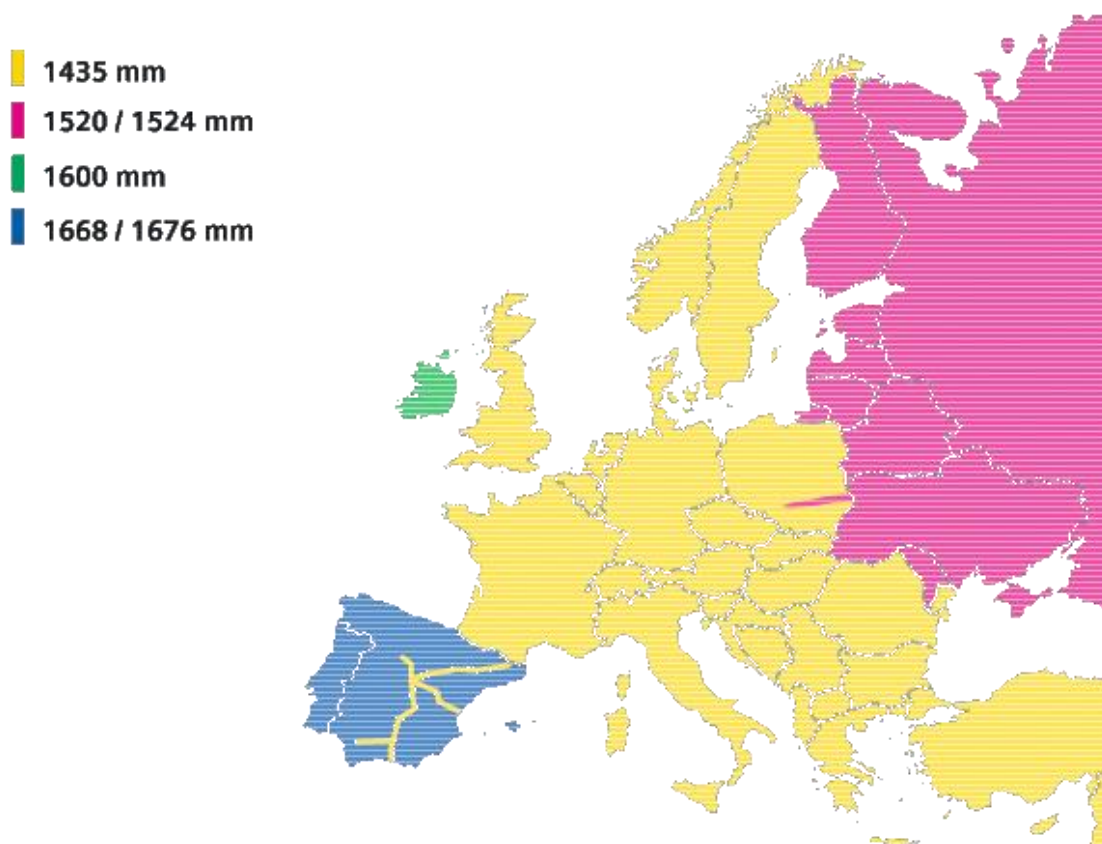
Skirtingas vėžės plotis traukiniams yra įveikiamas keliais tradiciniais būdais: keičiant traukinio važiuoklę, perkraunant krovinius/persodinant keleivius arba įrengiant papildomus/sugretintus geležinkelio kelius. Pastarąjį variantą Lietuva pasirinkusi kaip ilgalaikį skirtingo vėžės pločio problemos sprendimo būdą, šiuo metu įgyvendindama projektą „Rail Baltica“. Jo metu europine 1435 mm pločio geležinkelio vėže bus sujungtos Baltijos valstybių sostinės ir Varšuva. Lietuvoje „Rail Baltica“ ilgis sieks 333 km [4]. Tačiau net ir įgyvendinus šį projektą Lietuvoje vis tiek liks du skirtingi geležinkelio vėžės pločiai. Todėl svarbu įvertinti ir alternatyvius problemos sprendimo būdus. Vienas iš jų – adaptyvi kintamo tarpuvėžio pločio traukinio važiuoklės sistema, specialiais įrenginiais ant kelio įgalinanti traukinį automatiškai pervažiuoti nuo siauresnio vėžės pločio prie platesnio ir atvirkščiai. Mockavos stotyje esantis toks įrenginys įrengtas lenkų iniciatyva, testuojant SUW 2000 tipo kintamo vėžės pločio aširačius. Tačiau didelio susidomėjimo Lietuvoje šia sistema nei žiniasklaida, nei įmonės, nei mokslo bendruomenė, nei, tuo labiau, gyventojai, neparodė, taigi šios sistemos pritaikymo Lietuvoje galimybės niekada nebuvo realiai svarstytos. [3], [5]

Aširačių (tiek standartinių, tiek adaptyvių) darbo sąlygos nėra pakankamai gerai išnagrinėtos, trūksta prieinamos informacijos, ir nors realybėje yra atlikta nemažai nuovargio, ekstremalių temperatūrų poveikio ir panašių bandymų, mažai išnaudotas kompiuterinis modeliavimas ir kompiuterinio simuliacinio galimybės. Trūksta mokslinių straipsnių šia tema ne tik lietuvių, bet ir kitomis kalbomis. Todėl šiame darbe bus atliktas kompiuterinis aširačių modelių tyrimas, siekiant išsiaiškinti apkrovų poveikį skirtingo vėžės pločio ir apkrovų sąlygomis, bei identifikuoti ir išanalizuoti adaptyvaus, prie vėžės pločio prisitaikančio traukinio aširačio silpnąsias vietas ir tokios sistemos panaudojimo Lietuvoje tikslingumą.

1. TYRIMO OBJEKTAS IR PROBLEMATIKA

Geležinkelio vėžės plotis – tai atstumas tarp vidinių bėgio galvutės paviršių. Jis matuojamas 14,5 mm ($\pm 0,5$ mm) žemiau bėgio galvutės riedėjimo paviršiaus [6] (Lietuvos geležinkelio kelio priežiūros taisyklėse šis atstumas nurodomas lygus 13 mm [7]). Šiuo metu Pasaulyje eksploatuojama daugiau nei 58 skirtingų geležinkelio vėžės pločių [8], [9]. Tai lėmė ne tik vienodų standartų nebuvimo, gamtos, vyraujančių technologijų, bet ir istoriniai veiksniai, pavyzdžiui, kad kaimyninės valstybės karų metu negalėtų geležinkeliais į kitos valstybės teritoriją įvežti karo mašinų.

Dabar pasaulis yra globalus ir gera transporto infrastruktūra yra svarbus veiksnys valstybės ekonomikos vystymuisi. Patogus susisiekimas svarbus ne tik šalies viduje, bet ir su kaimyninėmis valstybėmis. Daugeliu atveju, dėl skirtingų geležinkelių vėžės pločių, toks susisiekimas geležinkeliais tarp valstybių, o kartais ir pačių valstybių viduje, yra kiek komplikotas. Europoje yra kelios vietos, kur susiduria skirtingo vėžės pločio geležinkeliai (1.1 pav.): Ispanija (1668 mm)–Prancūzija (1435 mm); Suomija (1524 mm)–Švedija, Norvegija (1435 mm); Lenkija, Slovakija, Vengrija, Rumunija, Moldova (1435 mm)–Lietuva, Rusija, Baltarusija, Ukraina (1520 mm).



1.1 pav. Europos žemėlapis pagal valstybėse egzistuojančius geležinkelio vėžės pločius [10]

Lietuvoje egzistuoja du skirtingi vėžės pločiai: 1520 mm ir 1435 mm. Visas Lietuvos geležinkelių tinklo ilgis 2014-ųjų metų duomenimis [4] yra 1767,6 km. Didžiąją šio tinklo dalį sudaro 1520 mm vėžės pločio geležinkelio keliai. Ilgą laiką 1435 mm vėžės pločio geležinkelio kelių Lietuvoje buvo tik 21,8 km (Šeštokai – siena su Lenkija). Įgyvendinant projektą „Rail Baltica“ rekonstruota 123 km geležinkelio atkarpa nuo Kauno iki sienos su Lenkija. Šioje atkarpoje nutiestas sugretintas, o vietom ir du atskirti, abiejų vėžės pločių keliai [4]. Tiesa, šis kelias dar negali būti naudojamas, nes jame nėra signalizacijos įrenginių.

Skirtingas vėžės plotis šalyje, taip pat skirtingas vėžės plotis lyginant su kaimyninėmis valstybėmis (Lietuva–Lenkija), viena vertus, yra privalumas, nes šalis tampa svarbiu tranzito centru, kita vertus, yra didžiulis iššūkis, nes reikia spręsti vėžės pločių skirtumo problemą – standartiniai traukiniai tokio „barjero“ pervaziuoti negali. Šios problemos sprendimui pasitelkiami įvairūs metodai:

1. *Traukinio važiuoklės keitimas.* Važiuoklės keitimo procesas vyksta specialiuose depuose, kur įrengti galingi keltuvai ir saugomi ratų vežimėliai arba aširačiai (gali būti keičiami tik aširačiai, bet dažniausiai keičiamas visas ratų vežimėlis). Traukiniui įvažiuavus į keitimo vietą, atkabinami netinkami toliau važiuoti vežimėliai, tuomet traukinio vagonas pakeliamas keltuvais. Senieji vežimėliai nustumiami į saugojimo vietas, o naujieji vežimėliai pozicionuojami po vagonu. Vagonas nuleidžiamas ant naujų vežimėlių ir pritvirtinamas prie jų. 1.2 paveiksle pateikta nuotrauka, kurioje matomas pakeltas vagonas vežimėlių keitimo ceche.

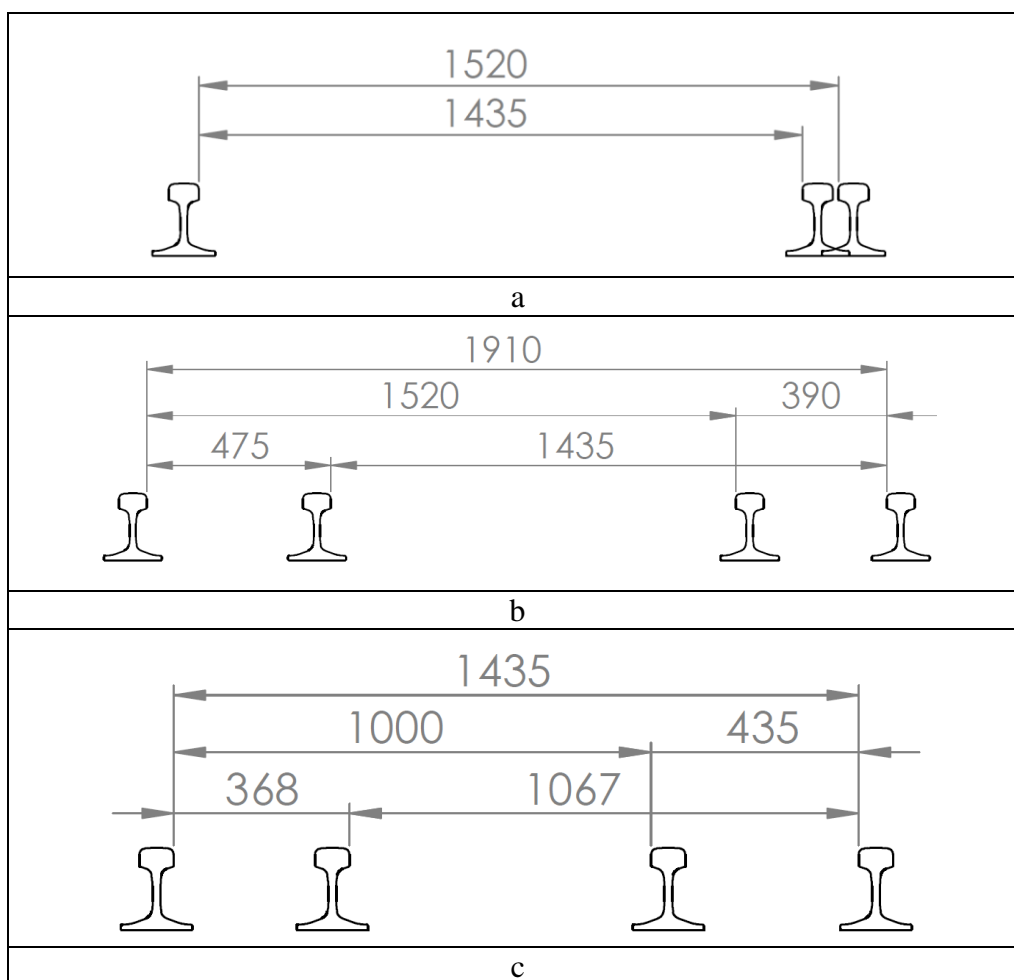
Pagrindiniai šio metodo trūkumai yra laiko sąnaudos (vienam vagonui vežimėlių keitimas užtrunka apie 20 min [8]), papildomos vietos stotyse poreikis, (tam kad būtų, kur įrengti keltuvus ir kur saugoti nenaudojamus vežimėlius), didelis triukšmas atkabinant ir tvirtinant vežimėlius, daug darbo atliekama rankiniu būdu.



1.2 pav. Traukinio vežimėlių keitimo procesas (Brestas, Baltarusija) [11]

2. *Krovinių perkrovimas/keleivių persodinimas.* Tai vienas iš seniausių vėžės „barjero“ įveikimo būdų. Šis metodas turi nemažai trūkumų krovinių vežėjams: reikalingi du traukiniai, papildoma vieta krovinių sandėliavimui ir laikymui, perkrovimo įrenginiams. Šio metodo panaudojimo tikslingumas priklauso nuo krovinio tipo. Jei krovinių sunku perkrauti (pavyzdžiui, lengvai pažeidžiami gaminiai, skysti, birūs produktai), tuomet gaištama daug laiko. Vieno cisterninio vagono turinio perpumpavimas į kitą cisterninį vagoną gali užtrukti iki 40 min., o jei pumpuojama ne tiesiogiai į vagoną, o pirmiau į rezervuarą, o tik tada į vagoną, tuomet tokia operacija gali trukti ir 70 min [8]. Keleiviams persodinimas reiškia ilgesnę kelionės trukmę ir mažesnę komfortą.

3. *Sugretintos vėžės, sulygiagretintos vėžės arba naujo geležinkelio kelio įrengimas.* Šiuo principu vykdomas projektas „Rail Baltica“.



1.3 pav. Sugretinto kelio įrengimo variantai (a – trijų bėgių sistema, vienas bėgis bendras, kiti du – skirtingoms vėžėms (šiuo atveju iliustruojama, kad tokia sistema negalima); b – keturių bėgių sugretinto kelio sistema su nepanaudojama 1910 mm pločio vėže; c – keturių bėgių sugretinto kelio sistema ir papildoma standartinė vėžė, kuri užtikrina, kad tokiu sugretintu keliu galima važiuoti trimis vėžės pločiais – 1435 mm, 1000 mm, 1067 mm)

Sugretintas kelias gali būti tiesiamas įvairiai, tai priklauso nuo vėžės pločių, kuriuos norima eksploatuoti. 1.3 paveiksle pateiktos bėgių klojimo sugretintame kelyje schemas. Gali būti klojami trys bėgiai (a) – vienas bendras, kiti du skirtingoms geležinkelio vėžėms, tačiau šis variantas Lietuvos atveju netinka, nes vėžių skirtumas lygus 85 mm, t. y., jis per mažas ir trečias bėgis paprasčiausiai netilptų. Todėl naudojamos keturių bėgių sistemos (b ir c). Įrengto sugretinto kelio vaizdas pateiktas 1.4 paveiksle.



1.4 pav. Sugretintas geležinkelio kelias atkarpoje Mockava–Šeštokai [5]

Pagrindiniai sugretinto kelio trūkumai yra didelė kaina ir projekto sudėtingumas, nes reikia pertvarkyti šalies geležinkelių tinklą. Puikus to pavyzdys – brangus, sudėtingas ir stringantis projektas „Rail Baltica“ [3], [5], [12], o jis net neapims viso Lietuvos geležinkelių tinklo ir šalyje vis tiek liks du skirtingi vėžės pločiai, tik pasikeis vėžės pločių sandūros vieta. Nemažas sugretinto kelio trūkumas yra ir tai, kad važiuojant tokiu keliu yra ribojamas maksimalus traukinio greitis [13].

4. *Kintamo vėžės pločio traukinio važiuoklės sistema.* Tai nėra visiškai naujas skirtingo vėžės pločio sandūros problemos sprendimo būdas, bet apie šį būdą žinoma mažiausiai, todėl jį galima vadinti netradiciniu.

Kintamo vėžės pločio važiuoklės sistema automatiškai adaptuojasi prie skirtingo vėžės pločio, ir aširačio tarpuvėžis pakeičiamas automatiškai traukiniui nesustojus. Pagrindinis šios sistemos trūkumas yra tas, kad reikia iš esmės pakeisti traukinio važiuoklę, bei įrengti vėžės keitimo įrenginį ant kelio, o tai yra brangu ir baugu – naujovės kartais sunkiai skinasi kelią į tas gyvenimo sritis, kurios yra senai nusistovėję.

Žvelgiant abstrakčiai, akivaizdu, kad įmanomi du grubūs adaptyvaus aširačio variantai:

- ratai yra neįpresuoti ir juda ant ašies;

- ratai lieka įpresuoti, o juda ašis (ašis tampa nevientisa).

Lietuvoje gali būti taikomi visi keturi vėžės pločių sandūros įveikimo būdai, tačiau realiai naudojami tik pirmieji trys. Ties siena su Lenkija Mockavos geležinkelio stotyje kintamo vėžės pločio įrenginys ant geležinkelio kelio buvo įrengtas jau senokai, tačiau praktiškai nenaudotas (kartą į savaitę važiuodavo naktinis traukinys), o 2012 m. dėl vykdomų darbų išardytas ir atstatytas tik praėjusiais metais. Tiesa, jokie traukiniai šiuo įrenginiu kol kas nesinaudoja. Tačiau pastaruoju metu tokios didelės šalys kaip Indija ir Rusija savo geležinkelių sistemose pradeda diegti tokio tipo sistemas. Todėl, reikia manyti, kad kintamo vėžės pločio sistemos turi ateitį ir Lietuvoje. Kaip tik dėl to šiame baigiamajame darbe ir bus nagrinėjama kintamo vėžės pločio važiuoklės sistema ir jos panaudojimo Lietuvoje tikslingumas.

1.1. Darbo tikslas ir uždaviniai

Magistrinio baigiamojo darbo tikslas yra ištirti kintamo vėžės pločio traukinio važiuoklės sistemą ir išanalizuoti tokios sistemos panaudojimo tikslingumą Lietuvos geležinkelių tinkle. Šiam tikslui pasiekti išsikelti tokie uždaviniai:

1. Atlikti egzistuojančių automatinių vėžės pločio keitimo sistemų apžvalgą, palyginti jas, identifikuoti galimus trūkumus ir problemas.
2. Išanalizuoti traukinio aširačio darbo sąlygas ir sumodeliuoti skaičiuojamąjį traukinio aširačio modelį, kuris leistų kuo geriau tas sąlygas įvertinti.
3. Naudojant sukurtą kompiuterinį modelį atlikti aširačio statinę analizę esant skirtingam vėžės pločiui ir skirtingo lygio apkrovoms. Išanalizuoti ir įvertinti įtempių pasiskirstymo ir deformacijų pokyčius.
4. Sumodeliuoti kintamo vėžės pločio aširatį, remiantis SUW 2000 sistemos pavyzdžiu.
5. Išanalizuoti literatūroje aprašytus SUW tipo sistemos bei jos komponentų bandymus ir jų rezultatus, identifikuoti tokio tipo sistemos trūkumus.
6. Atlikti sumodeliuoto kintamo vėžės pločio aširačio komponentų stiprumo/patvarumo kompiuterinius bandymus, remiantis šeštame uždavinyje apžvelgtų tyrimų rezultatais ir/ar adaptyvaus aširačio identifikuotomis problemomis.
7. Atlikti ekonominę adaptyvaus aširačio panaudojimo Lietuvoje galimybių analizę.

1.2. Darbo naujumas

Nagrinėjama galimybė naudoti kintamo vėžės pločio aširačius Lietuvos geležinkelių tinkle. Kompiuterinio modeliavimo ir simuliacinio sistemų panaudojimas analizuojant geležinkelių problemas Lietuvoje.

1.3. Darbo aktualumas

Kintamo vėžės pločio aširačiai Lietuvoje niekuomet nebuvo realiai svarstyti kaip skirtingų geležinkelio vėžės pločių sandūros sukuriamos problemos sprendimo variantas. Lietuva šiai problemai spręsti pasirinko projektą „Rail Baltica“, nors, įgyvendinus jį, šalyje vis tiek liktų skirtingų vėžės pločių keliai. Taigi, įvertinant projekto „Rail Baltica“ trukmę, kainą ir įgyvendinimo sklandumą, aktualu apsvarstyti ir projekto alternatyvas ar papildymą, nes kintamo vėžės pločio aširačius būtų galima panaudoti jau kelių metų bėgyje, o europinės vėžės tiesimas per Baltijos valstybes dar tikrai užtruks ne vienerius metus.

Kompiuterinio modeliavimo ir simuliacinio panaudojimas geležinkelio sistemų tyrimui įgalina supaprastinti ilgus ir sudėtingus sistemų bandymus realybėje ar bent jau sumažinti jų kiekį.

2. LITERATŪROS APŽVALGA

2.1. Standartinės traukinio važiuoklės analizė ir darbo sąlygų apžvalga

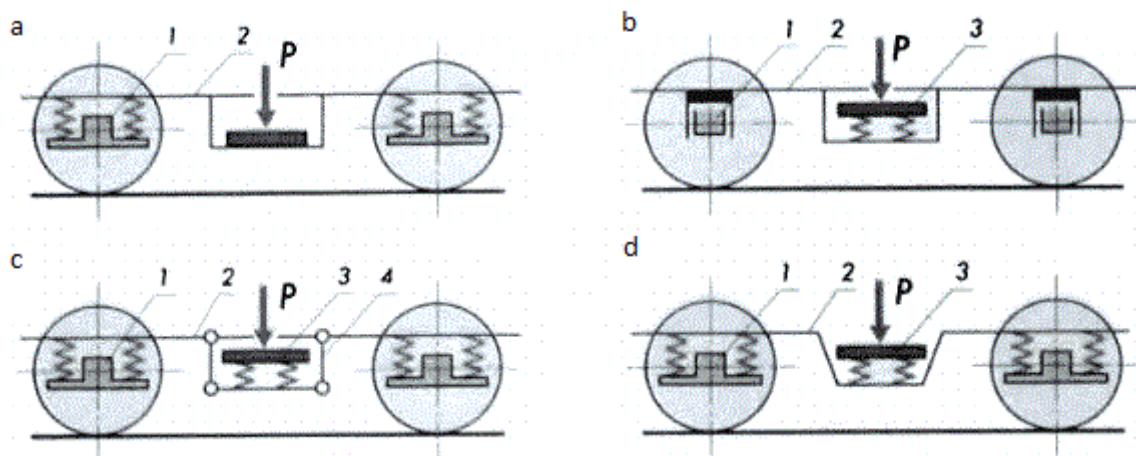
Siekiant analizuoti kintamo vėžės pločio aširačius, reikia išnagrinėti standartinių aširačių darbo sąlygas, išsiaiškinti, kaip jie perima vagono apkrovą ir perduoda bėgiams.

2.1.1. *Traukinio vežimėlis*

Aširačiai prie vagono kėbulo gali būti tvirtinami per vežimėlius arba tiesiogiai. Pastarasis variantas šiandieninėje geležinkelių infrastruktūroje yra retas atvejis, nes didėjant norimiems pervežti krovinių svoriams, atsirado būtinybė didinti vagono aširačių skaičių. Kai aširačiai prie vagono tvirtinami tiesiogiai, vienam vagonui jų panaudoti galima tik du, nes kitu atveju kiltų ratų užsipleišėjimo kreivėse tikimybė. Todėl šiandien traukinio važiuoklė dažniausiai sudaryta iš aširačių, kurie jungiami į vežimėlius, o vagono kėbulas tvirtinamas būtent prie vežimėlių, kadangi vežimėlis vagono atžvilgiu gali sukintėti [14]. Viename vežimėlyje aširačių gali būti nuo dviejų iki, retais atvejais, net šešių. Jei aširačių vežimėlyje yra daugiau nei du, tuomet jiems turi būti atskirai užtikrinta vagono galimybė pasisukti.

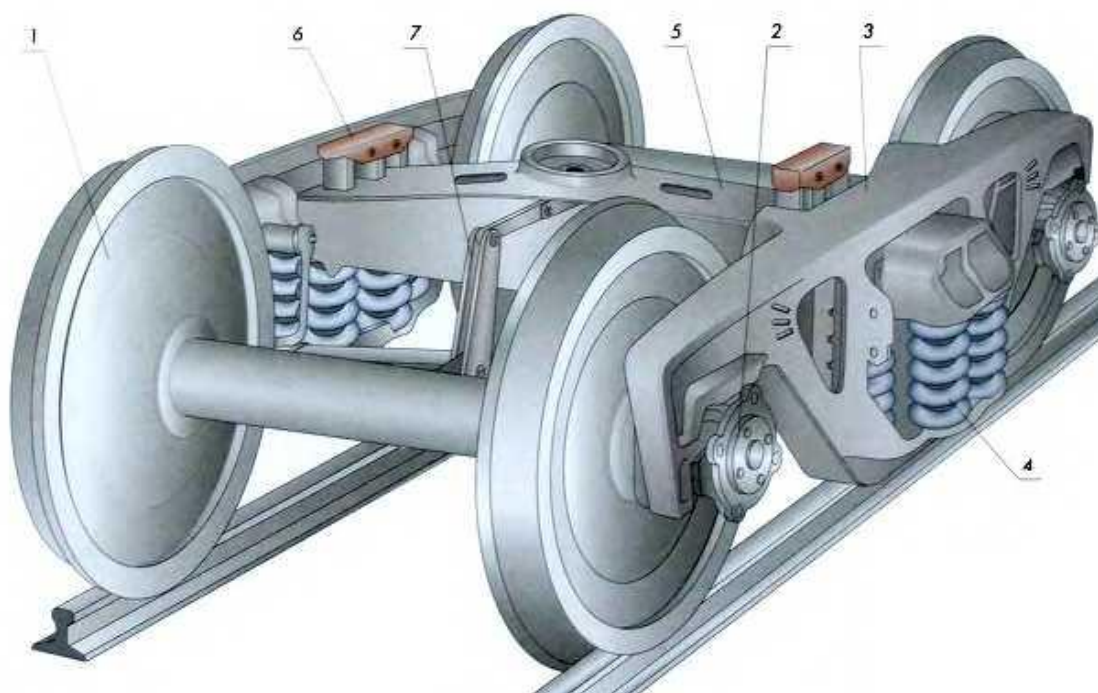
Vežimėliai gali būti klasifikuojami pagal paskirtį, taip pat konstrukciniu požiūriu. Pagal paskirtį vežimėliai gali būti skirti prekiniais arba keleiviniams vagonams. Taip pat atskirai klasifikuojami elektrinių ir dyzelinių traukinių vežimėliai. Konstrukciniu požiūriu vežimėliai gali būti skirstomi pagal ašių skaičių, pagal apkrovos perdavimą aširačiams, pagal pakabos tipą [14], [15]. 2.1 paveiksle pateiktos spyruoklinės pakabos vežimėlių schemas.

Pagal tamprių elementų skaičių vežimėliai taip pat klasifikuojami ir gali būti: viengubo, dvigubo arba trigubo pakabinimo ir atitinkamai turėti vieną, du arba tris tampriųjų elementų komplektus. Kuo daugiau tampriųjų elementų, tuo gali būti užtikrintas didesnis važiavimo traukiniu komfortas ir saugumas, todėl keleivinių vagonų vežimėliai yra dvigubo arba trigubo pakabinimo, o prekinųjų vagonų – įprastai viengubo pakabinimo. [14]



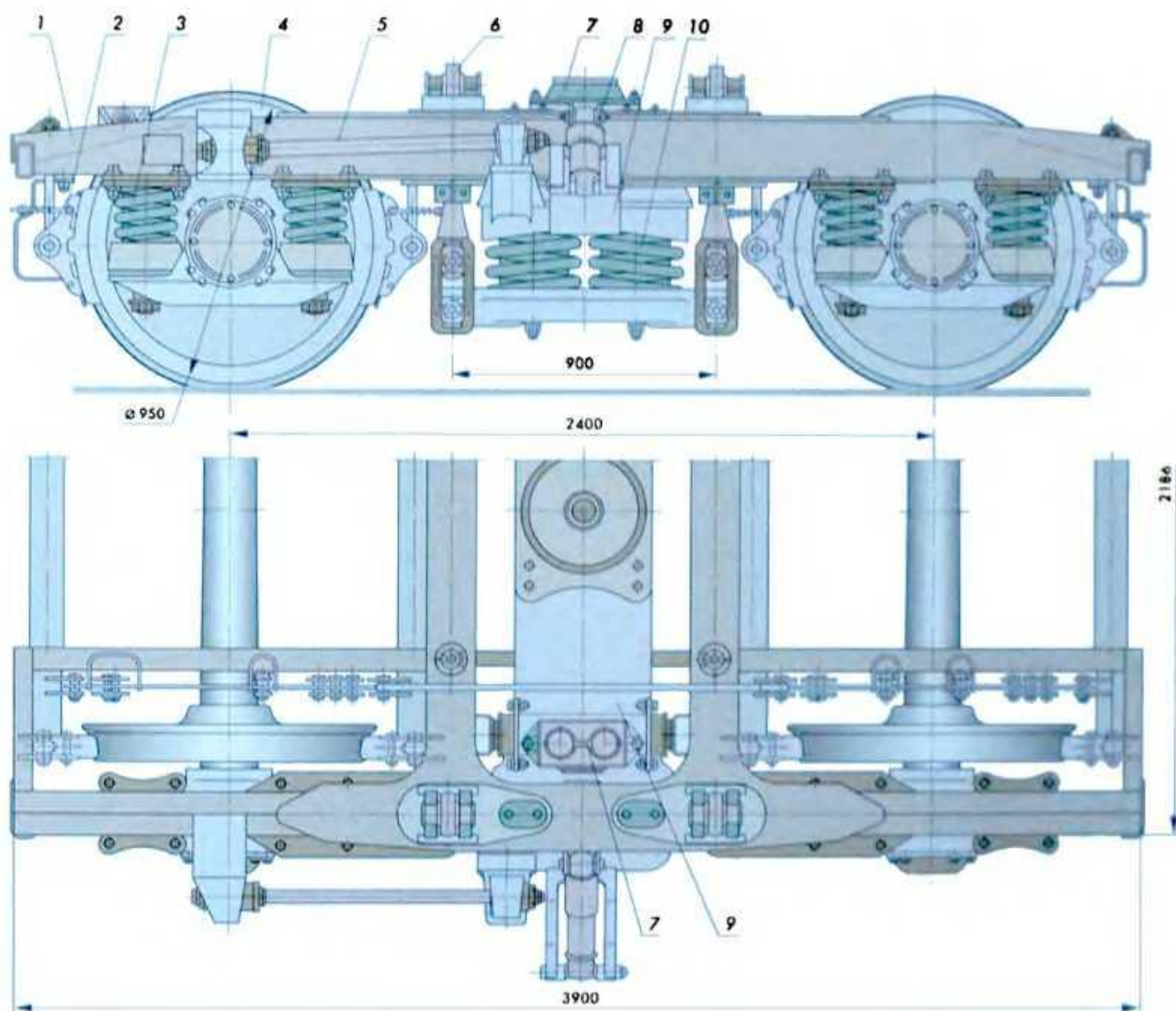
2.1 pav. Vežimėlių su spyruokline pakaba schemas (a – apkrova rėmams perduodama standžiai, o aširačiams tampriai; b – apkrova rėmams perduodama tampriai, o aširačiams standžiai; c – apkrova perduodama per lopšėlį ir spyruoklinę pakabą; d – apkrova perduodama per dvigubą spyruoklinę pakabą) [16]

Tipinė prekinio vagono konstrukcija pateikta 2.2 paveiksle. Pagrindiniai prekinio vagono vežimėlio požymiai yra šie: laikančiąją konstrukciją sudaro du horizontalūs šoniniai rėmai ir jų viduryje esančioje ertmėje sumontuota tampri pakaba (spyruoklių kompleksas) bei ant jos dedama skersinė sija. Šios sijos viduryje ant šerdese atremiamas vagonas.[14]



2.2 pav. Prekinio vagono aširatis (18-100) (1 – aširatis, 2 – ašidėžė, 3 – šoninis rėmas, 4 – spyruoklių kompleksas, 5 – skersinė sija, 6 – horizontalusis šliaužiklis, 7 – svirtinė stabdžių pavara) [16]

Tipinė keleivinio vagono vežimėlio konstrukcija pateikta 2.3 paveiksle. Keleivinio vagono vežimėliai turi horizontalioje plokštumoje išdėstytą H formos rėmą, kuris įprastai yra virš ašių. Vežimėlio viduryje, po rėmo šoninėmis sijomis montuojami lopšiai, kuriuose yra tampriųjų elementų komplektai. Ant jų dedama skersinė sija, o ant jos kaip ir prekinio vežimėlio atveju atremiamas vagono rėmas. Ašidėžės montuojamos taip pat su spyruoklių komplektais. Tokiu būdu vežimėlis tampa dvigubo pakabinimo. Keleivinių vagonų vežimėliuose taip pat naudojami virpesių slopintuvai, kurie riboja skersinės sijos judėjimą rėmo atžvilgiu. [14]



2.3 pav. Keleivinio vagono aširatis (KHP-CRI) (1 – rėmas, 2 – stabdžių pavara, 3 – tampri aširačio pakaba, 4 – aširatis, 5 – balansyras, 6 – pakaba, 7 – horizontalusis šliaužiklis, 8 – virpesių slopintuvas, 9 – skersinė sija, 10 – spyruoklių kompleksas lopšyje) [16]

2.1.2. Aširatis

Aširačiai yra viena svarbiausių traukinio dalių, nes jie nukreipia traukinio judėjimą bėgiais, priima vagono apkrovas ir perduoda jas bėgiams bei atvirkščiai [17]. Aširatis sudarytas iš ašies ir dviejų ratų.

Ašis daugiausiai deformuojasi veikiamą lenkimo momento, labiausiai apkrauta yra postebulinė ašies dalis, nes čia susidaro papildomi įtempiai dėl užpresuoto rato, veikia trinties korozija, todėl ši ašies dalis daroma didžiausio skersmens. Dėl apkrovos pobūdžio, didžiausi įtempimai ašies skerspjūvyje yra nevienodi ir didžiausi būna prie paviršiaus, o mažiausi – centre. Todėl racionalu būtų naudoti tuščiavidures ašis, nes vidurinės ašies dalies medžiagos savybės nėra išnaudojamos ir didesnis medžiagos tūris didina bendrą ašies svorį. Tačiau tokias ašis gana sunku pagaminti, todėl jos naudojamos retai, o Lietuvoje praktiškai nenaudojamos. [17]

Pagal kakliuko formą ašys skirstomos dėl skirtingų naudojamų guolių tipų (ir skirtingo jų tvirtinimo). Gali būti naudojami slydimo arba riedėjimo guoliai. Dabar dažniausiai naudojami ritininiai riedėjimo guoliai, nes jie užtikrina mažą trintį (lyginant su slydimo guoliais) ir tinkamą jėgos perdavimą ašiai.

Pagrindinės rato dalys yra ratlankis, diskas ir stebulė. Ratai gali būti skirstomi pagal keletą parametrų: diametrą, konstrukciją, medžiagą, gamybos būdą. Ratų riedėjimo skersmuo paprastai būna 950 mm arba 1050 mm. Dabartiniuose vagonuose paprastai naudojami 950 mm, o lokomotyvuose 1050 mm skersmens ratai. Ratas turi kūginį paviršių, todėl rato riedėjimo skersmuo matuojamas 70 mm nuo vidinės rato briaunos [1], [17]. Pagal konstrukciją ratai gali būti ištisiniai ir surenkami, o pagal gamybos būdą – valcuoti ir lieti. Daugiausiai Lietuvoje naudojami ištisiniai valcuoti ratai. [17], [18]

Rato riedėjimo paviršius yra veikiamas įvairių apkrovų. Ratas liesdamasis su bėgiu labai mažu plotu (apie $2,5\text{mm}^2$) turi perduoti dideles statines ir dinamines apkrovas. Todėl susilietimo vietoje atsiranda didelės deformacijos ir dideli kontaktiniai įtempimai. Susiliečiant su bėgių sandūromis, atsiranda didelės smūginės apkrovos, o stabdant atsiranda didelės trinties jėgos, dėl ko ratas įšyla. Tokiomis sąlygomis labai svarbus tinkamai parinkti rato skersmenį ir ratlankio storį. Taip pat tinkamas turi būti ratų užpresavimas, kad sujungtos detalės nebūtų pertemptos, bet sujungimas pakankamai stiprus. [17], [18]

2.1.3. Traukinio važiuoklės darbo sąlygos Lietuvoje

Lietuvoje šiuo metu keleiviniams traukiniams leistina ašies apkrova yra 22,5 t/ašiai ir maksimalus projektinis traukinių greitis lygus 160 km/h (realus naudojamas 120 km/h). Prekiniams

traukiniams leistina ašies apkrova yra 24,5 t/ašiai ir maksimalus projektinis greitis lygus 120 km/h (realus naudojamas 90 km/h) [19]. Esant sugretintam geležinkelio keliui (1520 ir 1435 mm pločio vėžės paklotos greta ant tų pačių pabėgių), keleiviniams traukiniams leidžiamas greitis siekia iki 100 km/h, o prekiniams traukiniams iki 80 km/h. [13]

Traukinio važiuoklė dirba sudėtingomis klimatinėmis sąlygomis, esant temperatūrų intervalui nuo -30°C iki +30°C. Temperatūrų skirtumas lygus 60°C, ir tai labai stipriai veikia aširačio patvarumą, bei riboja medžiagų pasirinkimo važiuoklei galimybes.

Įtempiai traukinio ašyje ribojami trijuose skirtinguose pjūviuose: ašies kakliuke, postebulinėje dalyje (ašies pjūvis toje vietoje, kur montuojamas ratas) ir vidurinėje ašies dalyje. Keleiviniams ir prekiniams traukiniams keliami skirtingi reikalavimai, nes veikiančios apkrovos ir pavojingumo lygis yra skirtingas. Leistini įtempiai pagal skerspjūvius pateikti 2.1 lentelėje.

2.1 lentelė. Leistini įtempiai pagal skerspjūvius [14]

Vagono tipas	Leistini įtempiai atitinkamoje ašies dalyje, MPa		
	kakliuke	postebulinėje dalyje	vidurinėje dalyje
keleivinis	120	140	120
prekinis	140	163	155

2.2. Automatinių aširačio tarpuvėžio pločio keitimo sistemų apžvalga

Automatinė tarpuvėžio pločio keitimo sistema pasaulyje jau nėra naujiena. Jų yra sukurta gana daug ir įvairių, tačiau ne visos pasiekė komercinio panaudojimo stadiją, jų panaudojimo praktika taip pat yra labai įvairi. Šiuo metu egzistuojančios vėžės pločio keitimo sistemos remiasi įvairiomis technologijomis [6]:

- *Ispanų „Talgo“ technologija.* Sėkmingai ir nepertraukiamai naudojama nuo 1969-ųjų metų. Tai seniausia ir plačiausiai naudojama technologija. Iš pradžių ši technologija buvo taikoma išskirtinai „Talgo“ keleiviniams traukiniams, tačiau nuo 1999-ųjų metų yra naudojama ir lokomotyvams bei šilumvežiams. Taip pat gaminami keičiamo vėžės pločio aširačiai, kurie gali būti montuojami prekiniais ir keleiviniams vagonams (tiek atskirai, tiek į vežimėlius).

- *Ispanų CAF „Brava“ technologija.* Naudojama nuo 2000-ųjų metų savaeigiams dyzeliniams ir elektriniams traukiniams, įskaitant ir greituosius traukinius. Taip pat gali būti pritaikyta kitiems keleiviniams ir prekiniais traukiniams.

- *Lenkų SUW 2000 technologija.* Skirta naudoti tarp Lenkijos–Lietuvos ir Lenkijos–Ukrainos. Gali būti pritaikyta keleiviams ir prekiniais traukiniams.

- *Vokiečių DBAG/Rafil „Typ V“ technologija.* Kol kas pratiškai nėra pritaikyta, atliekami bandymai.

- *Japonų technologija.* Atliekami bandymai nuo 1990-ųjų.

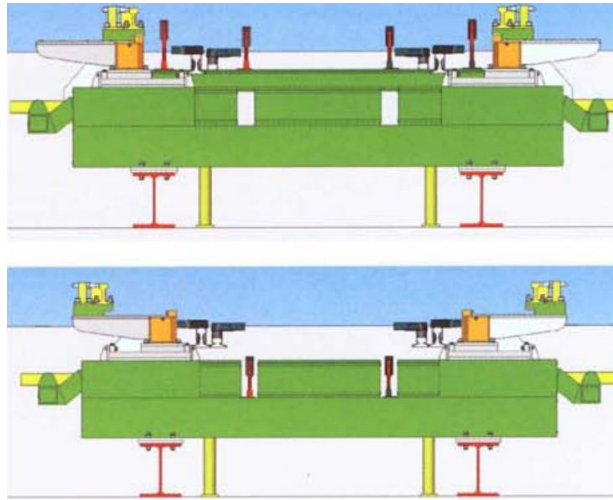
Visų paminėtų automatinių vėžės pločio keitimo sistemų koncepcija yra panaši, tačiau jos skiriasi tuo, kaip traukinys yra atremiamas, kol keičiamas tarpuvėžio plotis, kaip ratas fiksuojamas esant pastoviai padėčiai (tai yra, koks blokuojamojo mechanizmo tipas), kokio tipo vagonams ir lokomotyvams sistema yra pritaikoma. Šie skirtumai reiškia, kad skirtingos sistemos yra nesuderinamos viena su kita ir taip sukuriamos naujos problemos:

- Skirtingų technologijų traukiniai turi naudoti skirtingus ant kelio įrengiamus vėžės pločio keitimo įrenginius. Vadinasi, reiktų įrengti atskirus vėžės pločio keitimo įrenginius toje pačioje vėžės pločio keitimo vietoje. Tai sukelia eksploataavimo ir kaštų problemas, bei reiškia aukštą veiklos sudėtingumą.

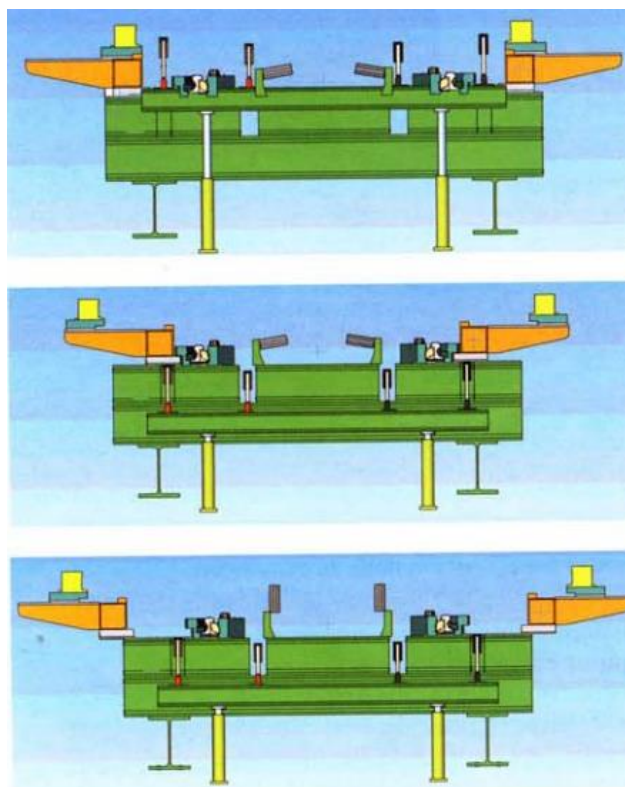
- Traukinys, norėdamas pravažiuoti vėžės keitimo vietą, negali būti suformuotas iš su skirtingų technologijų aširačiais važiuojančių vagonų. Nes tuomet tokį traukinį reiktų išformuoti, pakeisti vėžės plotį ir vėl iš naujo suformuoti.

Tiesa, šios problemos pradedamos spręsti. Šiuo metu yra sukurti bandomieji universalūs keitikliai, kuriais gali naudotis „Talgo“ ir CAF sistemas naudojančios traukiniai, „Talgo“ sistemą laikant pagrindine (2.4 pav.) [20]. Taip pat siekiama sukurti tokią universalią sistemą, kuria galėtų naudotis ne tik „Talgo“ ir CAF, bet ir „Rafil“ bei SUW 2000 tipo, t. y. visos europietiškos sistemos.

Šiuo metu toks universalus įrenginys dar nėra naudojamas, bet prototipas jau yra sukurtas (2.5 pav.). Tiesa, tokia sistema taip pat turėtų būti aprūpinta jutikliais, kurie fiksuotų, kokio tipo traukinys atvažiuoja į ratų keitimo punktą ir atitinkamai pritaikyti bėgių keitimo įrenginio konstrukciją.



2.4 pav. Įrenginys, skirtas „Talgo“ (viršuje) ir CAF (apačioje) sistemoms



2.5 pav. Įrenginio, skirto „Talgo“ (viršuje), CAF (viduryje) ir SUW2000 bei „Rafil“ (apačioje) sistemoms, prototipas

Visų vėžės pločio keitimo technologijų palyginimas pateiktas 2.2 lentelėje. Toliau šiame skyriuje kiek plačiau bus nagrinėjama ispanų „Talgo“, nes tai viena seniausių ir plačiausiai

naudojamų sistemų, taip pat kaimynų lenkų SUW 2000 ir vokiečių DBAG/Rafil „TYP V“ vėžės pločio keitimo technologijas.

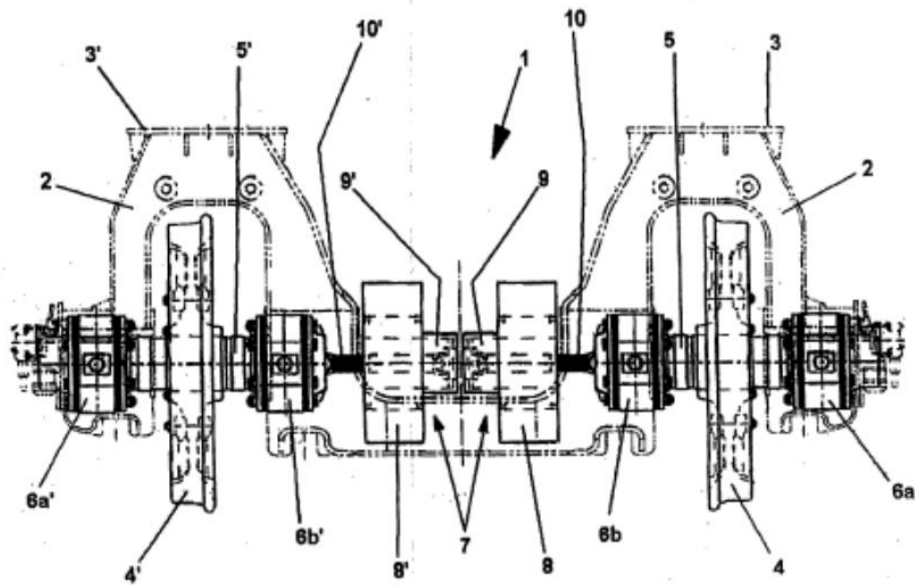
2.2 lentelė. Automatinio vėžės pločio keitimo sistemų palyginimas [6], [8], [20]–[23] [24] [25]

Sistema	„Talga“	CAF BRAVA	SUW 2000	„Rafil“	-
Šalis	Ispanija	Ispanija	Lenkija	Vokietija	Japonija
Pirmojo komercinio pritaikymo data	1969	2003	2000	-	2007
Keleiviniai vagonai	+	+	+	-	+
Prekiniai vagonai	+	-	+	+	-
Lokomotyvai	+	+	-	-	+
Pakeitimas nenukraunant ratų	-	-	+	+	-
Fiksavimo sistema	Skłastis	Riedėjimo	Canginė	Svirtinė	Riedėjimo
Traukinio važiavimo greitis, keičiant vėžės plotį	10-20 km/h	10-20 km/h	5-30 km/h	10 km/h	-
Maksimalus traukinio greitis (pagal gamintojų duomenis)	250 km/h	290 km/h	160 km/h	120 km/h	300 km/h
Pastabos	Šiuo metu važinėja 220 km/h greičiu	Tokiu greičiu važinėja nuo 2005-ųjų	Netinka greitiesiems traukiniams	Netinka greitiesiems traukiniams; tik prekiniams	Testuojant pasiektas 246 km/h greitis, 2011–2013 m. pravažiauta 70 tūkst. km

2.2.1. Talgo technologija, Ispanija

Ispanijoje sukurta Talgo automatinė tarpuvėžio pločio keitimo sistema yra viena seniausiai naudojamų tokių sistemų visame Pasulyje, veikianti daugiau nei 40 metų. Šiomis dienomis šia sistema atliekama apie 50 vėžės pločio pakeitimų per dieną [6]. Kelio įrenginio ilgis – apie 12 m.

Kaip ir kiekviena automatinė vėžės pločio keitimo sistema, Talgo sudaryta iš dviejų įrenginių – modifikuoto traukinio aširačio ir vėžės pločio keitimo įrenginio ant kelio. Talgo aširačio principinė schema pateikta 2.6 paveiksle.

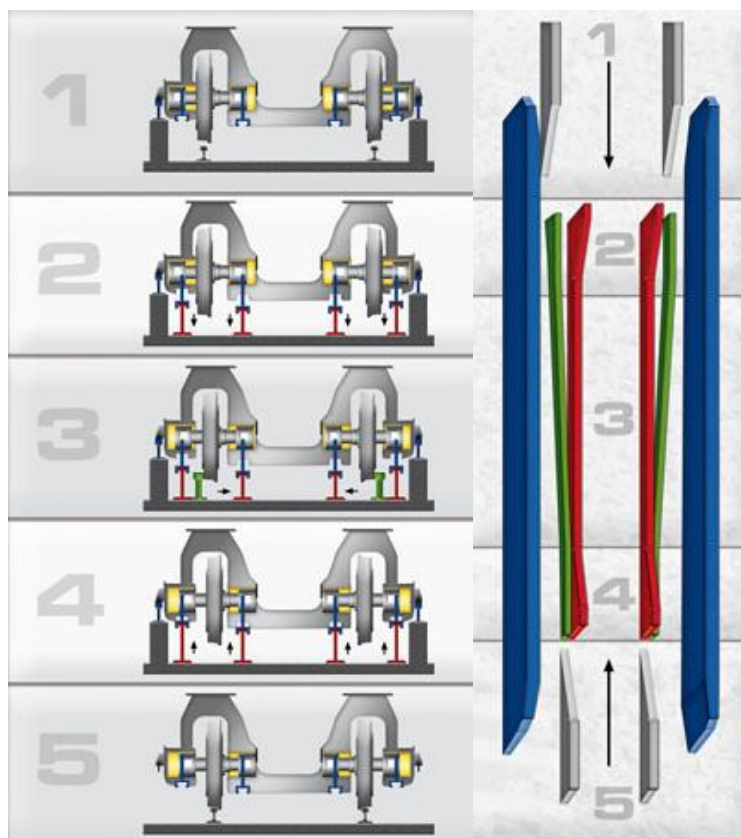


2.6 pav. Talgo sistemos aširačio schema (1 – aširatis, 2 – rėmas, atramine platforma, 4 – rato diskas, 5 – ašis, 6a ir 6b – išoriniai ir vidiniai guoliai, 7 – variklis, 8 – statorius, 9 – rotorius, 10 – teleskopinis velenas) [26]

Traukinio ratų tarpuvėžio pločio keitimo procesas vykdomas penkiais etapais (2.7 pav.):

1. Aširačio rėmas atsiremia į bėgių išorinėje pusėje nutiestą atramą ir slysta ja. Tokiu būdu nukraunami ratai, traukinio svoris tenka šoninėms atramoms, kuriomis slysta aširačio rėmas.
2. Specialaus ant kelio įrengto įrenginio pagalba sklendės, kurios neleidžia ratų ašims judėti, atsilaisvina ir traukiniui toliau važiuojant per kelio įrenginį, leidžiasi žemyn.
3. Ašys įstumiamos į reikiamą poziciją ant kelio esančių gretbėgių pagalba.
4. Skląstys užfiksuoja naują aširačio ašių padėtį.
5. Ratai nuleidžiami ir pradeda riedėti naujo pločio geležinkelio vėže vėl perimdami traukinio svorį.

Tarpuvėžio plotis gali būti pakeičiamas tiek iš siauresnės vėžės į platesnę, tiek atvirkščiai. Pagrindiniai Talgo sistemos trūkumai yra maža leistina aširačio apkrova (18 t) sudėtinga konstrukcija, kuri labiau pritaikyta pačių Talgo gaminamiems traukiniams, t.y. ją sunkiau pritaikyti standartiniams traukiniams [27]. Pagrindiniai privalumai yra ilgametis komercinis pritaikymas, kas leido sukaupti daug informacijos apie sistemos veikimą, galimus trikdžius ir gedimus.



2.7 pav. Talgo sistemos (Ispanija) ratų bazės pakeitimo procesas (kairėje – vėžės pločio keitimo etapai, dešinėje – įrenginys ant geležinkelio kelio)

2.2.2. DBAG/Rafil „Typ V“ sistema, Vokietija

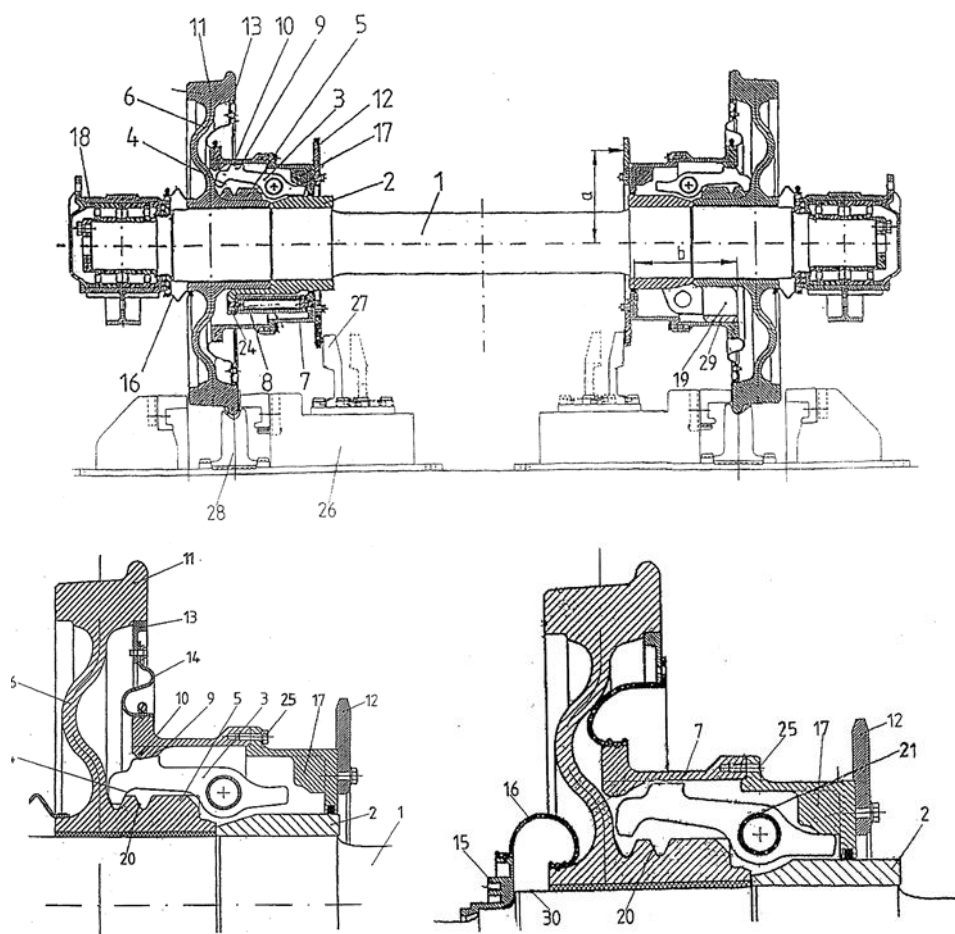
Rafil sistema pasižymi tuo, kad jos konstrukcija yra panašiausia į nemodifikuotą traukinio aširatį. Ašis lieka vientisa, nereikalingi papildomi rėmai. Šios sistemos pagrindas yra ant kelio įrengtas keitimo įrenginys su gretbėgiais ir orientuojančiais bėgiais, bei paprastos konstrukcijos pagalba užtikrintas rato poslinkis ašimi veikiant gretbėgiams. Ratai fiksuojami svirtiniu mechanizmu. Šios sistemos aširačio brėžinys pateiktas 5 paveiksle. Rafil sistemą galima naudoti esant didžiausiai 23,5t ašinei apkrovai, taigi ši sistema daugiau orientuota prekiniams vagonams.

Šios automatinės geležinkelio vėžės pločio keitimo sistemos darbas vykdomas trimis fazėmis (2.8 pav.) [28]:

1. Kai traukinys užvažiuoja ant keitiklio 26, atrakinimo žiedai 12 per kūgiškai platėjančiais paklotus gretbėgius veikiami ašine jėga. Fiksavimo mova 7 yra ašine kryptimi perstumama link rato disko 6, o spyruoklė 8 yra papildomai suspaudžiama. Dėl šio poslinkio atsiranda kontaktas tarp kontūrinės plokštės 17 ir svirties 3. Tokiu būdu svirtis yra pakeliama iš griovelio 20 ir rato diskas tampa laisvu, t.y. atrakinama fiksacija, ratas gali judėti ašine kryptimi. Šioje fazės dalyje bėgiai su grioveliu pakloti lygiagrečiai vienas kitam.

2. Atrakinimui naudoti gretbėgiai 27 šioje fazėje yra išdėstyti lygiagrečiai. Bėgiai su grioveliu 28 dabar nebėra lygiagretūs ir orientuoja ratus, kad šie ašine kryptimi persislinktų į naują poziciją.

3. Gretbėgiai 27 nebėra lygiagretūs ir kūgiškai siaurėja. Taip nuo atrakinimo žiedų nukraunama ašinė jėga, kol ji tampa lygi nuliui. Spyruoklė 8 grąžina fiksavimo movą į pradinę poziciją, o svirtis nusileidžia žemyn į trapecinį griovelį ir tokiu būdu ratas yra fiksuojamas. Šioje fazėje bėgiai su grioveliu 28 vėl eina lygiagrečiai vienas kitam. Traukinio aširačio ratų tarpuvėžio plotis pakeistas.

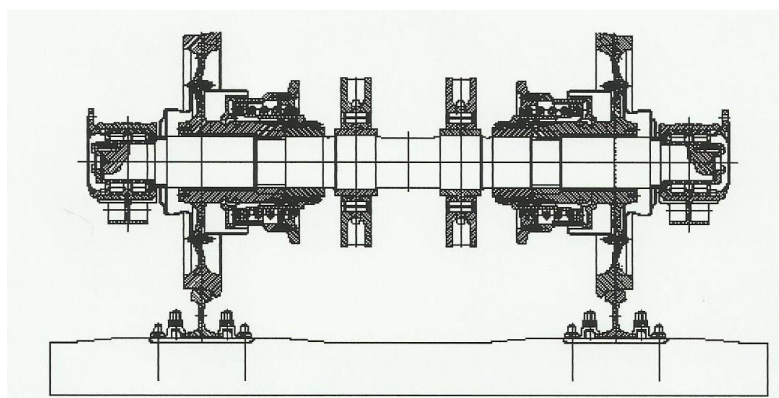
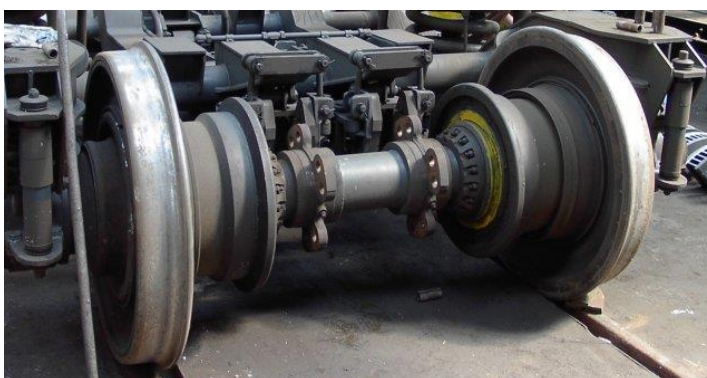


2.8 pav. Rafil sistemos aširačio vaizdas – viršuje, priartintas užrakinto fiksatoriaus vaizdas – apačioje kairėje, pilnai atrakinto – apačioje dešinėje (1 – ašis, 2 – mova, 3 – svirtis, 4 – trapecinis paviršius, 5 – rato stebulė, 6 – rato diskas, 7 – fiksavimo mova, 8 – slėgio spyruoklė, 9 – pleišto formos paviršius, 10 – lygus paviršius, 11 – ratlankis, 12 – atrakinimas, 13 – žiedas, 14 – tarpiklis, 15 – labirintinis žiedas, 16 – tarpiklis, 17 – kontūrinė plokštė, 18 – aširačio guoliai, 19 – vedantysis paviršius, 20 – trapecinis griovelis, 21 – tarpelis, 22 – nuožulnus paviršius, 23 – paviršius, 24 – projekcija, 25 – varžtinis sujungimas, 26 – vėžės pločio keitiklis, 27 – gretbėgis, 28 – bėgis su grioveliu, 29 – slydimo plokštė, 30 – slydimo vieta) [28]

Pagrindiniai Rafil sistemos trūkumai yra mažas leistinas maksimalus traukinio greitis (120 km/h) ir tai, jog ši sistema gali būti naudojama tik prekiniuose traukiniuose ir netinka keleiviniams traukiniams.

2.2.3. SUW 2000 sistema, Lenkija

SUW 2000 sistema sukurta ZNTK Poznań kompanijos „Lenkijos Valstybinių Geležinkelių“ užsakymu. Ši sistema leidžia integruoti geležinkelių sistemą į Europos-Azijos transporto koridorius ir taip pagerinti tarptautinius pervežimus. Ši sistema buvo įdiegta Lietuvos ir Lenkijos pasienyje (Mockavos geležinkelio stotyje), tačiau ji buvo naudojama tik keletui naktinių keleivinių reisų, todėl nepasiteisino ir 2012 m. ji buvo išardyta [29]. Tiesa, taip įvyko iš dalies ir dėl to, kad Lietuvoje pradėtas vykdyti projektas „Rail Baltica“, kurio metu remontuotas europinės vėžės kelias nuo Lietuvos-Lenkijos valstybių sienos iki Mockavos geležinkelių stoties. Tuo pačiu suremontuota ir 11 km Mockavos geležinkelio stoties kelių, bei atstatytas automatinis tarpuvėžio pločio keitimo įrenginys (2015 m.), tačiau jokie traukiniai juo nevažinėja [3]. SUW 2000 sistema įrengta ir Lenkijos-Ukrainos pasienyje [30].



2.9 pav. SUW 2000 sistemos aširatis (viršuje – realus vaizdas, apačioje – nubraižytas aširačio pjūvis) [31]

SUW 2000 sistema, kaip ir kitos vėžės pločio keitimo sistemos sudarytos iš modifikuoto aširačio (2.9 pav.), kurio vėžės plotį reikia pakeisti, ir vėžės pločio keitimo įrenginio, kuris įrengtas ant kelio (2.10 pav.) [23].



2.10 pav. Ant geležinkelio kelio įrengtas SUW 2000 vėžės pločio keitiklis [31]

Tarpuvėžio pločio keitimo procesas atliekamas keturiomis fazėmis (kiekvienam ratui) (2.11 pav.) [32]:

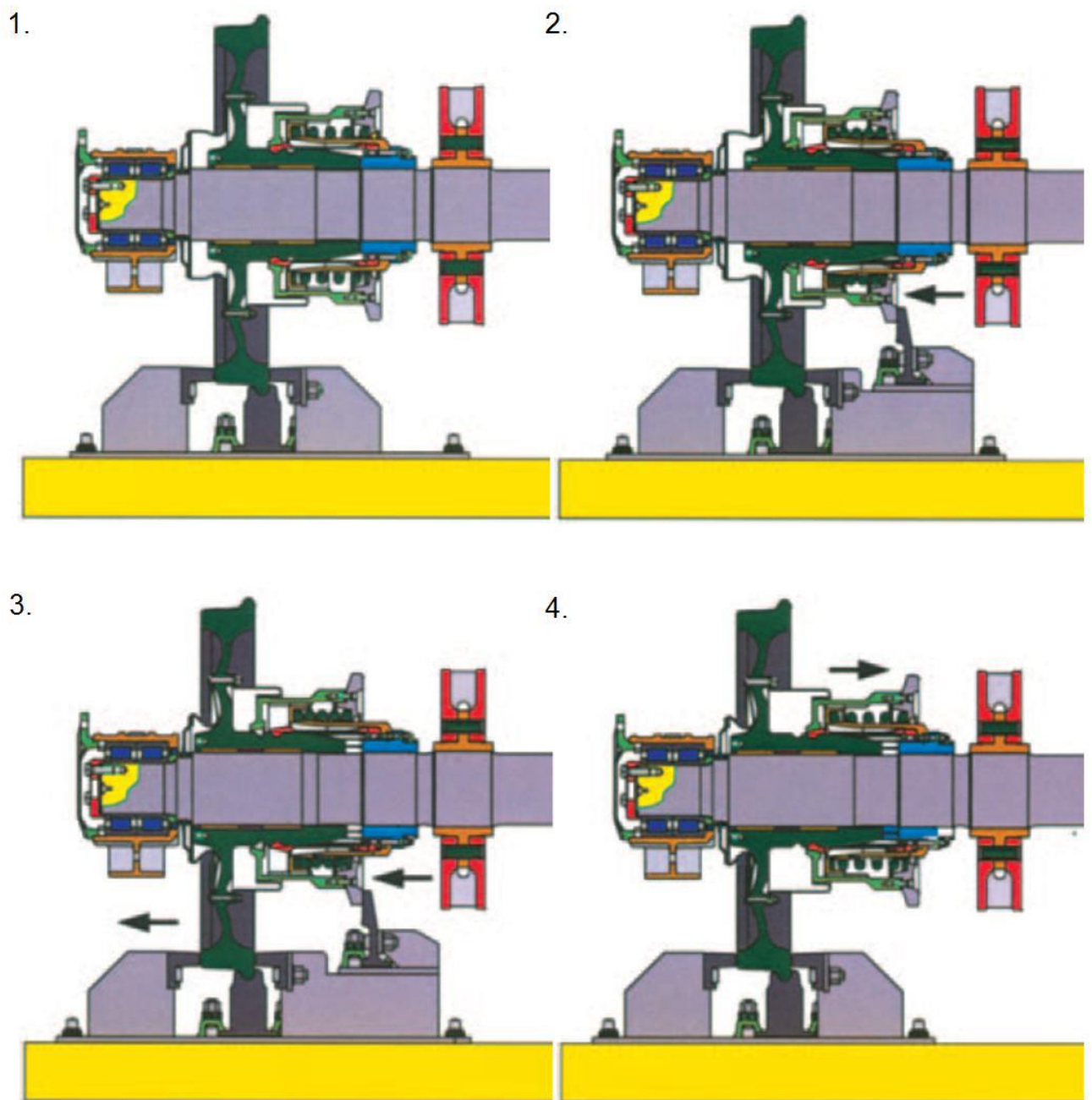
1. Aširatis įvažiuoja į pločio keitimo įrenginį. Dešinysis aširačio ratas blokuojamas latakiniame bėgyje ir tampa varančiuoju.

2. Kairiojo flanšo kontaktas su atraminiu bėgiu. Blokuojamoji įvorė juda į kairę ir atleidžia tampriąją įvorę. Išlaisvinamas kairysis ratas. Varantysis dešinysis ratas vis dar yra užblokuotas.

3. Laisvas kairysis ratas juda latakiniu bėgiu ir išilgai ašies, kol pasiekia reikiamą padėtį. Varantysis ratas užblokuotas.

4. Pasibaigus kairiojo flanšo ir atraminio bėgio kontaktui, blokuojamoji įvorė užspaudžia tampriąją įvorę. Kairysis ratas fiksuojamas naujoje padėtyje. Tuomet jis tampa varančiuoju ratu. Tuomet analogiškai pakeičiama dešiniojo aširačio rato padėtis.

Pagrindinis šios sistemos trūkumas yra tas, kad ji negali būti taikoma greitiesiems traukiniams, kas keleiviniams traukiniams, bent jau perspektyvoje, yra aktualu. Taip pat gana didelė vieno aširačio kaina (apie 33 tūkst. eurų [33]), ganėtinai ilgas (27,1 m) įrenginys ant geležinkelio kelio.



2.11 pav. Tarpuvėžio pločio keitimo proceso fazės (1 – užvažiavimas ant įrenginio, rato blokavimas; 2 – neužblokuoto rato atlaisvinimas; 3 – rato judėjimas išilgai ašies; 4 – rato fiksavimas naujoje pozicijoje) [32]

2.3. Geležinkelių darbo rodikliai

Pagrindiniai rodikliai, kuriais galima įvertinti geležinkelių veiklą ir perspektyvą Lietuvoje yra keleivių ir krovinių vežimo rodikliai. Pagrindiniai keleivių vežimo rodikliai [1]:

1. Per metus vežtų keleivių skaičius arba kitaip – parduotų bilietų skaičius. Šis per metus vežtų keleivių skaičius paprastai dar skaidomas į vietinių pervežimų ir tarptautinių pervežimų rodiklius.

2. Keleivio nuvažiuoti kilometrai. Šis rodiklis apskaičiuojamas sumuojant kiekvieno keleivio nuvažiuotą atstumą:

$$X_{kel} = \sum X_i, \quad (2.1)$$

čia X_i - i-tojo keleivio nuvažiuotas atstumas, km.

3. Vidutinis vieno keleivio vežimo nuotolis. Šis rodiklis yra išvestinis ir apskaičiuojamas keleivio kilometrus dalinant iš keleivių skaičiaus:

$$\bar{X} = \frac{X_{kel}}{N_{kel}} \quad (2.2)$$

čia N_{kel} - per metus vežtų keleivių skaičius.

4. Vidutinis vienam gyventojui tenkantis kelionių skaičius per metus. Šis rodiklis taip pat yra išvestinis ir skaičiuojamas gyventojų skaičių dalinant iš per metus vežtų keleivių skaičiaus:

$$N_{tenk} = \frac{N_{gyv}}{N_{kel}} \quad (2.3)$$

čia N_{gyv} - gyventojų skaičius.

Dažniausiai skiriami tokie krovinių vežimo rodikliai:

1. Bendras per metus vežtas krovinių kiekis. Matuojamas tonomis arba milijonais tonų. Tai pagrindinis krovinių vežimo rodiklis. Šis rodiklis dar skaidomas į vietinius bei tarptautinius vežimus. Tarptautiniai savo ruožtu skirstomi į įvežamus, išvežamus ir tranzitinius krovinių kiekius.

2. Krovinių vežimo apyvarta. Svarbus rodiklis, kuris matuojamas tonkilometrais, juo nusakomas geležinkelių transporto darbas. Gali būti skaičiuojama neto arba bruto apyvarta (tai yra, vertinamas tik krovinio svoris arba krovinio ir taros svoris). Krovinių vežimo apyvarta skaičiuojama kaip traukinių masės ir nuvažiuotų kilometrų sandaugų suma:

$$M = \sum x_i \cdot m_i \quad (2.4)$$

čia x_i - i-tojo traukinio nuvažiuotas atstumas, km; m_i - i-tojo traukinio masė, t.

3. Vidutinis vienos tonos vežimo nuotolis. Skaičiuojamas kaip krovinių apyvartos tonkilometrais ir bendro vežto krovinių kiekio tonomis santykis:

$$x_t = \frac{M}{N_t} \quad (2.5)$$

čia N_t - bendras per metus vežtas krovinių kiekis, t.

2.4. Keleivių ir krovinių vežimo geležinkeliais perspektyvos

Keleivių vežimo geležinkeliais Lietuvoje realijas ir perspektyvas plačiai savo straipsniuose nagrinėjo J. Butkevičius [33], [34]. Autoriaus straipsniuose vystoma tiesioginio maršruto geležinkeliu Vilnius–Varšuva ir Varšuva–Vilnius idėja. Tokiu būdu Lietuva geležinkelių tinklu susijungtų su Vakarų Europa ir geležinkelių transportas galėtų „atimti“ dalį keleivių, kurie keliauja pagrindiniais konkurentais – kelių ir oro transportu.

Remiantis autoriaus atliktu tyrimu [34], nutiesus „Rail Baltica“ vėžę iki Kauno, tarptautinių keleivių rinka turėtų persitvarkyti ir optimistine prognoze srautai turėtų persiskirstyti taip:

- greitasis geležinkelis iš individualių automobilių transporto turėtų perimti 15-30% keleivių, keliaujančių į Varšuvą ir 40-60% keleivių, keliaujančių į Berlyną;
- greitasis geležinkelis iš oro transporto turėtų perimti apie 60% keleivių, keliaujančių į Varšuvą ir 20-30% keleivių keliaujančių į Berlyną, Hamburgą ir Amsterdamą;
- greitasis geležinkelis iš kelių transporto (autobusų) turėtų perimti 40-50% keleivių keliaujančių į Varšuvą ir 60-80% keleivių, keliaujančių į Berlyną, Hamburgą, Amsterdamą, Paryžių.

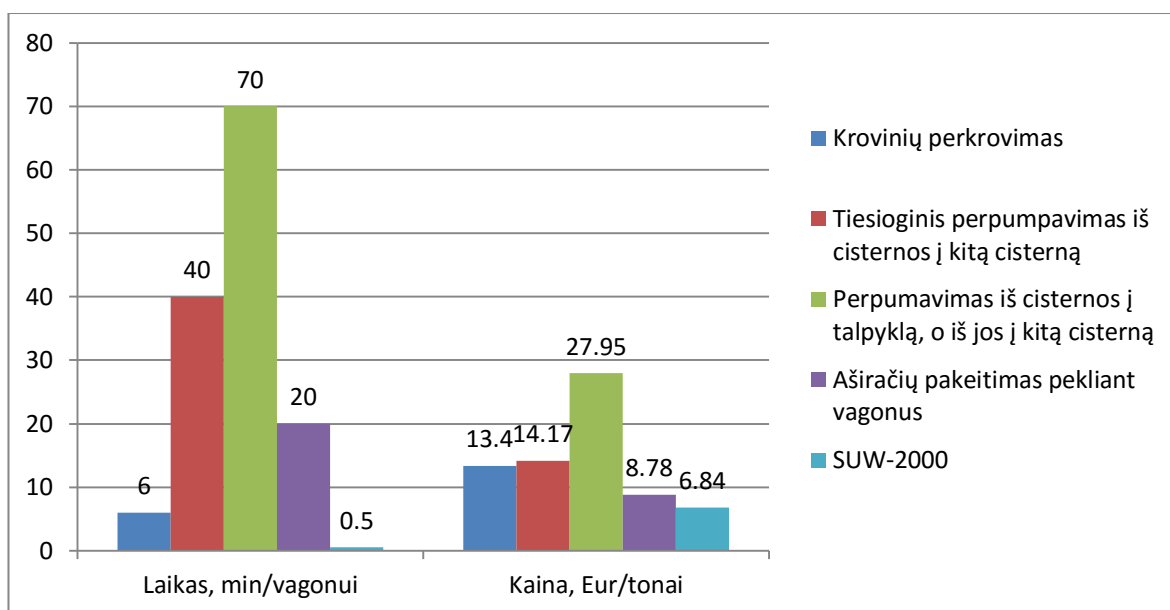
Kol kas negalima tvirtinti, ar šios autoriaus prognozės [33] turi realų šansą virsti realybe. „Rail Baltica“ projektas įgyvendinamas lėtai ir nors jau nutiesta europinės vėžės geležinkelio linija nuo Kauno iki Lenkijos valstybės sienos, ja negalima naudotis, nes nėra įrengta signalizacijos sistema [5].

A. Šimėno [35] ir E. Digrytės [12] straipsniuose nagrinėjamos problemos, susijusios ne tik su lėtu projekto „Rail Baltica“ projekto vykdymu, bet ir su tuo, kad Lenkija nėra stipriai suinteresuota atnaujinti savo šalies dalį maršrute „Vilnius-Varšuva“. Geležinkelio kelias nuo Lietuvos sienos iki Balstogės yra pasenęs, vietomis dėl prasto kelio traukinių greitis ribojamas net iki 30km/h, o naujos lėšos jo remontui ir modernizavimui šiuo metu nėra numatytos. Jei atlikus galimybių studiją lėšų vis tik atsirastų, šis ruožas būtų rekonstruojamas ne anksčiau 2018-2021 metų [12].

M. Kanclerz [8] pateikiamais duomenimis geležinkelio vėžės pločių sandūros vietose pakeisti traukinio važiuoklės vežimėlius vidutiniškai užtrunka 110 minučių traukiniui, o naudojant kintamo tarpuvėžio pločio aširačiais aprūpintus traukinius (šiuo atveju SUW 2000 tipo aširačius) sandūros vietos kirtimas užtrunka apie 30 minučių, tai yra sutaupoma apie 80 minučių kelionės laiko. Šis laikas galėtų būti ir mažesnis, tačiau turi būti atliekama ratų užfiksavimo ir sukabinimo kontrolė, bei pakeistas lokomotyvas.

Straipsnių ir tyrimų krovinių vežimo geležinkeliais perspektyvų iš Lietuvos į Vakarų Europą tema nėra daug. 2015-ais metais Europos Parlamento Transporto ir turizmo komiteto užsakymu parengto tyrimo ataskaitos duomenimis [36], Europos Sąjungos šalys dėl įvairių priežasčių mieliau renkasi kelių transportą. Įvairioje literatūroje [36]–[38] nurodoma 200-400 km riba (skirtingi autoriai teigia skirtingai, dažniausiai ši riba yra 300 km), nuo kurios geležinkelių transportas tampa žymiai efektyvesnis už krovinių gabenimą sunkvežimiais. Tačiau visur pabrėžiama, kad šiuolaikiniame pasaulyje visos transporto rūšys yra labai priklausomos viena nuo kitos, ne išimtis ir Lietuva. Europos Komisijos išleistos Baltosios knygos konkurencingos ir darnios transporto sistemos vizija taip pat pabrėžia skirtingų transporto rūšių panaudojimo svarbą gabenant krovinius.

Šiuo metu kroviniai iš Lietuvos (per Lietuvą) į Vakarų Europą geležinkeliais gabenami pasitelkiant standartinius skirtingų vėžės pločio sandūros problemos sprendimo variantus. Remiantis M. Kanclerz [8] duomenimis sudarytos 2.12 paveiksle pateiktos diagramos, kurios vaizdžiai parodo skirtingų krovinių perkrovimo/perpumpavimo trukmės ir kaštų palyginimą su kintamo vėžės pločio aširačiais (šiuo atveju SUW-2000 sistema) aprūpinto traukinio.



2.12 pav. Skirtingų krovinių traukinio vėžės sandūros įveikimo būdų palyginimas laiko ir kaštų sąnaudų atžvilgiu [8]

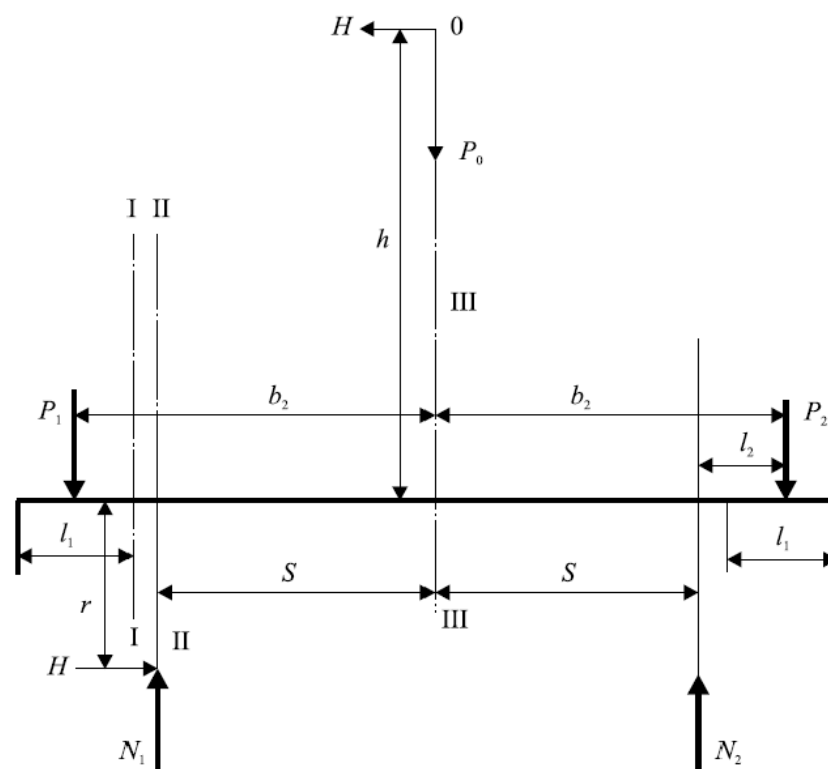
2.5. Antrojo skyriaus išvados

1. Pasaulyje sukurta ir vis dar kuriama bei tobulinama daug įvairių kintamos vėžės pločio įrenginių ir jų populiarumas pastaraisiais metais auga. Vien Europoje galima sutikti keturis skirtingus tipus, o šios sistemos Europos „šalyje pionierėje“ – Ispanijoje, veikia net dvi iš tų keturių sistemų. Įvairūs sprendimai padeda tobulėti, tačiau sprendžiant vieną problemą, sukuriama kita – skirtingos automatinės vėžės keitimo sistemos dažniausiai yra nesuderinamos tarpusavyje. Todėl siekiant pritaikyti tokią sistemą Lietuvoje, reiktų atsižvelgti į tai, kokios sistemos naudojamos šalyse kaimynėse, šiuo atveju Lenkijos ir Vokietijos sukurtos sistemos, kurios yra gana panašios ir suderinamos tarpusavyje.

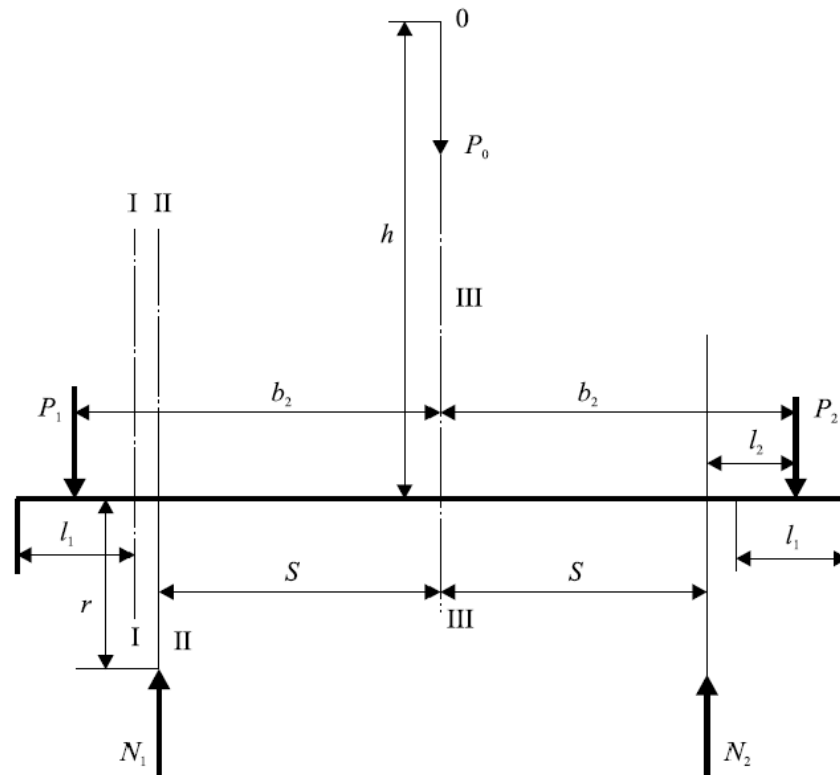
2. Atsižvelgiant į tai, kad Lietuvoje Mockavos stotyje yra įrengtas SUW-2000 tipo kintamo vėžės pločio įrenginys (nors juo šiuo metu jis ir nenaudojamas), šiame darbe bus modeliuojamas ir tiriamas būtent tokio tipo aširatis.

3. STANDARTINIO TRAUKINIO AŠIRAČIO TYRIMAS NAUDOJANT BAIGTINIŲ ELEMENTŲ METODĄ

Traukinio aširatis dirba sudėtingomis sąlygomis: jį veikia didelės statinės ir dinaminės apkrovos, riedėjimą palengvinantis, bet patvarumą mažinantis praktiškai taškinis rato kontaktas su bėgiu, presuota jungtis tarp rato stebulės ir ašies. Dažniausiai literatūroje [14], [39], [40] pateikiama aširačio stiprumo skaičiavimo schema parodyta 3.1 paveiksle. Šioje schemoje vaizduojama jėga H – horizontali apkrova, atsirandanti nuo veikiančios išcentrinės jėgos, vėjo spaudimo ir ratų su bėgiais sąveikos vagonui judant kreive. Tačiau atliekant tyrimą ši jėga nebus vertinama, nes šiame darbe siekiama ne įvertinti ašies įtempių persiskirstymą esant nevienodoms ašies kakliukus veikiančioms jėgoms, o įtempių persiskirstymą esant skirtingam vėžės pločiui bei apkrovai, ašiai išliekant tokiai pačiai. Taigi, skaičiavimams naudosiu 3.2 paveiksle pateiktą schemą, kuri yra 3.1 paveiksle pateiktos schemos modifikacija.



3.1 pav. Ašies apkrovų diagrama (P_1 , P_2 – ašies apkrova, N_1 , N_2 – bėgio reakcija, H – išilginė ašies apkrova kreivėje, S – pusė atstumo tarp ratų riedėjimo apskritimų, b_2 – pusė atstumo tarp ašies kakliukų centrų, l_1 – ašies kakliukų ilgis, l_2 – ašies kakliuko centro atstumas nuo rato riedėjimo apskritimo, h – vagono svorio centro atstumas nuo ašies sukimosi centro, r – rato riedėjimo apskritimo spindulys, I, II, III – atitinkami ašies pjūviai: ašies kakliukas, postebulinė dalis, vidurinė dalis) [14]



3.2 pav. Ašies apkrovų diagrama, naudojama skaičiavimuose [14]

3.1. Aširačio geometrinis ir skaičiuojamasis modeliai

Lietuvoje naudojami penkių tipų aširačiai. Aširačio tipas nustatomas pagal ašies tipą ir rato riedėjimo skersmenį [18]. Tyrime nagrinėjamas prekinio vagono aširatis, montuojamas su riedėjimo guoliais. Ašies kakliukas universalus, o guolis tvirtinamas poveržle. Ašis pilnavidurė, matmenys pagal GOST 22780-93 standartą [41]. Ratų riedėjimo paviršius kūginis, riedėjimo apskritimo skersmuo lygus 950 mm. Ratas be bandažo, vientisas. Aširačio tipas ir jo žymėjimas pateiktas 3.1 lentelėje. Modelyje naudojami UIC60 tipo bėgiai. Įtempimas tarp suleidžiamųjų ašių ir ratų centrų paviršių įprastai būna 0,18-0,3 mm. Skaičiavimuose priimsiu vidutinę 0,24 mm reikšmę.

3.1 lentelė. Aširačio tipas [18]

Aširačio žymuo	Ašies žymuo	Rato skersmuo, mm
RU1Š-950	RU1Š	950

Aširačio ant bėgių geometrinis modelis sukurtas programa Solidworks. Geometrinio modelio vaizdas pateiktas 3.3 paveiksle.



3.3 pav. Geometrinio aširačio modelio izometrinis vaizdas

Skaičiuojamasis modelis kuriamas ir analizė atliekama programa ANSYS. Modelio elementams priskiriamos medžiagos, kurių charakteristikos pateiktos 3.2 lentelėje.

3.2 lentelė. Medžiagos charakteristikos

Elementas	Tankis, kg/m ³	Stiprumo riba, MPa	Tamprumo modulis, MPa	Puasono koeficientas	Tangentinis modulis, MPa
Ašis	7850	585	210000	0,29	2100
Ratas	7820	745	205000	0,285	2050
Bėgis	7850	880	205000	0,3	2050

Tiriant aširačius kompiuterinėmis programomis dažniausiai nagrinėjamas vienas iš dviejų kontaktų: arba kontaktas tarp bėgio ir rato, arba tarp ašies ir rato. Šiame darbe sukurtas modelis, įvertinantis abi šias kontakto sąlygas, kad būtų gauta reali aširačio deformacijos forma. Kontaktas tarp bėgio ir rato tarnauja kaip kraštinė sąlyga, ANSYS programoje [42] jis nurodomas kaip šiurkštus kontaktas (angl. rough). Šis kontaktas yra idealiai šiurkštus, tai reiškia, jog slydimas nėra galimas, tačiau paviršiai vienas kito atžvilgiu priklausomai nuo veikiančių apkrovų gali judėti. Tuo tarpu tarp rato ir ašies nurodomas trinties kontaktas (angl. frictional). Šis kontakto tipas leidžia paviršiams slysti pagal nurodytą trinties koeficientą.

Netiesinio kietakūnio paviršių kontaktams apibrėžti gali būti naudojamas tiesioginės baudos arba papildytas Lagranžo metodas. Kadangi pastarasis yra mažiau jautrus kontakto standumui, skaičiavimuose naudojama būtent ši kontakto formuluotė. Kontaktui tarp ašies ir rato

parenkamas asimetrinis elgesio tipas, kuris reiškia, kad kontaktinis kietakūnis (angl. contact body) negali įsikverbti į taikinio kietakūnį (angl. target body) [42], [43]. Kontaktinis kietakūnis šių skaičiavimų atveju yra ratas, o taikiny – ašis.

Tyrimo tikslas išsiaiškinti apkrovų poveikį aširačiui, kuomet ašies išlieka ta pati, o kinta atstumas tarp ratų. Taip imituojamas kintamo vėžės pločio įrenginio veikimas, kuomet ant tos pačios ašies ratai gali būti fiksuoti dviejose padėtyse. Iš viso atliekami šeši bandymai, jų sąlygos pateiktos 3.3 lentelėje.

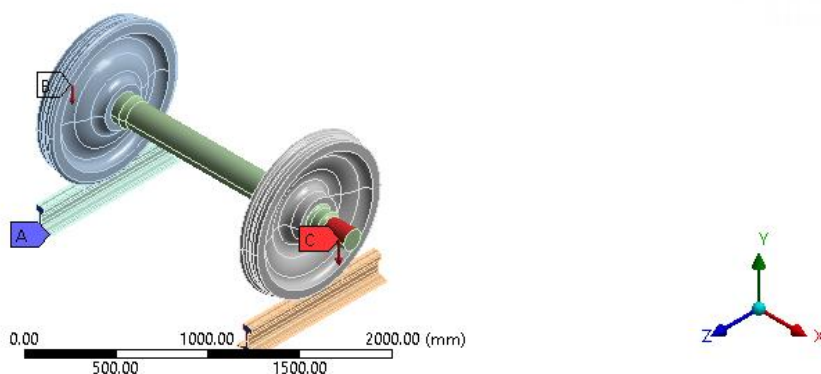
3.3 lentelė. Bandymo sąlygos ir modelio geometriniai parametrai

Bandymo numeris	Vėžės plotis, mm	S, mm	l1, mm	l2, mm	b2, mm	P ₀ , t
1	1520	790	166,15	234,925	1024,925	12.5
2		790	166,15	234,925	1024,925	22.5
3		790	166,15	234,925	1024,925	32.5
4	1435	747,5	166,15	277,425	1024,925	12.5
5		747,5	166,15	277,425	1024,925	22.5
6		747,5	166,15	277,425	1024,925	32.5

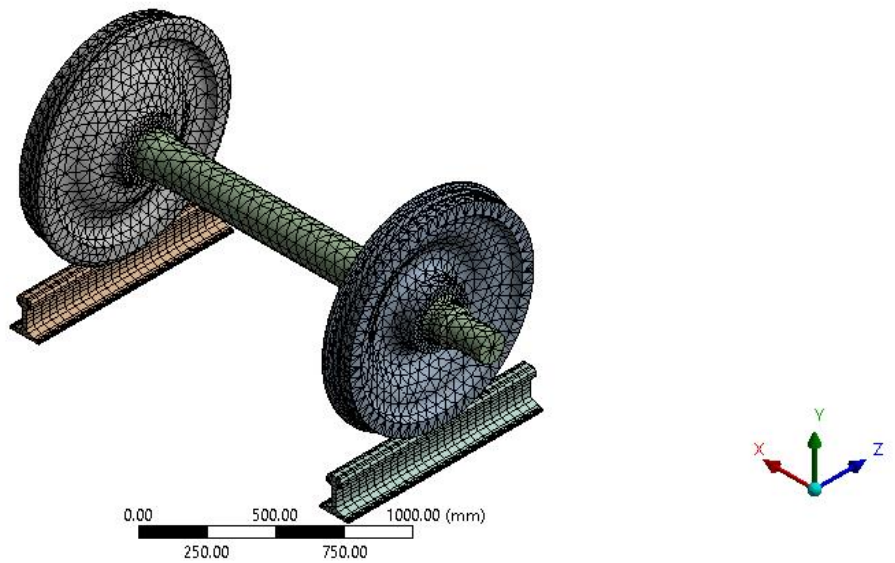
Jėga aširačiui perduodama per ašies kakliuką, taigi šioje vietoje pridedamos jėgos (abiems kakliukams). Bėgių apačia ir galai įtvirtinami nejudamai. Modelio vaizdas su apkrovomis ir kraštinėmis sąlygomis pateiktas 3.4 paveiksle. Modelis suskaidomas baigtiniais elementais. Ašiai ir ratams parenkamas skaidymas tetraedro formos elementais, o bėgiai skaidomi oktaedro formos elementais. Kontakto vietose tinklelio dydis lygus 20 mm, bėgiai skaidomi 40 mm dydžio elementais, o ratai ir ašis – 50 mm dydžio elementais. Modelio vaizdas suskaidytas baigtiniais elementais pateiktas 3.5 paveiksle.

B: 1520mm_22,5t_30c
 Static Structural
 Time: 1. s
 2016-05-19 15:18

A Fixed Support
 B Force: 1.125e+005 N
 C Force 2: 1.125e+005 N



3.4 pav. Modelio vaizdas su nurodytomis kraštinėmis sąlygomis



3.5 pav. Baigtinių elementų tinklelis

3.2. Skaičiavimo rezultatų vertinimo kriterijai

Darbe naudojami trys rezultatų vertinimo ir tikrinimo kriterijai:

1. Analizuojamas Mizeso ekvivalentinių įtempių pasiskirstymą ašyje ir pagrindiniuose trijuose jos pjūviuose: ašies kakliuko, postebulinės dalies ir vidurinės dalies. Įtempimai pagal Mizeso kriterijų parodo modelio apkrovimo lygį, palyginti su medžiagos takumo riba: jei veikiantys įtempimai mažesni už medžiagos takumo ribą, tokiu atveju bus plastinės deformacijos, priešingu atveju liekamosios deformacijos [44].

Energetinė (Huberio ir Mizeso) stiprumo hipotezė teigia, kad ribinio įtempimų būvio atsiradimo priežastis yra santykinės potencinės deformavimo energijos dalis, kuri susikaupė dėl formos pokyčių [45].

Pagrindinė energetinės stiprumo hipotezės nelygybė:

$$\sigma_{equ} = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2} \leq \sigma_{lim}, \text{ MPa} \quad (3.1)$$

čia $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ - svarbiausieji įtempiai, MPa;

σ_{lim} - ribiniai įtempiai, MPa;

σ_{equ} - ekvivalentiniai įtempiai, MPa. [10]

Įtempiai svarbiausiuose skerspjūviuose yra ribojami, jie neturi viršyti reikšmių, pateiktų 3.4 lentelėje.

3.4 lentelė. Leistini įtempiai pagal skerspjūvius [14]

	Leistini įtempiai atitinkamoje ašies dalyje, MPa		
	kakliuke	postebulinėje dalyje	vidurinėje dalyje
Keleivinių vagonų ašyse	120	140	120
Prekinių vagonų ašyse	140	163	155

Kiekviename skerspjūvyje galima apskaičiuoti mažiausią leistiną skersmenį:

$$d_i = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot M_i}{\pi \cdot |\sigma_i|}}, \text{ mm} \quad (3.2)$$

čia M_i - lenkimo momentas skerspjūvyje, Nm;

σ_i - leistini įtempiai skerspjūvyje, MPa.

2. Analizuojamas poslinkių ir deformacijų pasiskirstymas. Analitinis ir grafinis deformuoto aširačio vertinimas ir lyginimas su atitikimu realioms sąlygoms.

3. Analitinis atramos susidarančių reakcijų jėgų skaičiavimas pagal 3.2 paveiksle pateiktą schemą. Gautų rezultatų palyginimas su simuliacijos metu gautais reakcijų rezultatais.

Reakcijų jėgos abiemis atramos taškams skaičiuojamos vienodai, nes nevertinama horizontalioji apkrova. Skaičiuojama pagal šią formulę:

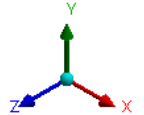
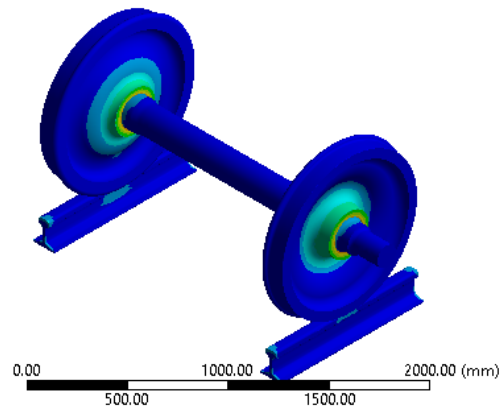
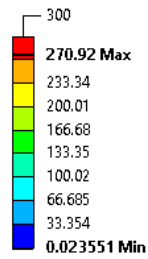
$$N_{1,2} = \frac{P_{1,2}(b_2 + S)}{2S}. \quad (3.3)$$

3.3. Skaičiavimo rezultatai

Įtempių pasiskirstymas ir deformacijų pobūdis pateikiami 3.6-3.15 paveiksluose. Skaičiavimo rezultatų suvestinė pateikiama 3.5 lentelėje ir 3.16-3.21 paveiksluose. Reakcijos jėgų skaičiavimas pateiktas 3.7 lentelėje.

D: 1520mm_12,5t_30c

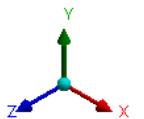
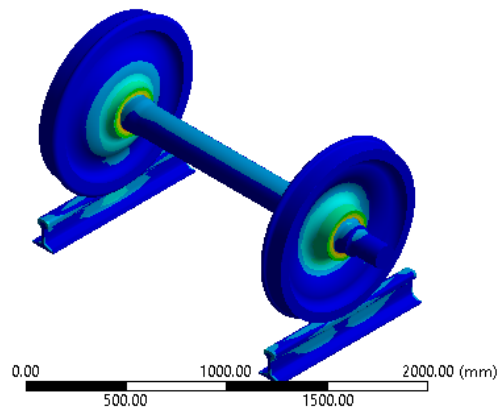
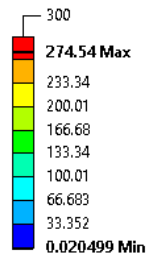
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 1
2016-05-15 02:17



a) apkrova 12,5 t

B: 1520mm_22,5t_30c

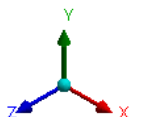
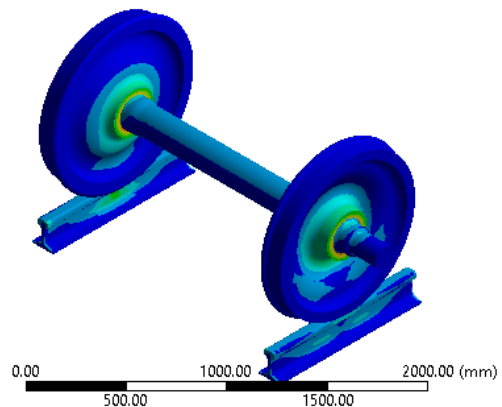
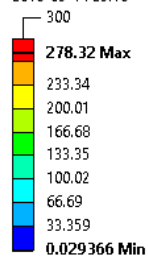
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 1
2016-05-15 02:00



b) apkrova 22,5 t

E: 1520mm_32,5t_30c

Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 1
2016-05-14 23:16



c) apkrova 32,5 t

3.6 pav. Ekvivalentinių Mizeso įtempių pasiskirstymas (izometrinis vaizdas), kai tarpuvėžio plotis lygus 1520 mm

G: 1435mm_12,5t_30C

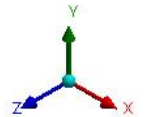
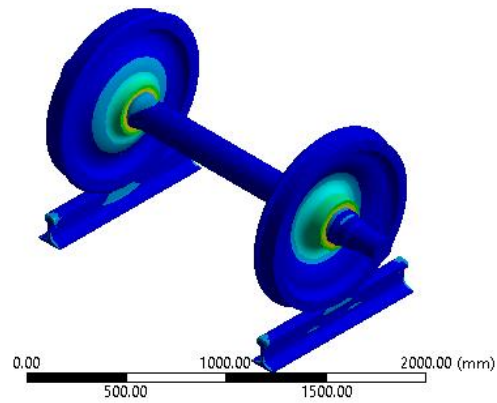
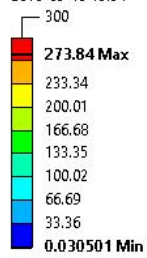
Equivalent Stress

Type: Equivalent (von-Mises) Stress

Unit: MPa

Time: 1

2016-05-15 13:54



a) apkrova 12,5 t

F: 1435mm_22,5t_30C

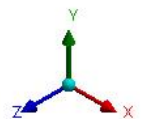
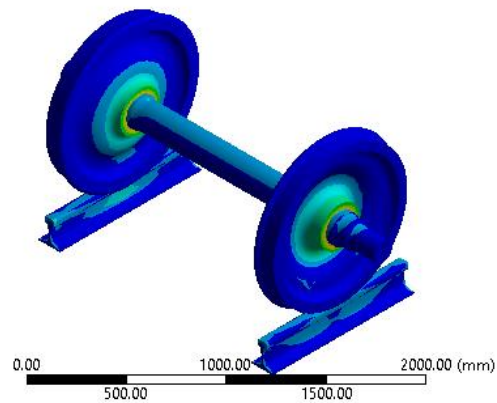
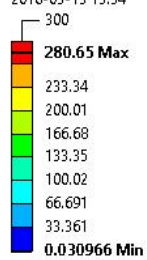
Equivalent Stress

Type: Equivalent (von-Mises) Stress

Unit: MPa

Time: 1

2016-05-15 13:34



b) apkrova 22,5 t

H: 1435mm_32,5t_30C

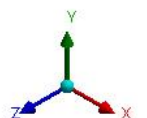
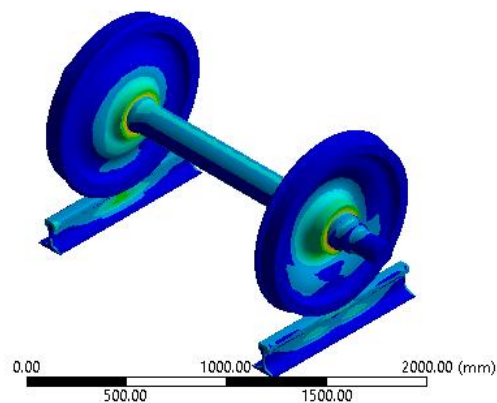
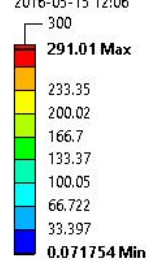
Equivalent Stress

Type: Equivalent (von-Mises) Stress

Unit: MPa

Time: 1

2016-05-15 12:06

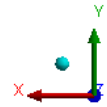
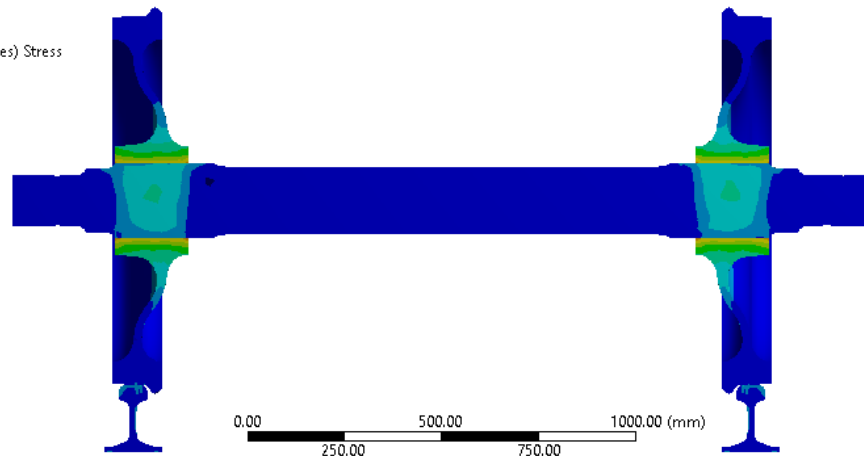
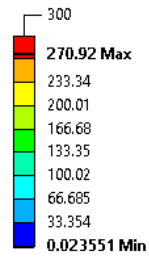


c) apkrova 32,5 t

3.7 pav. Ekvivalentinių Mizeso įtempių pasiskirstymas (izometrinis vaizdas), kai tarpuvėžio plotis lygus 1435 mm

D: 1520mm_12,5t_30c

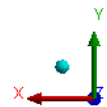
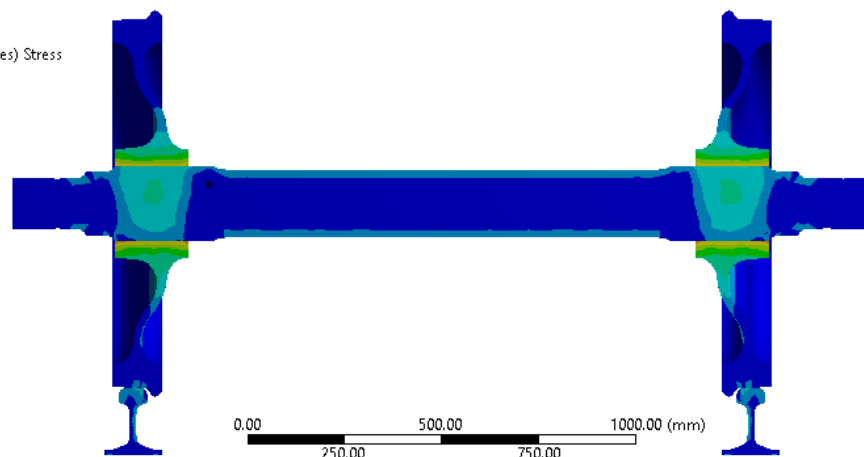
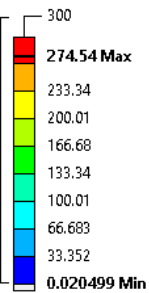
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 1
2016-05-15 02:18



a) apkrova 12,5 t

B: 1520mm_22,5t_30c

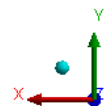
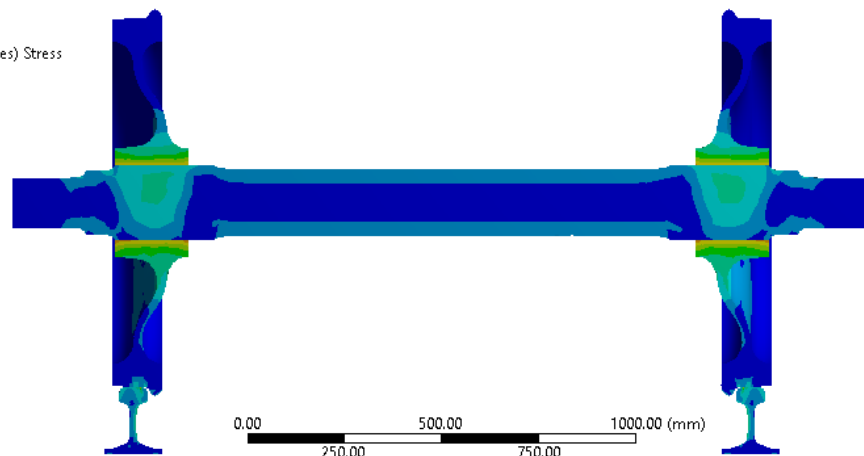
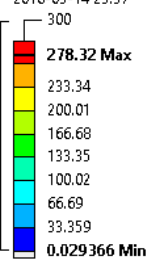
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 1
2016-05-15 02:05



b) apkrova 22,5 t

E: 1520mm_32,5t_30c

Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 1
2016-05-14 23:57



c) apkrova 32,5 t

3.8 pav. Ekvivalentinių Mizeso įtempių pasiskirstymas (vertikalus pjūvis jėgos veikimo plokštumoje), kai tarpuvėžio plotis lygus 1520 mm

G: 1435mm_12,5t_30C

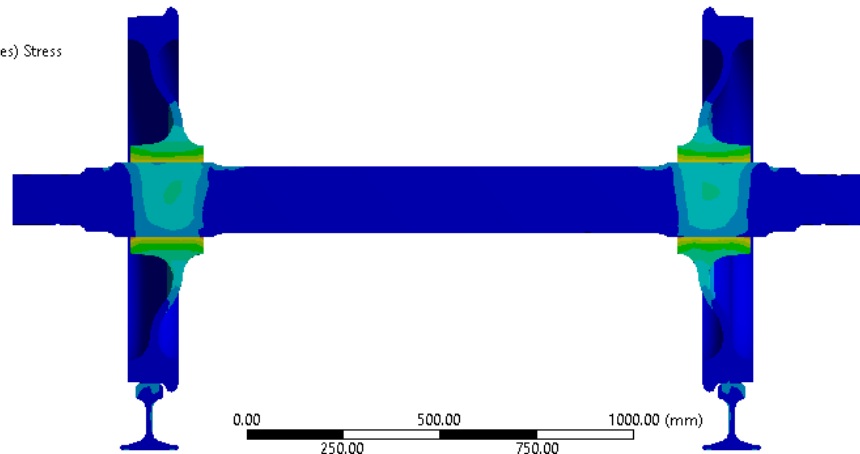
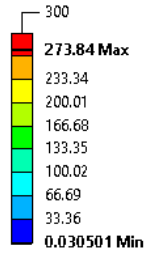
Equivalent Stress

Type: Equivalent (von-Mises) Stress

Unit: MPa

Time: 1

2016-05-15 13:55



a) apkrova 12,5 t

F: 1435mm_22,5t_30C

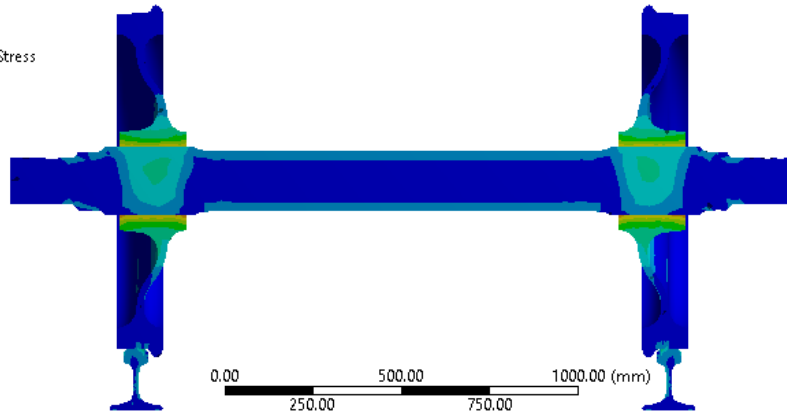
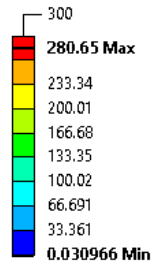
Equivalent Stress

Type: Equivalent (von-Mises) Stress

Unit: MPa

Time: 1

2016-05-19 19:19



b) apkrova 22,5 t

H: 1435mm_32,5t_30C

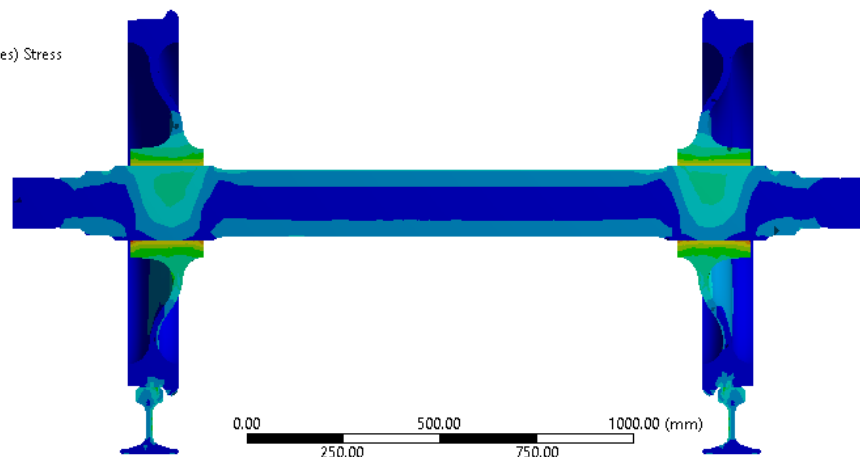
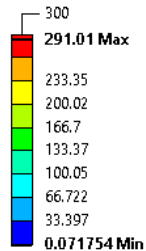
Equivalent Stress

Type: Equivalent (von-Mises) Stress

Unit: MPa

Time: 1

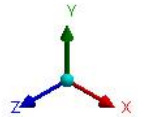
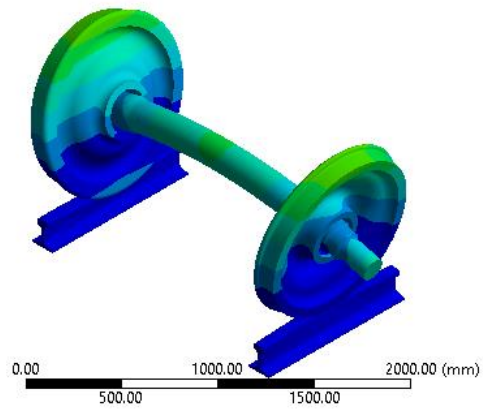
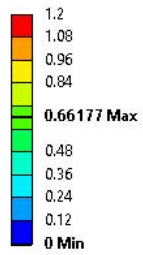
2016-05-15 12:57



c) apkrova 32,5 t

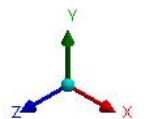
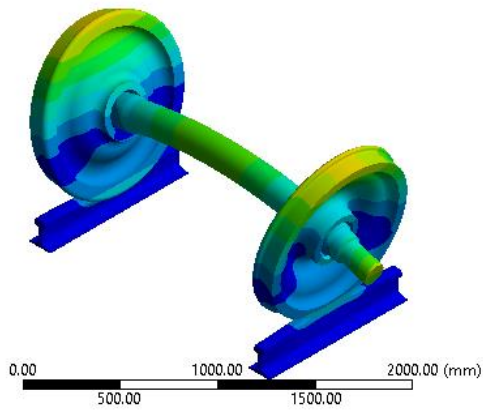
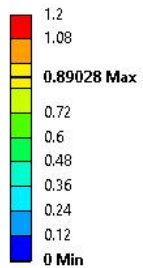
3.9 pav. Ekvivalentinių Mizeso įtempių pasiskirstymas (vertikalus pjūvis jėgos veikimo plokštumoje), kai tarpuvėžio plotis lygus 1435 mm

D: 1520mm_12,5t_30c
 Total Deformation
 Type: Total Deformation
 Unit: mm
 Time: 1
 2016-05-15 02:19



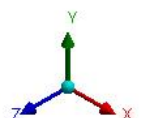
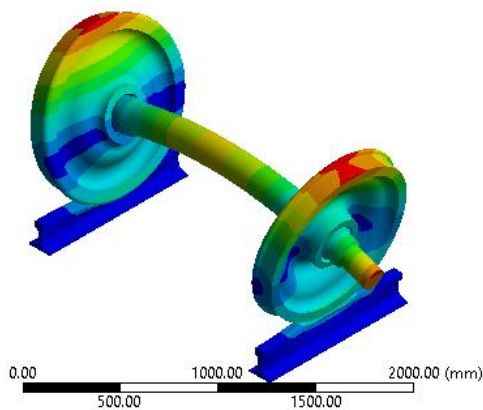
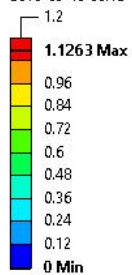
a) apkrova 12,5 t

B: 1520mm_22,5t_30c
 Total Deformation
 Type: Total Deformation
 Unit: mm
 Time: 1
 2016-05-15 02:09



b) apkrova 22,5 t

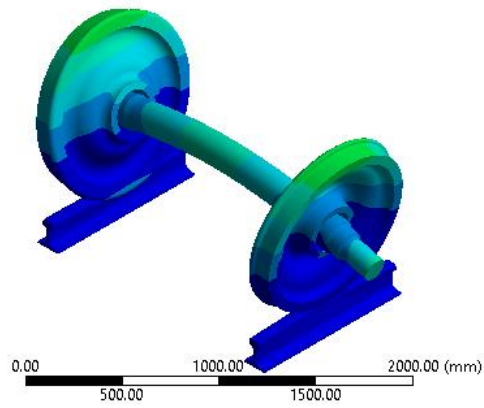
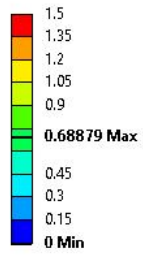
E: 1520mm_32,5t_30c
 Total Deformation
 Type: Total Deformation
 Unit: mm
 Time: 1
 2016-05-15 00:12



c) apkrova 32,5 t

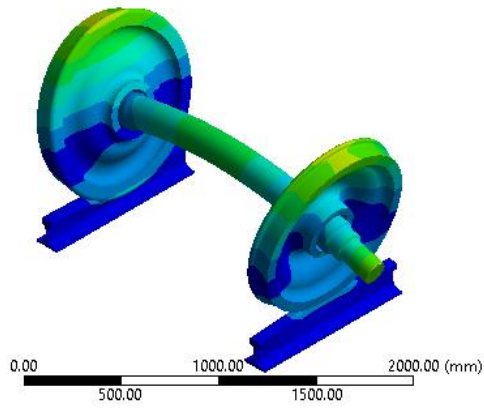
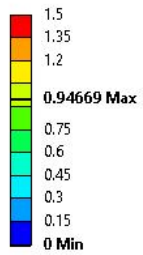
3.10 pav. Poslinkių epiūra (izometrinis vaizdas), kai tarpuvėžio plotis lygus 1520 mm

G: 1435mm_12,5t_30C
 Total Deformation
 Type: Total Deformation
 Unit: mm
 Time: 1
 2016-05-15 13:56



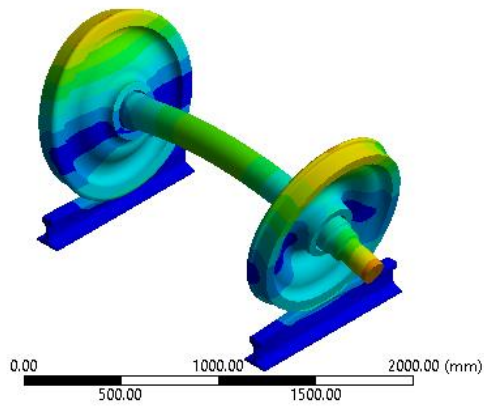
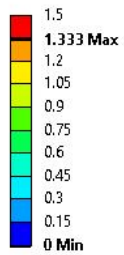
a) apkrova 12,5 t

F: 1435mm_22,5t_30C
 Total Deformation
 Type: Total Deformation
 Unit: mm
 Time: 1
 2016-05-15 13:37



b) apkrova 22,5 t

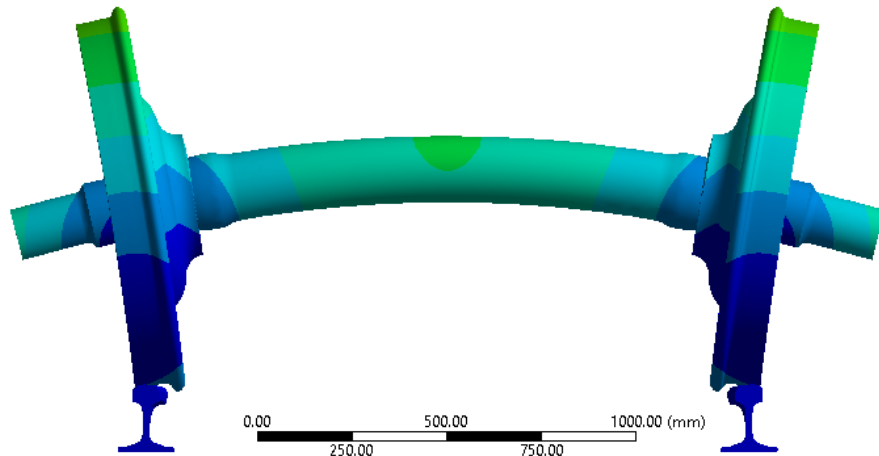
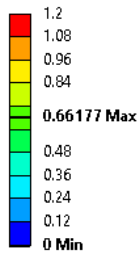
H: 1435mm_32,5t_30C
 Total Deformation
 Type: Total Deformation
 Unit: mm
 Time: 1
 2016-05-15 12:59



c) apkrova 32,5 t

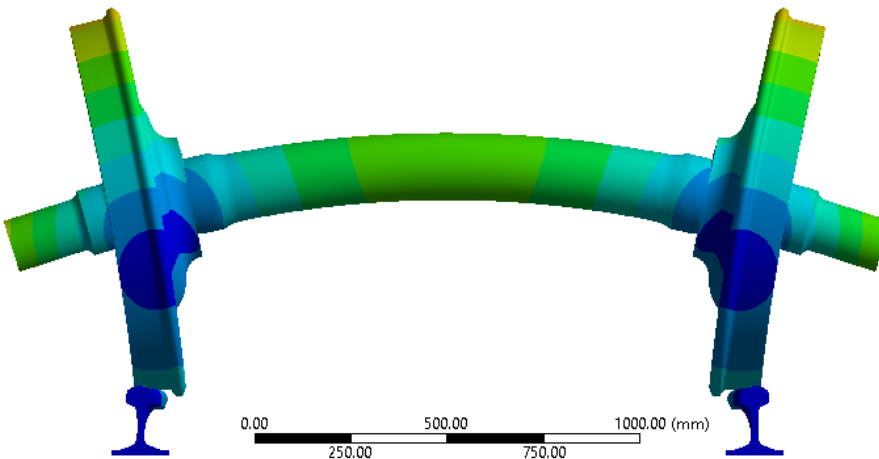
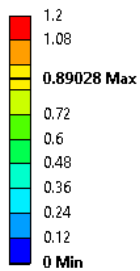
3.11 pav. Poslinkių epiūra (izometrinis vaizdas), kai tarpuvėžio plotis lygus 1435 mm

D: 1520mm_12,5t_30c
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1
2016-05-15 02:20



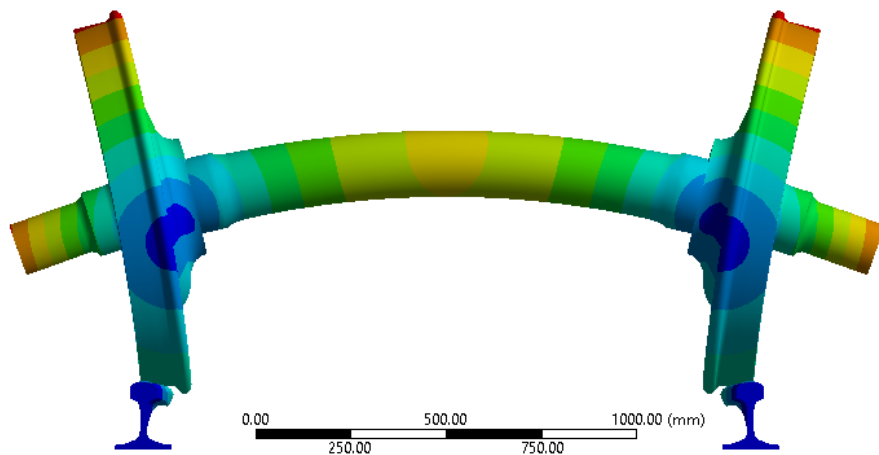
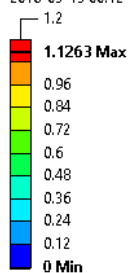
a) apkrova 12,5 t

B: 1520mm_22,5t_30c
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1
2016-05-15 02:09



b) apkrova 22,5 t

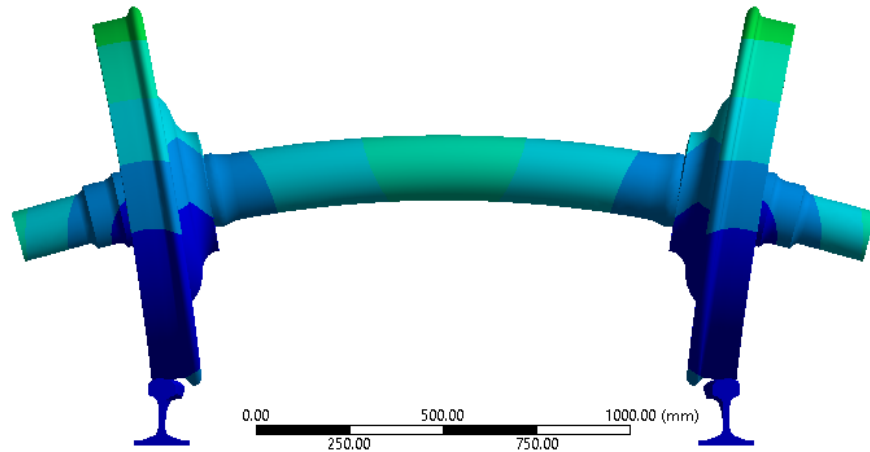
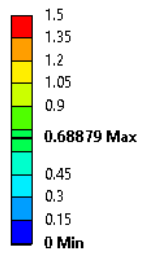
E: 1520mm_32,5t_30c
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1
2016-05-15 00:12



c) apkrova 32,5 t

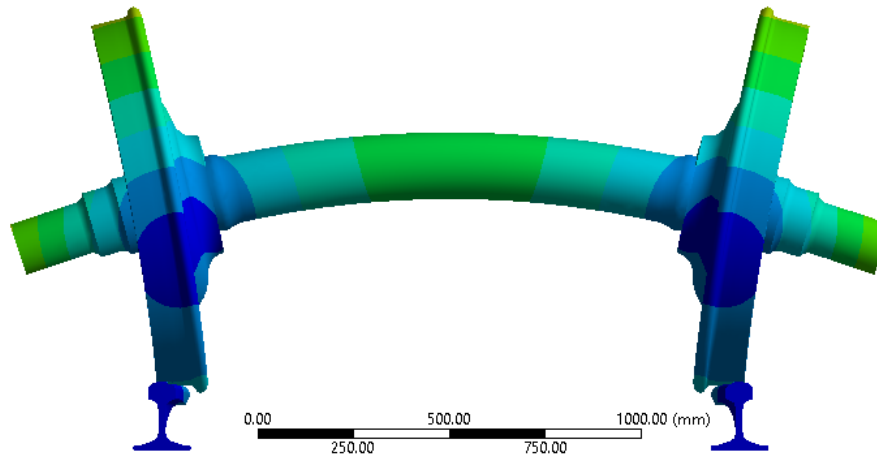
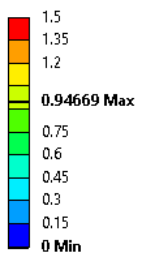
3.12 pav. Poslinkių epiūra (vaizdas iš priekio), kai tarpuvėžio plotis lygus 1520 mm

G: 1435mm_12,5t_30C
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1
2016-05-15 13:57



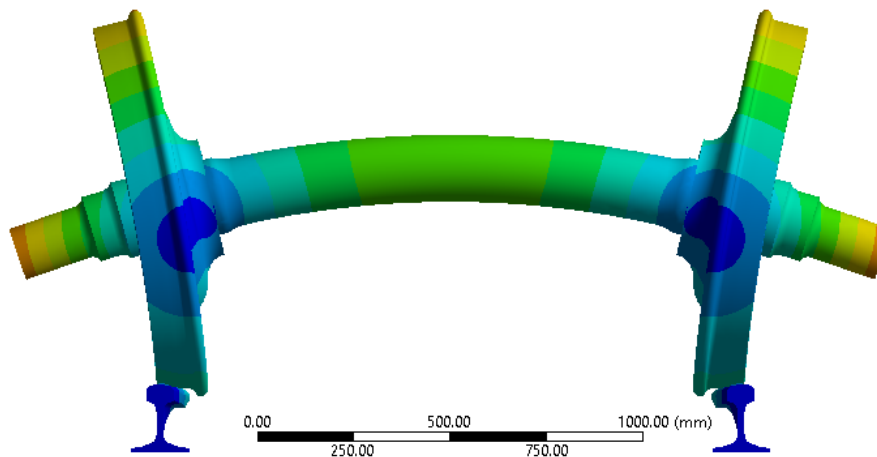
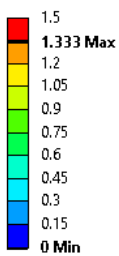
a) apkrova 12,5 t

F: 1435mm_22,5t_30C
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1
2016-05-15 13:38



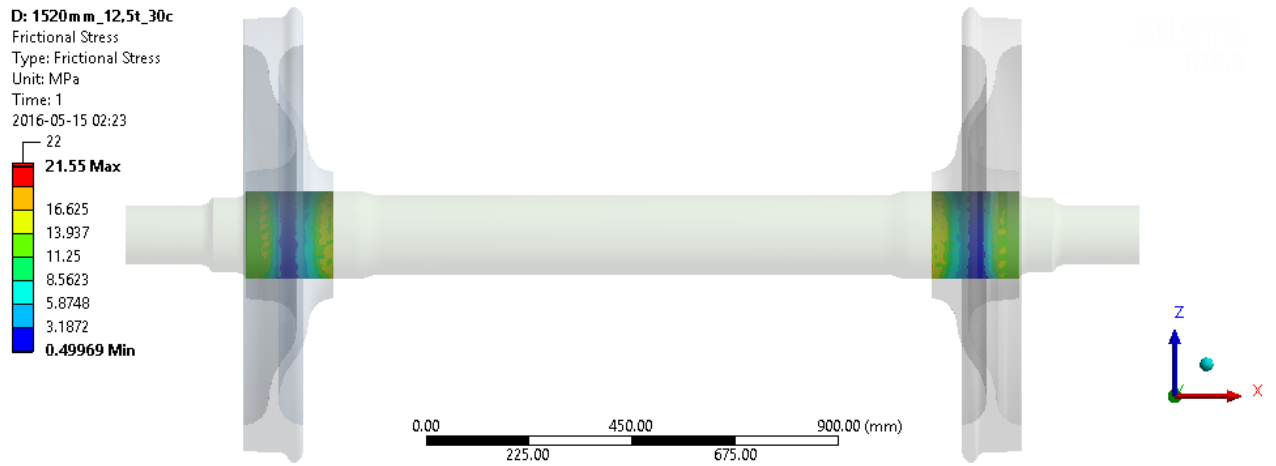
b) apkrova 22,5 t

H: 1435mm_32,5t_30C
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1
2016-05-15 13:00

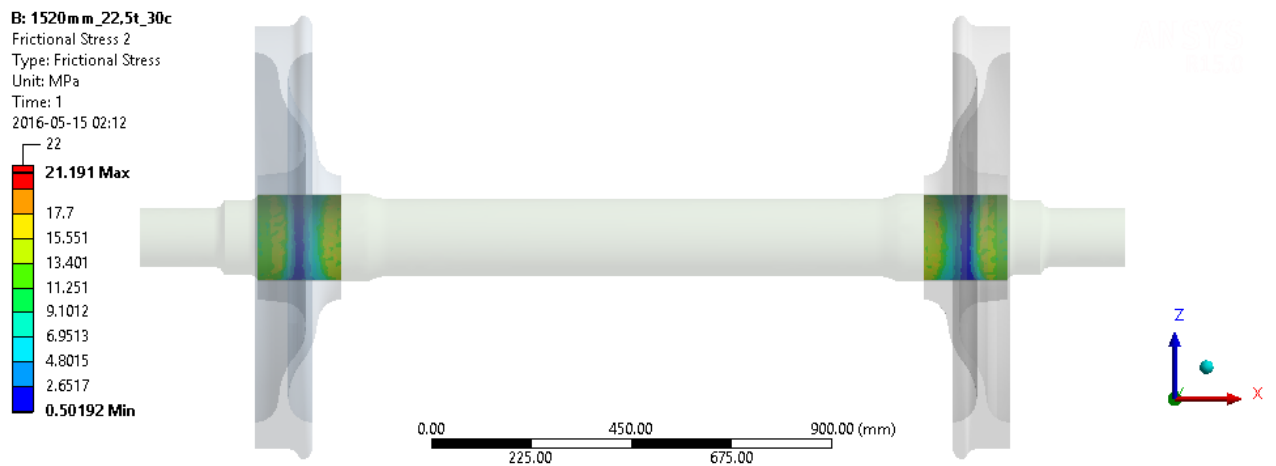


c) apkrova 32,5 t

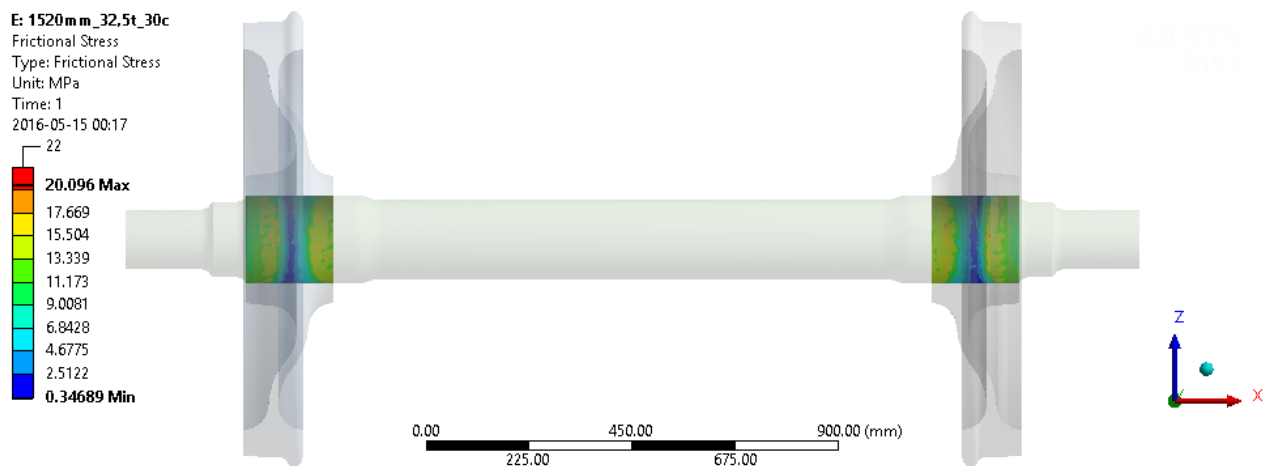
3.13 pav. Poslinkių epiūra (vaizdas iš priekio), kai tarpuvėžio plotis lygus 1435 mm



a) apkrova 12,5 t

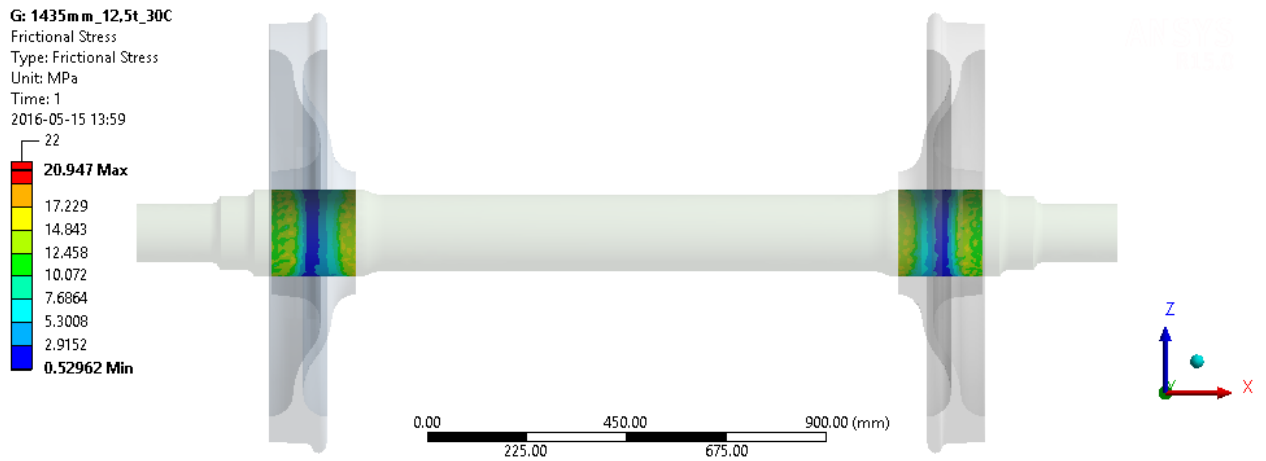


b) apkrova 22,5 t

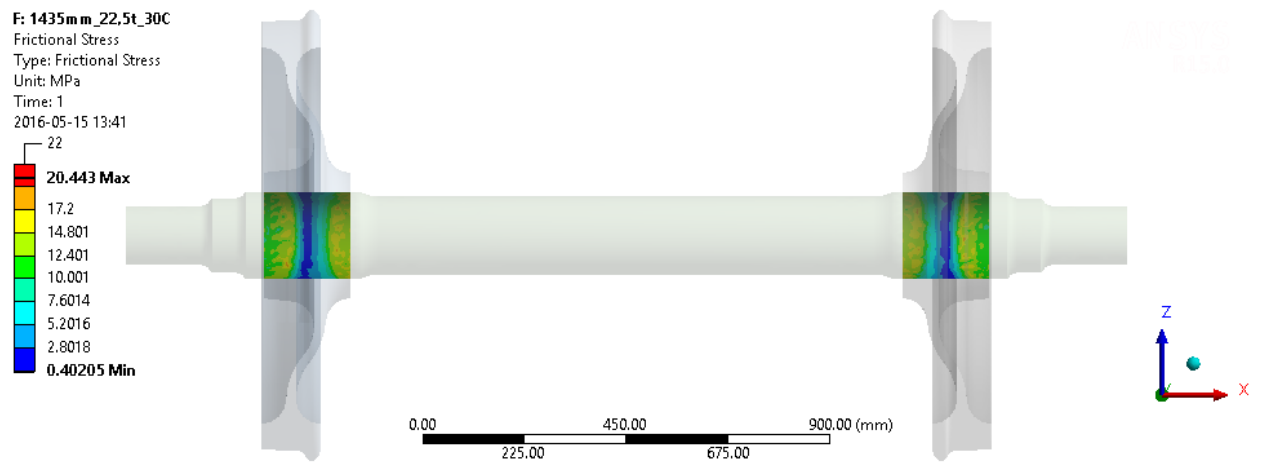


c) apkrova 32,5 t

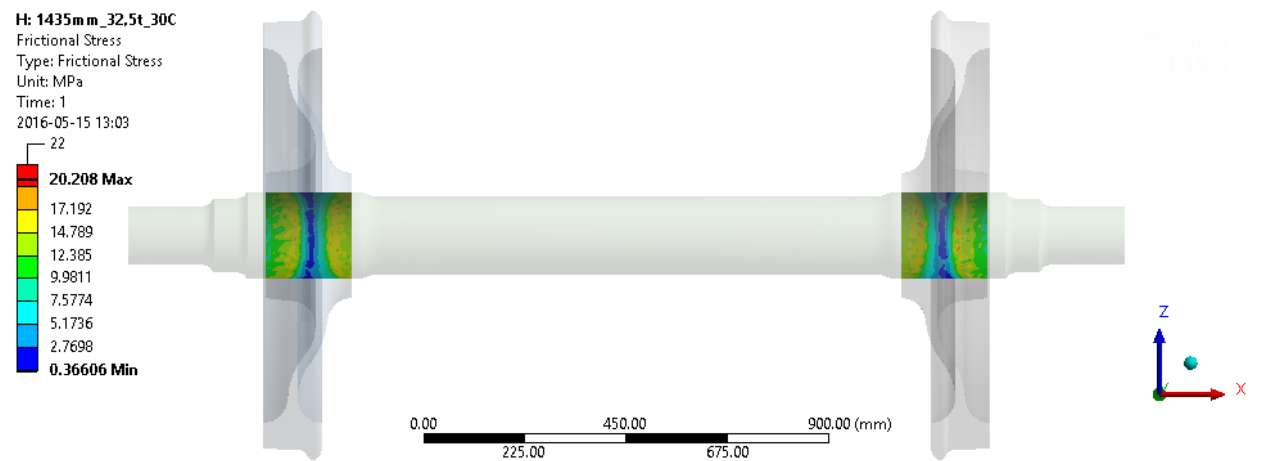
3.14 pav. Trinties įtempiai ašies ir rato kontakto zonoje (vaizdas statmena apkrovai kryptimi), kai tarpuvėžio plotis lygus 1520 mm



a) apkrova 12,5 t



b) apkrova 22,5 t

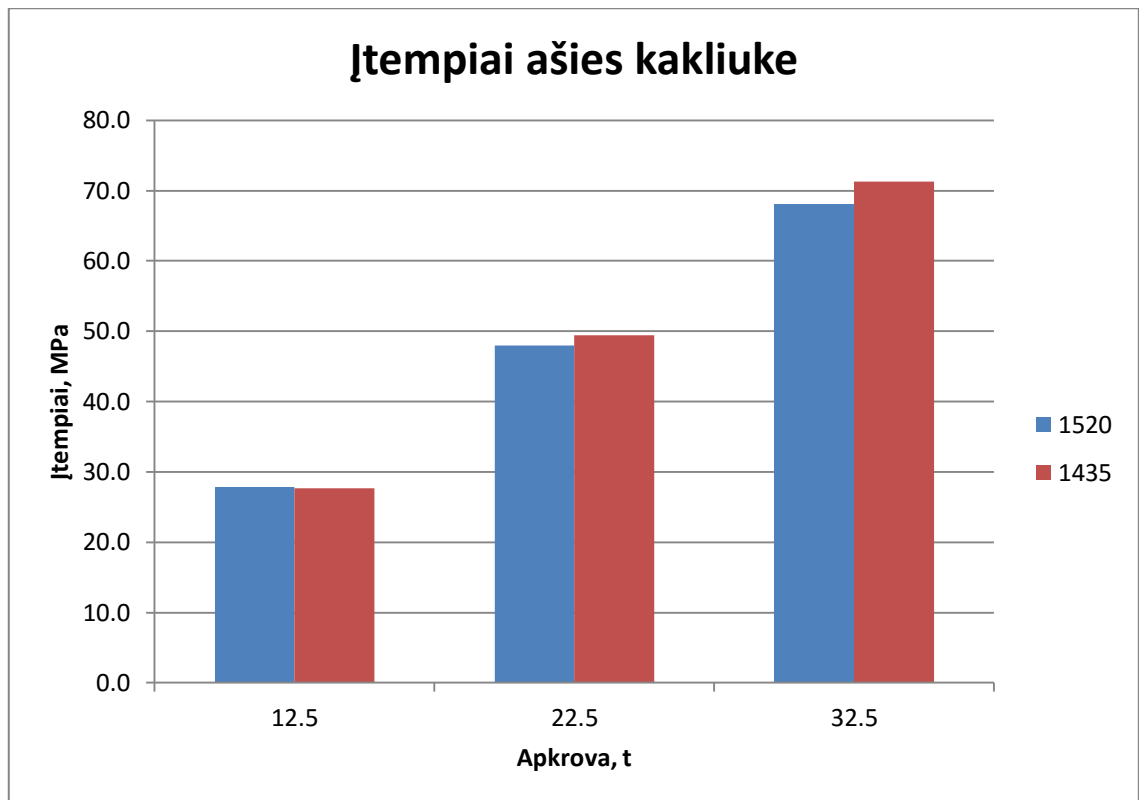


c) apkrova 32,5 t

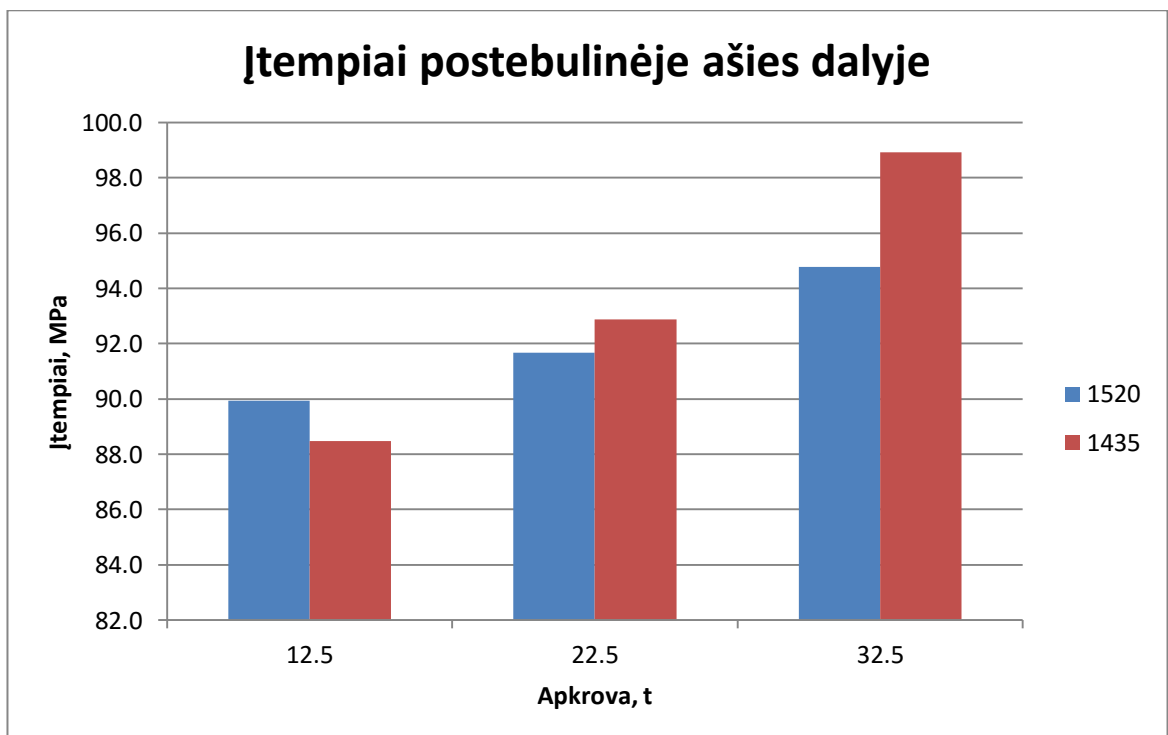
3.15 pav. Trinties įtempiai ašies ir rato kontakto zonoje (vaizdas statmena apkrovai kryptimi), kai tarpvėžio plotis lygus 1435 mm

3.5 lentelė. Bandymo rezultatų suvestinė

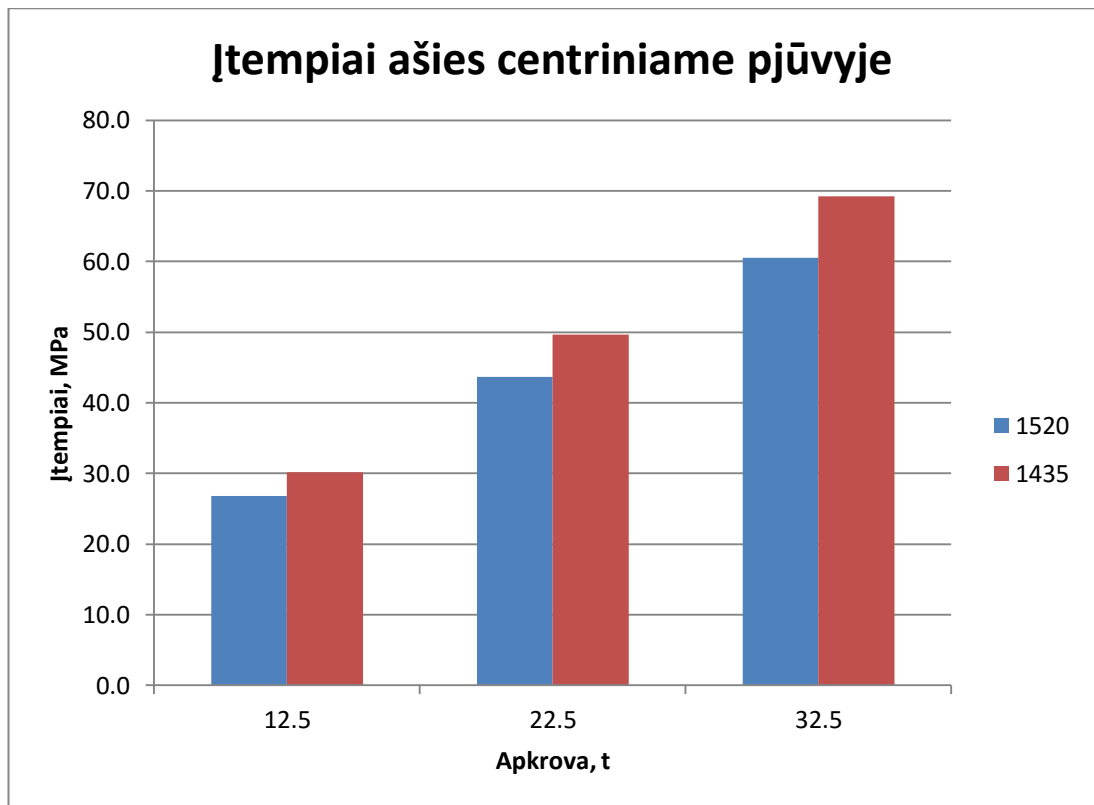
Bandymo numeris	Vėžės plotis, mm	Apkrova, t	Įtempiai ašyje, MPa			Maksimalūs įtempiai, MPa	Kontaktiniai įtempiai (ašis-ratas), MPa	Maksimalūs poslinkiai, mm
			Centre	Ašies kakliuke	Postebulinėje dalyje			
1	1520	12.5	26.8	27.9	89.9	270.9	21.6	0.66177
2		22.5	43.6	48.0	91.7	274.5	21.2	0.89028
3		32.5	60.5	68.1	94.8	278.3	20.1	1.12630
4	1435	12.5	30.2	27.7	88.5	273.8	20.9	0.68879
5		22.5	49.7	49.5	92.9	280.7	20.4	0.94669
6		32.5	69.3	71.3	98.9	291.0	20.2	1.33300



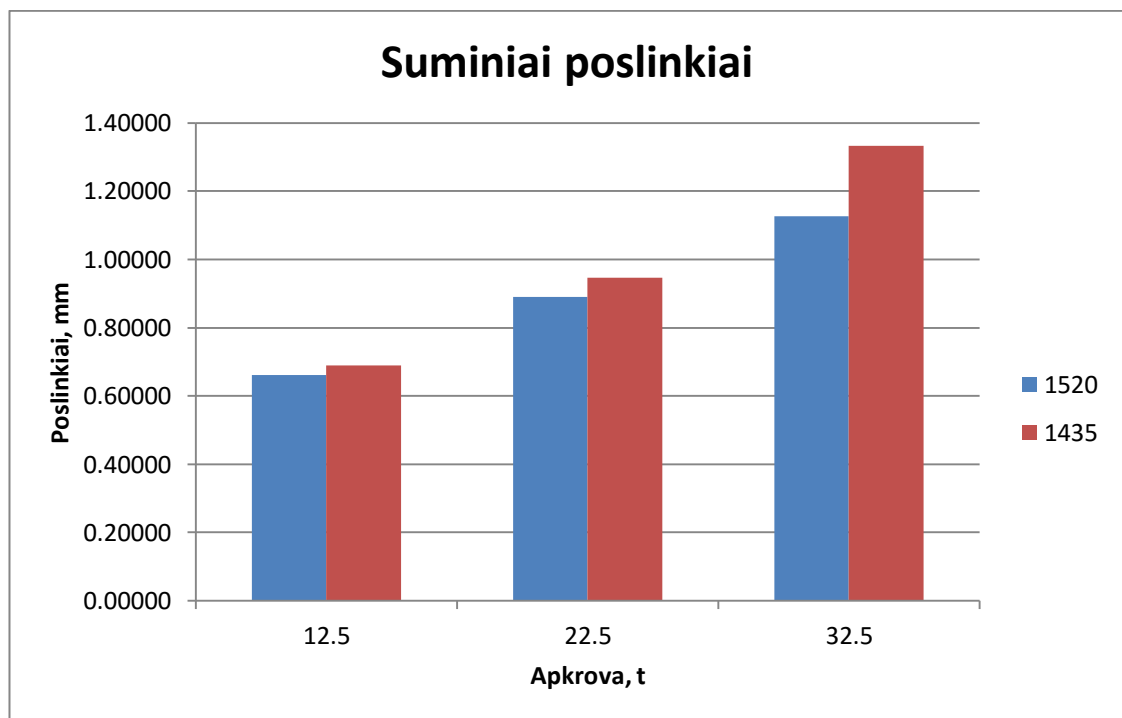
3.16 pav. Įtempiai ašies kakliuko skerspjūvyje



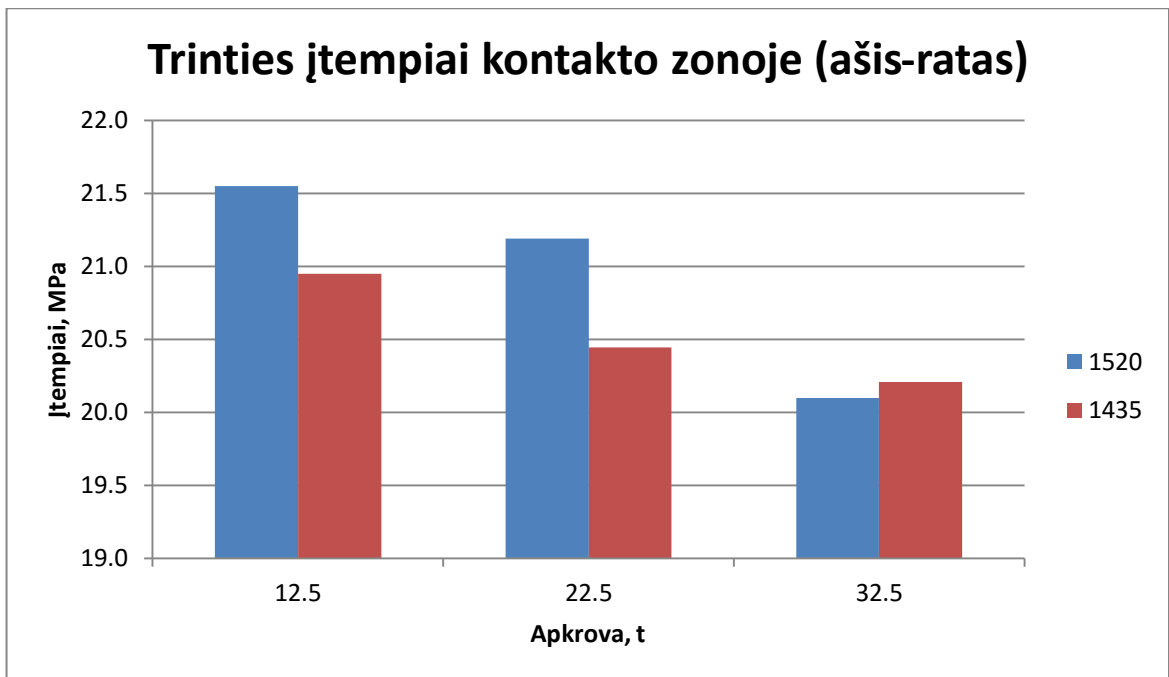
3.17 pav. Įtempiai ašies postebulinės dalies skerspjūvyje



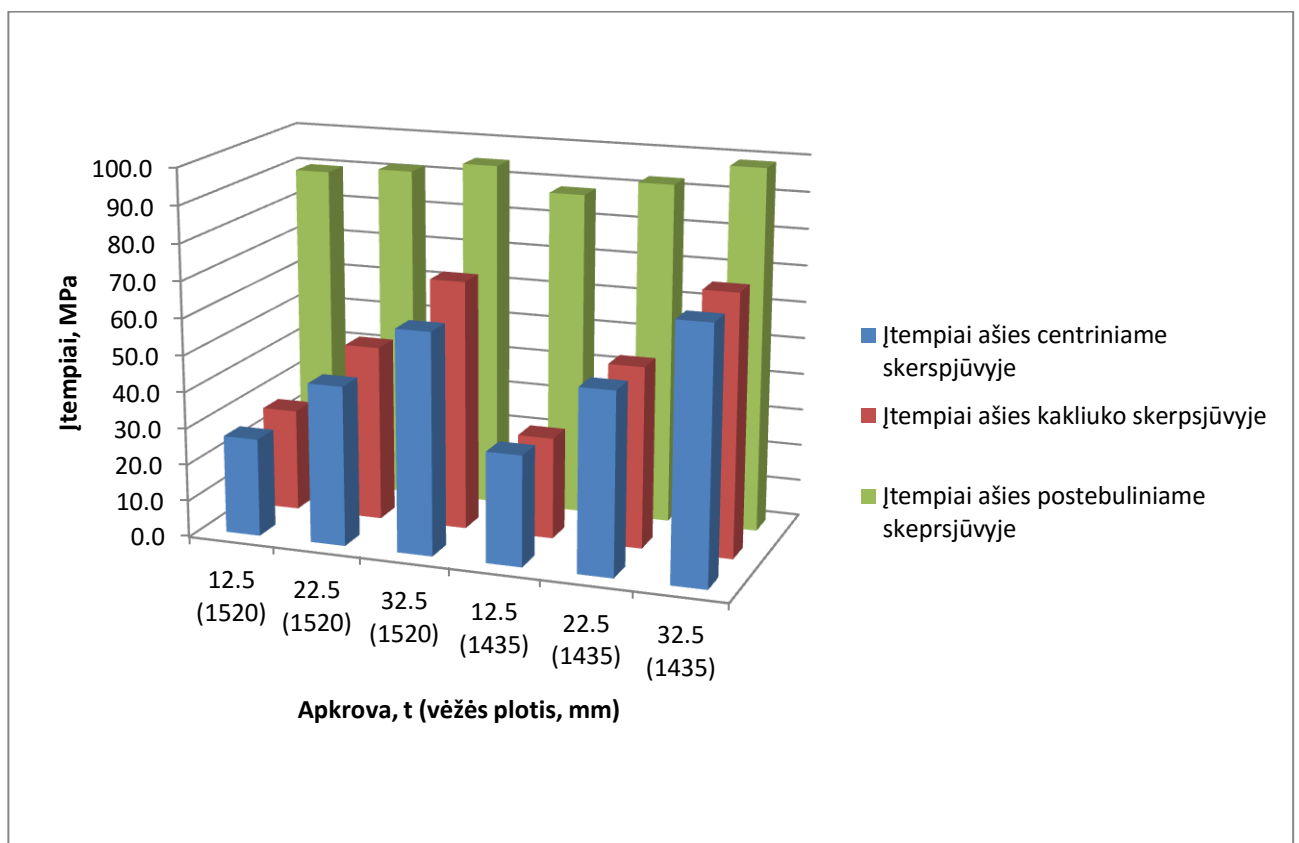
3.18 pav. Įtempiai ašies centriniame skerspjūvyje



3.19 pav. Suminiai poslinkiai



3.20 pav. Įtempiai kontakto zonoje (ašis – ratas)



3.21 pav. Įtempių svarbiausiuose pjūviuose palyginimas

3.6 lentelė. Analitiškai apskaičiuotos ir tyrimo metu gautos reakcijos jėgos palyginimas

Pagal formulę apskaičiuota reakcijos jėga, N	Reakcijos jėga gauta atliekant tyrimą programa ANSYS, N	Skirtumas, %
143586	124990	13.0
258455	224980	13.0
373323	324980	12.9
148196	124990	15.7
266753	224980	15.7
385310	324980	15.7

3.4. Rezultatų apibendrinimas ir išvados

1. Įtempiai visuose nagrinėjamuose pjūviuose neviršija leistinų 3.4 lentelėje pateiktų reikšmių. Didžiausi įtempiai visais atvejais susidaro postebulinėje ašies dalyje, ji yra labiausiai apkrauta, nes šioje vietoje ratas remiasi į bėgius, be to veikia papildomi įtempimai dėl užpresuoto rato, trinties korozija. Didėjant apkrovai šie įtempiai kinta nežymiai. Esant siauresniam tarpuvėžio pločiui postebuliniai įtempiai yra didesni.

2. Lyginant visų svarbiausiųjų pjūvių įtempių pasiskirstymą esant skirtingam vėžės pločiui, mažiausiai pakinta ašies kakliuko įtempiai. Nors atramos taškas kiekvienam ratui pasislenka per 42,5 mm, o tai reiškia, kad tiek padidėja jėgos petys (atitinkamai ir lenkimo momentas), tačiau pats jėgos pridėjimo taškas nepakinta, o ratas pasislenka ta ašies dalimi, kuri turi didžiausią skerspjūvį, todėl įtempiai ašies kakliuko pjūvyje išlieka panašaus intensyvumo net ir kintant vėžės pločiui. Taigi ašies kakliuko įtempiai daugiausiai priklauso nuo apkrovos intensyvumo, ašies kakliuko geometrijos ir postebulinės ašies dalies diametro, bet ne nuo vėžės pločio.

3. Įtempių pasiskirstymas nagrinėjamuose svarbiausiuose pjūviuose kintant vėžės pločiui išlieka panašus, tačiau įtempiai esant siauresnei vėzei visuose pjūviuose yra didesnio intensyvumo, todėl siekiant naudoti tą pačią ašį esant skirtingam vėžės pločiui, ašies skerspjūviai (lyginant su standartiniu aširačiu) turėtų būti didinami.

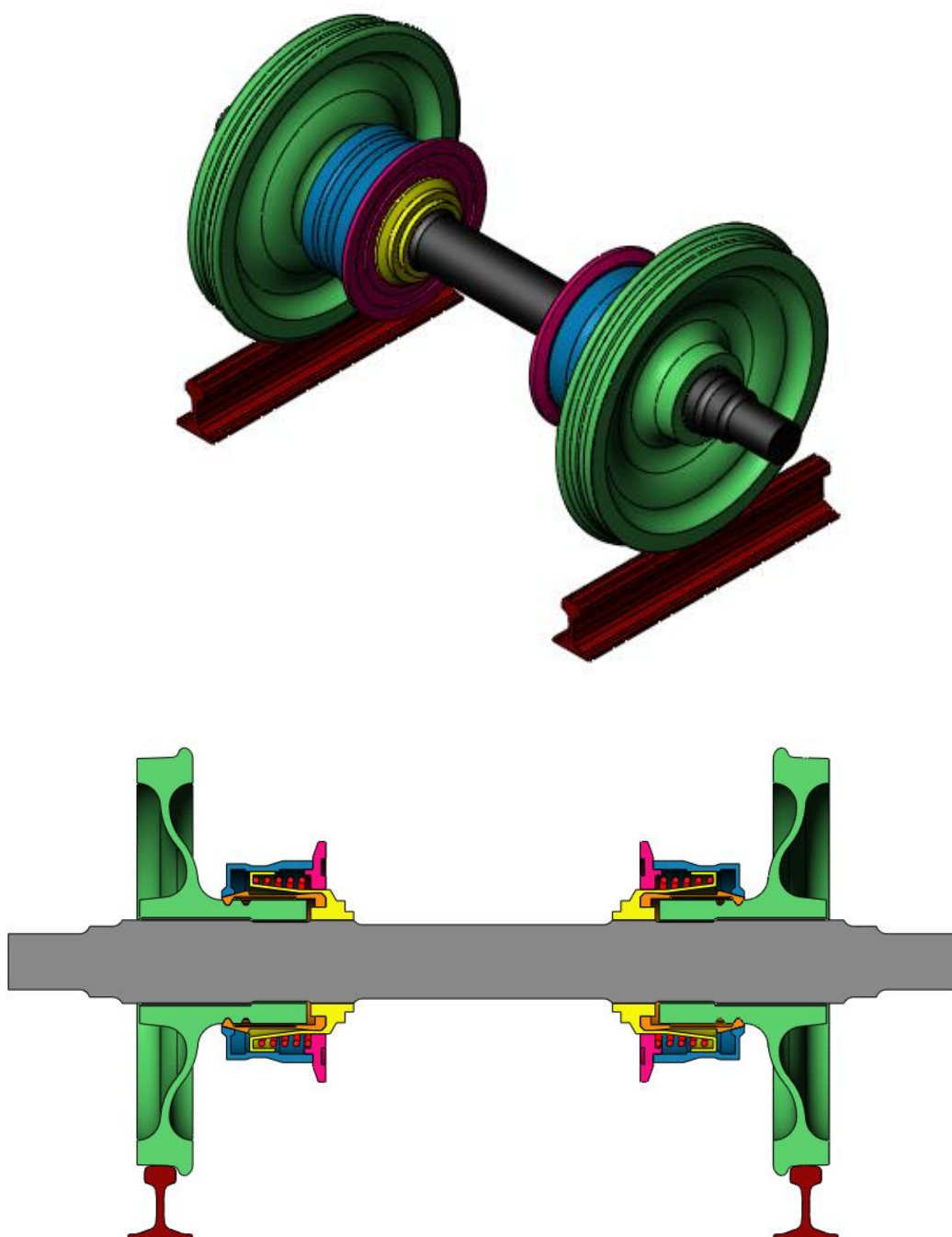
4. Aširačio suminės deformacijos ir poslinkiai atitinka realių sistemų ir literatūroje aprašytas deformacijas bei poslinkius, nes ašis pagrinde yra deformuojama lenkimo momento. Didžiausi įtempiai susidaro ašies išorėje, o vidinėje dalyje įtempiai artėja prie nulio. Išskyrus ašies zoną po rato stebule, kur gana dideli įtempimai susidaro ir ašies vidurinėje dalyje. Tačiau tai galima vertinti kaip skaičiuojamojo modelio netobulumą, nes statiniuose skaičiavimuose modelis turi neatlikti judesių, todėl aširatis turėjo būti papildomai ribojamas. Šį apribojimą užtikrintino

kontaktas tarp rato ir bėgių bei judesio ribojimui panaudotos „silpnosios spyruoklės“ (angl. weak springs).

5. Analitiškai apskaičiuotos reakcijos jėgos lyginant su tyrimo metu gautais rezultatai skiriasi 13-15,7%. Šis skirtumas gali atsirasti, dėl tų pačių priežasčių, susijusių su kraštinėmis sąlygomis – modelyje naudojamos „silpnosios spyruoklės“, kurios nors ir neturėtų įtakoti rezultatų, tačiau vis tik gali juos šiek tiek iškreipti. Tačiau skirtumas tarp rezultatų nėra labai ženklus ir praktiškai išlieka pastovus kintant apkrovai, taigi skaičiavimo rezultatus galima vadinti patenkinamais.

4. KINTAMO VĖŽĖS PLOČIO AŠIRAČIO MODELIAVIMAS, ANALIZĖ IR TYRIMAS

Kintamo vėžės pločio aširačio modelis kuriamas programa Solidworks. Modelio vaizdas ir pjūvis pateikti 4.1 paveiksle. Modelio brėžiniai taip pat pateikti prieduose.

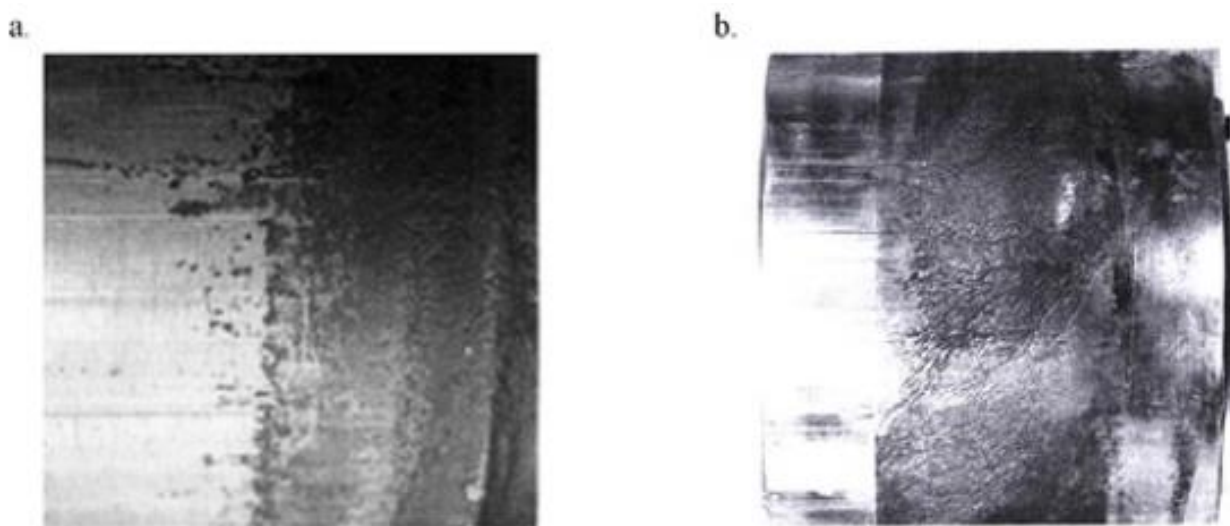


4.1 pav. Sumodeliuotas kintamo vėžės pločio aširatis remiantis SUW-2000 sistema (viršuje – izometrinis vaizdas, apačioje – vertikalus pjūvis)

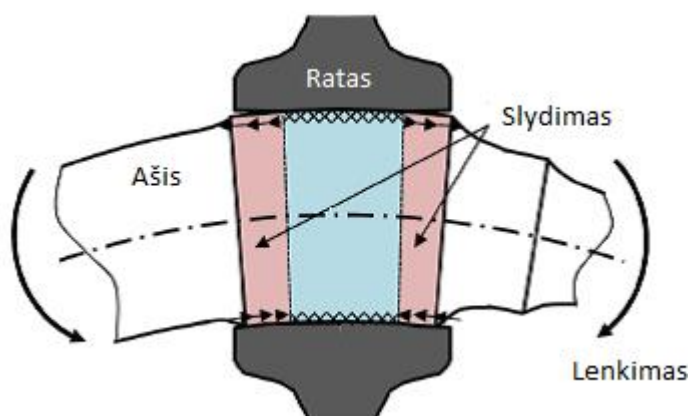
4.1. SUW-2000 tipo adaptyvaus aširačio trūkumų analizė

SUW-2000 tipo aširačiai turi keletą problemų, kurios buvo identifikuotos atliekant bandymus ir traukinių bandomuosius važiavimus [32], [39], [46]:

1. *Fretinginis dilimas*, kuris pasireiškia ašies ir rato sujungimo zonoje. Šis reiškinys pastebimas ir standartinio aširačio atveju, tačiau mažesniame plote, tik rato stebulės tvirtinimo zonos krašte. Fretinginio dilimo pavyzdys pateiktas 4.2 paveiksle. Būtent šioje vietoje pasireiškia didžiausi trinties įtempiai ir kontakte galimas slydimas. Tai įrodyta prieš tai buvusiame skyriuje atliktų bandymų metu, o taip pat tai gerai paaiškina 4.3 paveiksle pateikta supaprastinta schema. Kuomet ratas neužpresuotas ant ašies, veikiant apkrovoms susidaro tarpelis, toks modelis pavaizduotas 4.4 paveiksle pateiktoje schemoje.

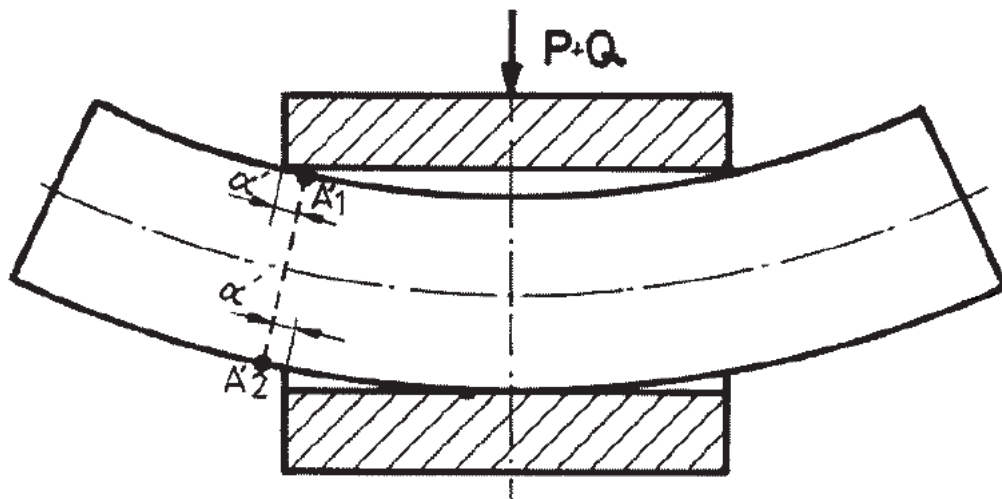


4.2 pav. Fretinginio dilimo pavyzdžiai (a – standartinio aširačio stebulės tvirtinimo paviršiaus kraštas, b – automatinio vėžės keitimo įrenginio postebulinė dalis) [39]



4.3 pav. Standartinio aširačio (ratas užpresuotas ant ašies) darbo sąlygos postebulinėje dalyje [40]

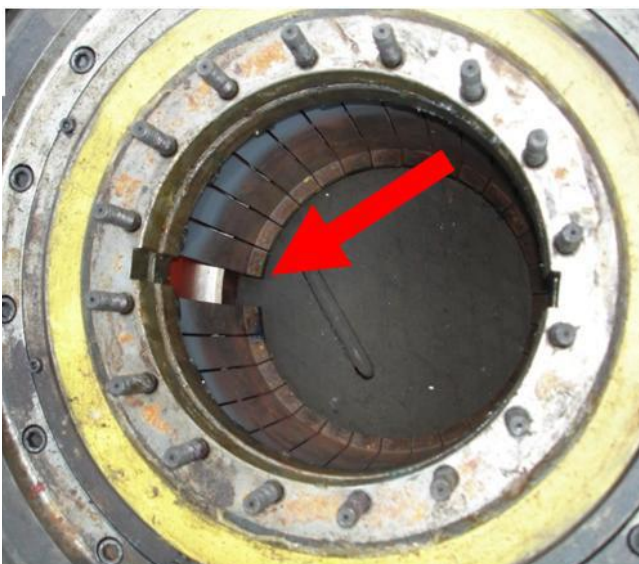
Fretinginis dilimas pasireiškia tuomet, kai veikia didelės apkrovos ir elementų sujungime yra tikimybė atsirasti virpesiams. Jei standartinio aširačio atveju fretinginio dilimo zona nedidelė, tai automatinio vėžės pločio keitimo įrenginio atveju jis gali apimti visą postebulinę dalį. Taip yra, nes standartiniame aširatyje ratas yra užpresuotas, o adaptyviajame aširatyje ratas yra neužpresuotas, tik blokuotas ir tarp rato bei stebulės yra mažas tarpelis, kuris leidžia atsirasti virpesiams, o virpesiai, plieno į plieną kontaktas bei didelės apkrovos ir yra fretinginio dilimo priežastys.



4.4 pav. Adaptyvaus aširačio (ratas neužpresuotas ant ašies) darbo sąlygos postebulinėje dalyje [39]

Toks dilimas yra gana pavojingas automatiniame vėžės pločio keitimo įrenginiui, nes gali užsikirsti ratai ir vėžės nebebus galima pakeisti. Literatūroje aprašyti bandymai [39], kuomet buvo siekiama išsiaiškinti kaip technologiniais metodais padidinti ašies atsparumą fretinginiam dilimui. Atliekant laboratorinius bandymus nustatyta, kad indukcinis paviršiaus sukietinimas beveik neturi įtakos fretinginio dilimo vystymuisi, tuo tarpu, padengimas molibdeno danga gali pagerinti ašies atsparumą, tačiau šis būdas yra brangus. Iš esmės, abiem atvejais paviršius tampa kietesnis, tačiau tai sukelia kitą neigiamą reiškinį – padidėja trintis.

2. *Tampriosios įvorės pažeidimai.* Šios įvorės dantukai keičiant vėžės plotį išskečiami, o pakeitus gražinami į pradinę padėtį. Kadangi veikia didelės jėgos, o įvorės dantukai turi būti gana ploni, kad būtų pakankamai lankstūs, pasitaiko atveju, kuomet jie nulūžta (4.5 pav.). Tai taip pat gali turėti rimtų pasekmių eismo saugumui. Todėl šiame darbe atliekamas tampriosios įvorės tyrimas, siekiant išsiaiškinti, kaip ji deformuojasi ir kokios galimos pagrindinės jos lūžimo priežastys.

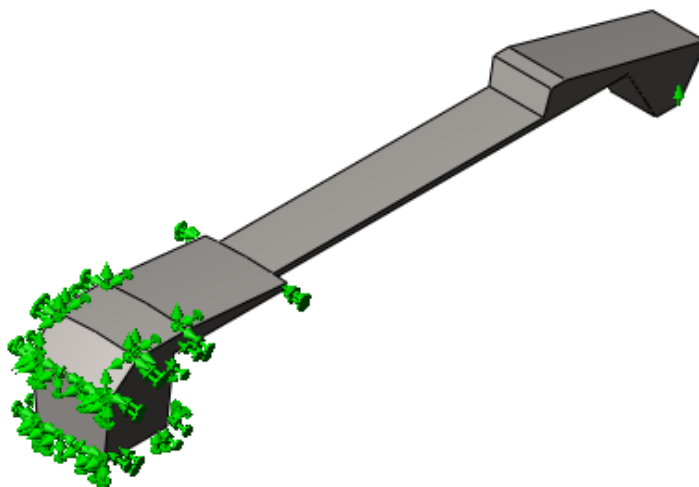


4.5 pav. Pažeista tamprioji įvorė (trūksta vieno dantuko) [32]

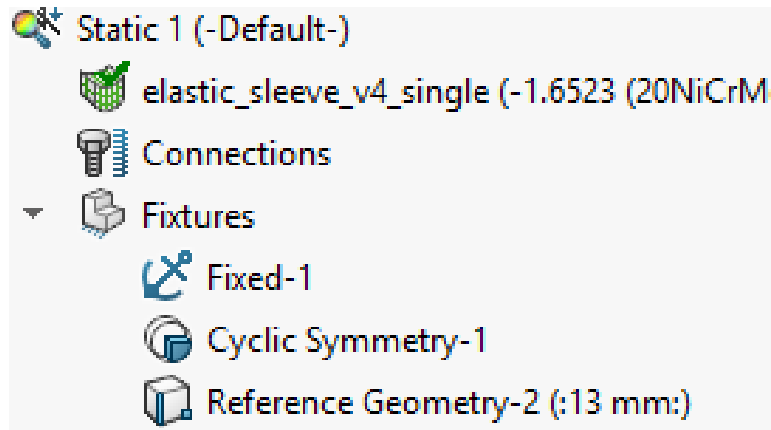
4.2. Tampriosios įvorės stiprumo ir patvarumo tyrimas

Tampriosios įvorės modeliavimas ir stiprumo skaičiavimai atliekami programa Solidworks. Skaičiuojamasis modelis supaprastinamas iki vieno dantuko ir nurodomos simetrijos sąlygos. Įvorės dantukai išskečiami, kuomet vagonas važiuoja per vėžės pločio keitimo įrenginį ir gretbėgis per atramą suspaudžia spyruoklę, tačiau skaičiavimuose supaprastintai priimama, kad dantuko paviršius turi judėti 13 mm vertikalia kryptimi, tai yra, tiek, kad būtų galima atblokuoti ratą. Įvorei parenkama medžiaga su didele takumo ribos verte (591 MPa).

Skaičiuojamasis modelis pateiktas 4.6 paveiksle, o kraštinių sąlygų aprašymas pateiktas 4.7 paveiksle.

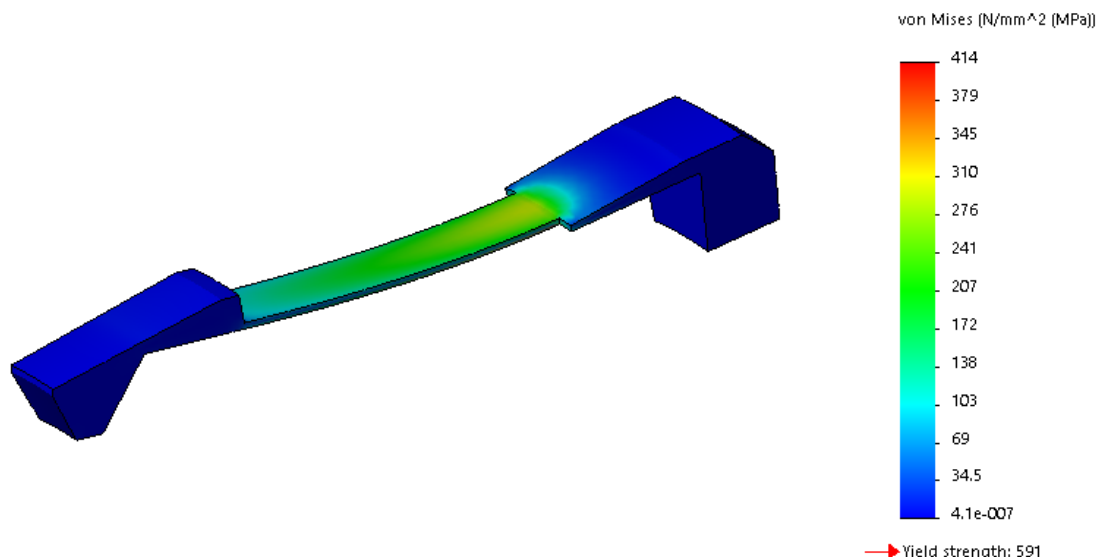


4.6 pav. Skaičiuojamasis modelis su nurodytomis kraštinėmis sąlygomis

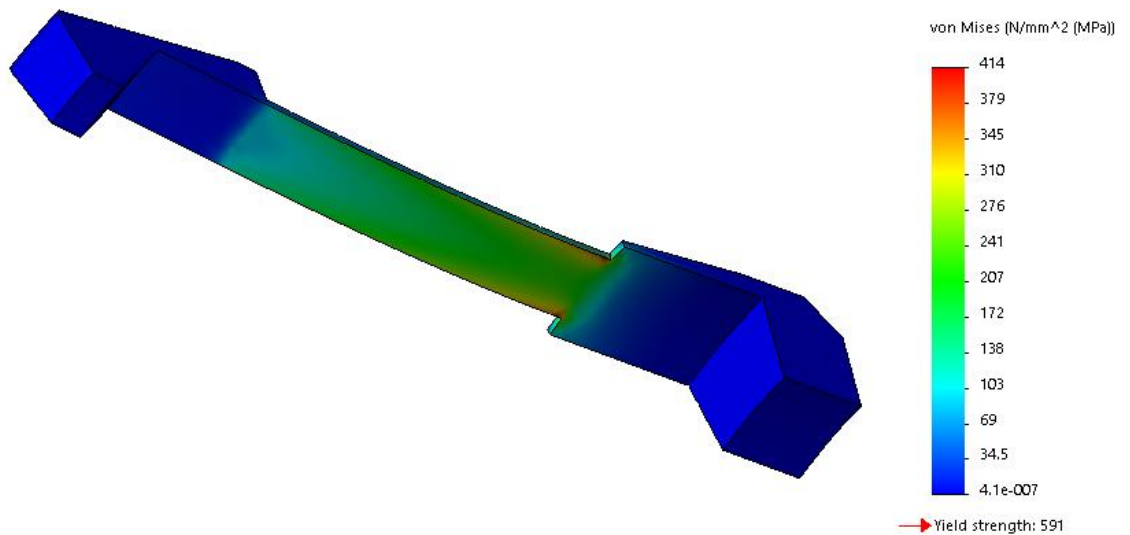


4.7 pav. Kraštinių sąlygų aprašymas

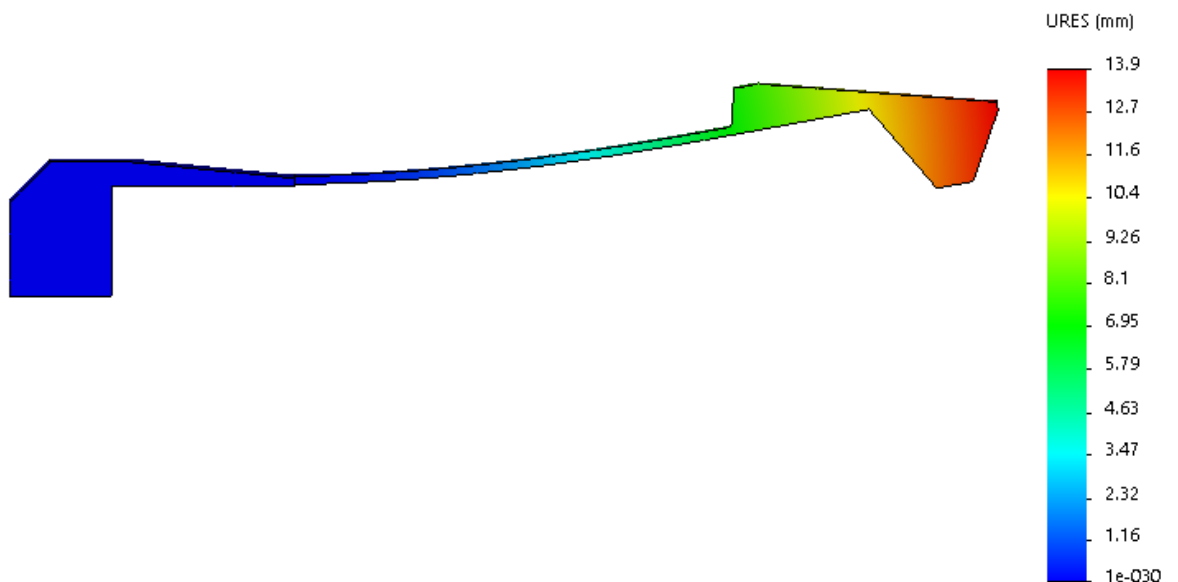
Statinės analizės skaičiavimo rezultatai pateikti 4.8 – 4.10 paveiksluose. Rezultatai rodo, kad didžiausia įtėpių koncentracija susidaro ties kiaurymėmis tarp dantukų, ten, kur dantukas tvirtinasi prie pagrindo, nes šioje vietoje staigiai keičiasi geometrija ir koncentruojasi įtempiai, todėl būtent čia detalė gali sulūžti. Siekiant išsiaiškinti detalės patvarumą atliekamas nuovargio tyrimas. Ta pati anksčiau aprašyta sistema apkraunama cikline nesimetrine apkrova imituojant vėžės keitimo procesą, kuomet atblokuojant ratą tamprioji įvorė yra išskečiama, o vėl užfiksuojant ratą dantukai grįžta į pradinę poziciją. Taip dantuko briaunos padėtis keičiasi nuo 0 iki 13 mm



4.8 pav. Ekvivalentinių Mizeso įtėpių pasiskirstymas, vaizdas iš viršaus

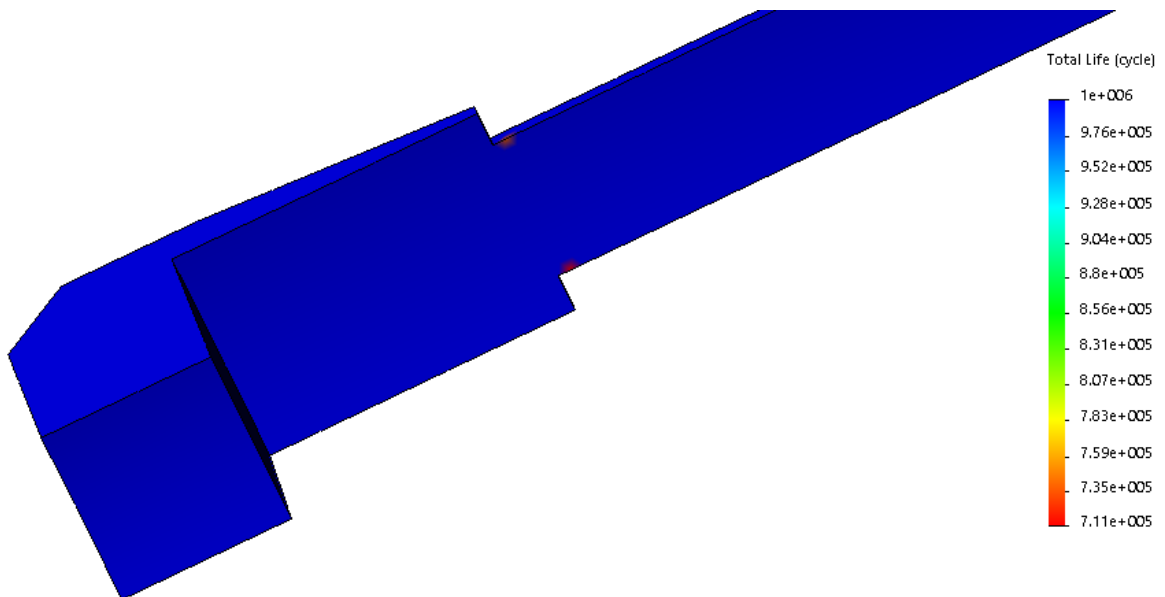


4.9 pav. Ekvivalentinių Mizeso įtempių pasiskirstymas, vaizdas iš apačios



4.10 pav. Poslinkiai, vaizdas iš šono

Nuovargio bandymų rezultatai pateikti 4.11 paveiksle. Įtempių koncentracijos vietose detalė turėtų atlaikyti 711000 ciklų, tai patenkinamas skaičius, tačiau šioje vietoje ilginiui turėtų atsirasti plastinių deformacijų. Reiktų koreguoti tampriosios įvorės geometriją ir šioje vietoje įvesti suapvalinimą, siekiant sumažinti įtempių koncentraciją bei atsitiktinio lūžimo dėl plastinių deformacijų tikimybę.



4.11 pav. Nuovargio bandymo rezultatai

4.3. Ketvirtojo skyriaus išvados

1. Pagrindiniai SUW tipo aširačio trūkumai, išryškėję bandomųjų važiavimų metu, yra fretinginis ašies dilimas, sąlygojantis ratų užsiblokavimą, ir tampriosios įvorės pažeidimai.

2. Tampriosios įvorės geometrija yra palanki kauptis įtempių koncentracijoms, galimas atsitiktinis tokios įvorės dantuko lūžimas pasireiškiant plastinėms deformacijoms. Apskaičiuota, kad tokia įvorė turėtų atlaikyti maždaug 700 tūkst. apkrovimo ciklą, tačiau šis skaičius labai priklauso nuo pasirinktos medžiagos savybių. Šiuo atveju tikslios tikrosios šios įvorės medžiagos savybės nėra žinomos, todėl ciklų skaičių galima vertinti tik kaip orientacinę reikšmę.

5. KINTAMO VĖŽĖS PLOČIO TRAUKINIO VAŽIUOKLĖS PANAUDOJIMO LIETUVOJE TIKSLINGUMO VERTINIMAS

Įmonės veiklos ataskaitos duomenimis [4] AB „Lietuvos geležinkeliai“ 2014-aisiais metais turėjo 70,4 mln. grynojo pelno. Tai rodo, jog įmonė dirbo pelningai. Pagrindines įmonės pajamas sudarė krovinių vežimo pajamos (82,1 % nuo visų pajamų). Tuo tarpu, keleivių vežimas įmonei atnešė tik 5,5 % visų pajamų. Šie skaičiai patvirtina vyraujančią nuomonę, kad keleivių vežimas geležinkeliais dažniausiai yra nepelningas ir vykdomas daugiau iš socialinių paskatų, nuostolius kompensuojant krovinių vežimu.

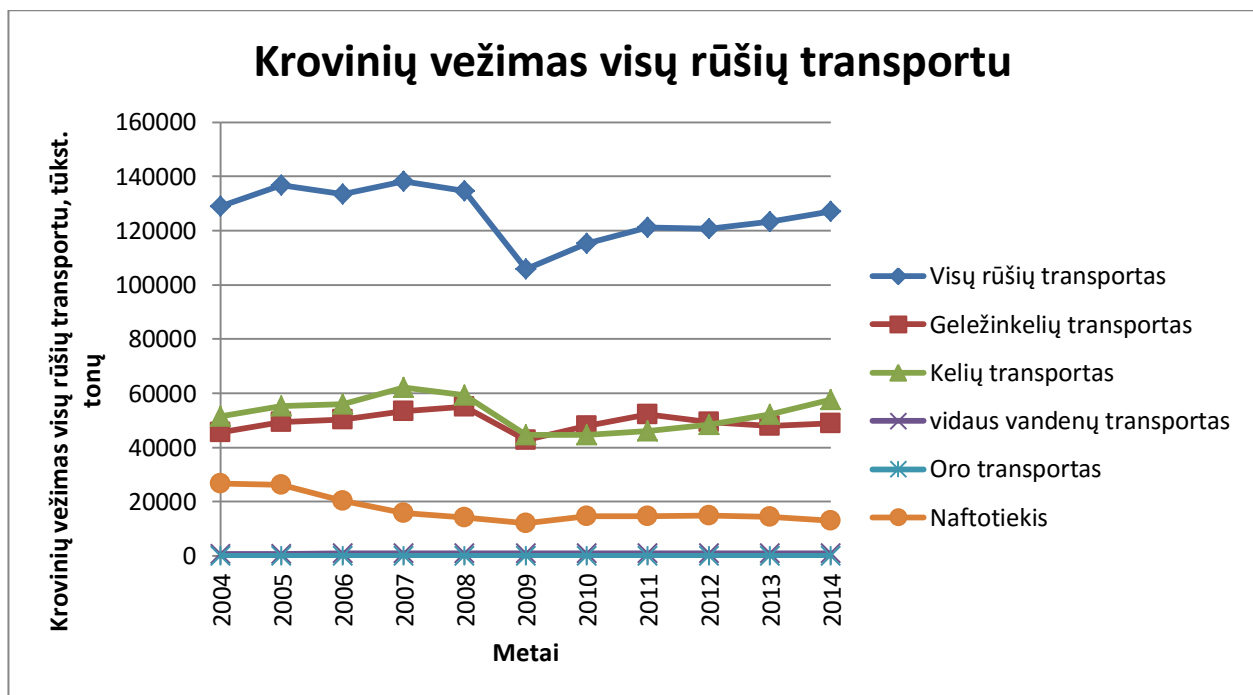
Siekiant įvertinti galimą ekonominę naudą, kurią suteiktų kintamo vėžės pločio traukinio važiuoklės panaudojimas Lietuvoje, visų pirma, reikia įvertinti, kokius kelionių ir vežimų aspektus tokia sistema galėtų pagerinti.

Pagrindinis kintamo pločio traukinio važiuoklės sistemos privalumas – vėžės pločio keitimas traukiniui nesustojus, o tai galima įvardinti kaip kelionės trukmės trumpinimą. Kelionės trukmė krovinių vežimui nėra pats svarbiausias faktorius, tuo tarpu keleiviams – tai vienas svarbiausių kelionės aspektų. Renkantis kelionės maršrutą ir būdą, keleiviai siekia rasti geriausią greičio, patogumo ir kainos santykį. Esant gerai išplėtotam geležinkelių tinklui ir moderniam riedmenų parkui, dažniausiai būtent kelionė traukiniu gali pasiūlyti geriausią šių dedamųjų santykio variantą. Žinoma, kelionės trukmė svarbi ir krovinių vežime, tačiau jei keleiviams 1-2 valandų skirtumas yra ženklus, tai krovinių vežime daugeliu atvejų toks kelionės trukmės sutrumpinimas esminio skirtumo nepadarytų.

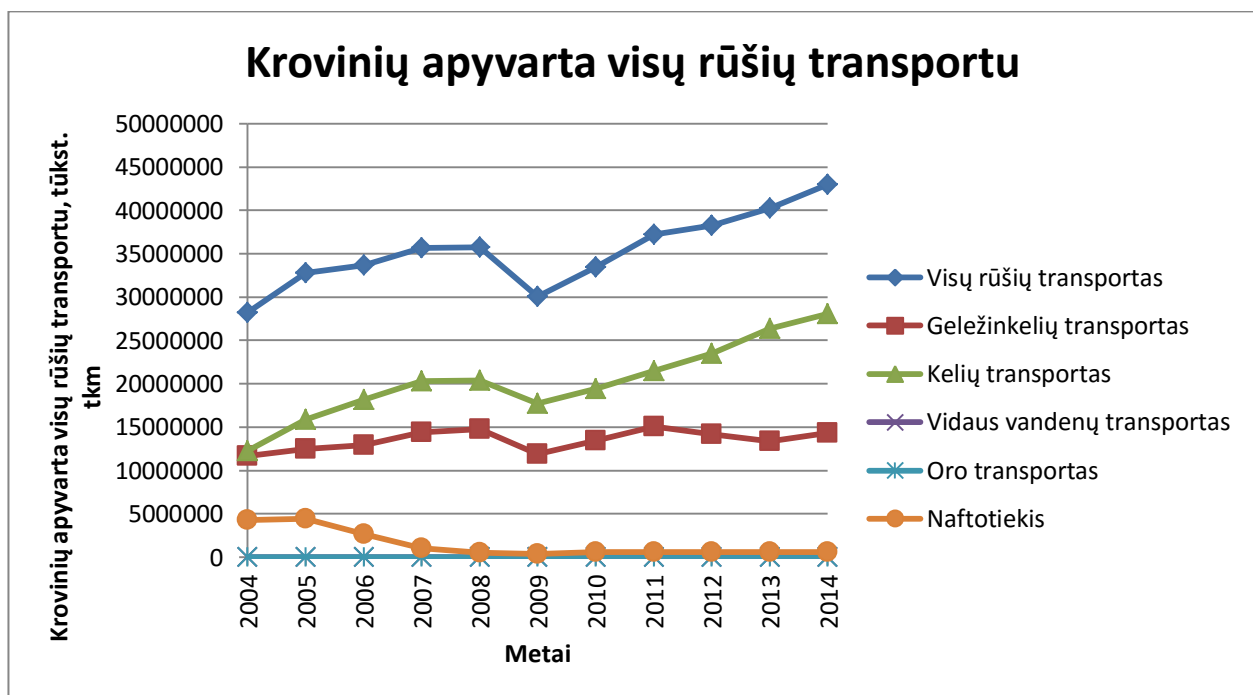
Tačiau svarbūs ir kiti kintamos vėžės pločio traukinio važiuoklės sistemos teikiami privalumai: kai nereikia perkrauti krovinių iš vieno traukinio į kitą, ar keisti traukinio vežimėlių, sutaupoma žmogaus darbo jėgos ir laiko, nereikia papildomos vietos sandėliavimui ir perkrovimo įrenginiams.

5.1. Keleivių ir krovinių vežimo apimtys ir dinamika

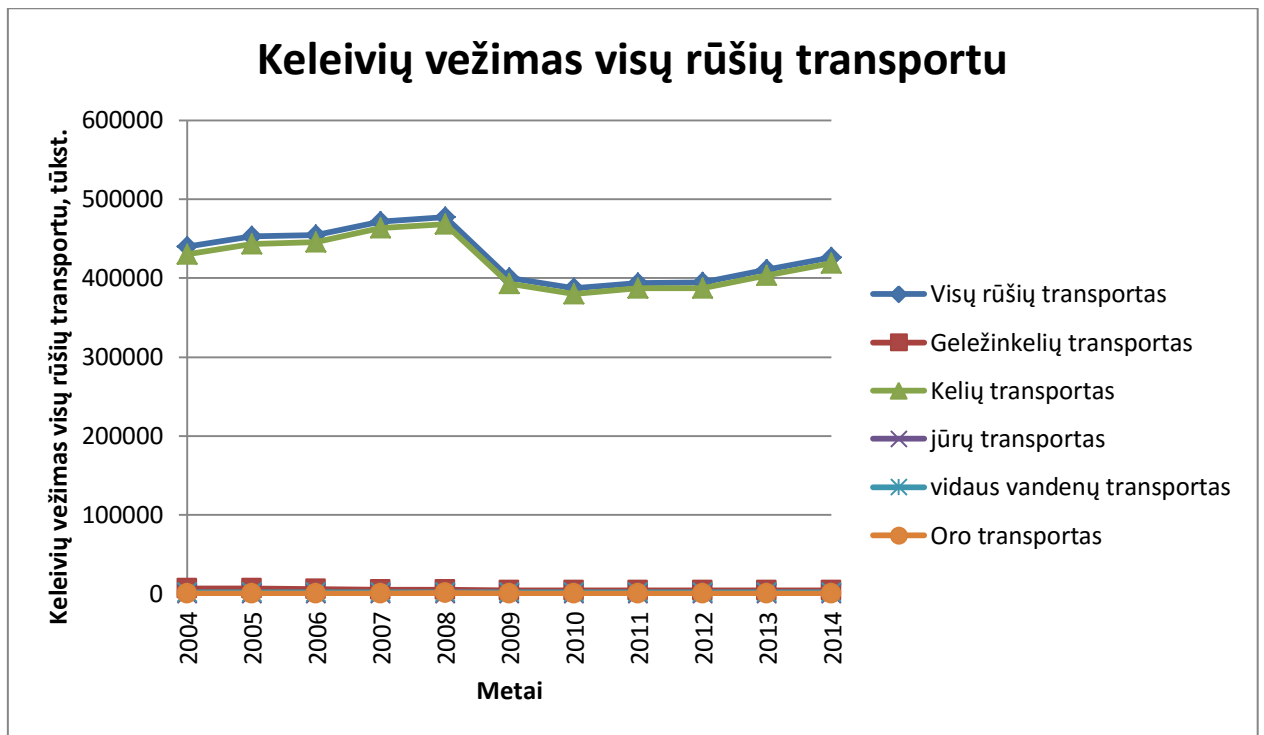
Siekiant įvertinti kintamo vėžės pločio įrenginio ekonominį efektą, šiame skyriuje apžvelgiami keleivių ir krovinių vežimo apimtys ir apyvarta pastarųjų dešimties metų laikotarpiu (2004 – 2014 m.) Remiantis Lietuvos statistikos departamento [47] duomenimis sudarytos 5.1-5.8 paveiksluose pateiktos diagramos.



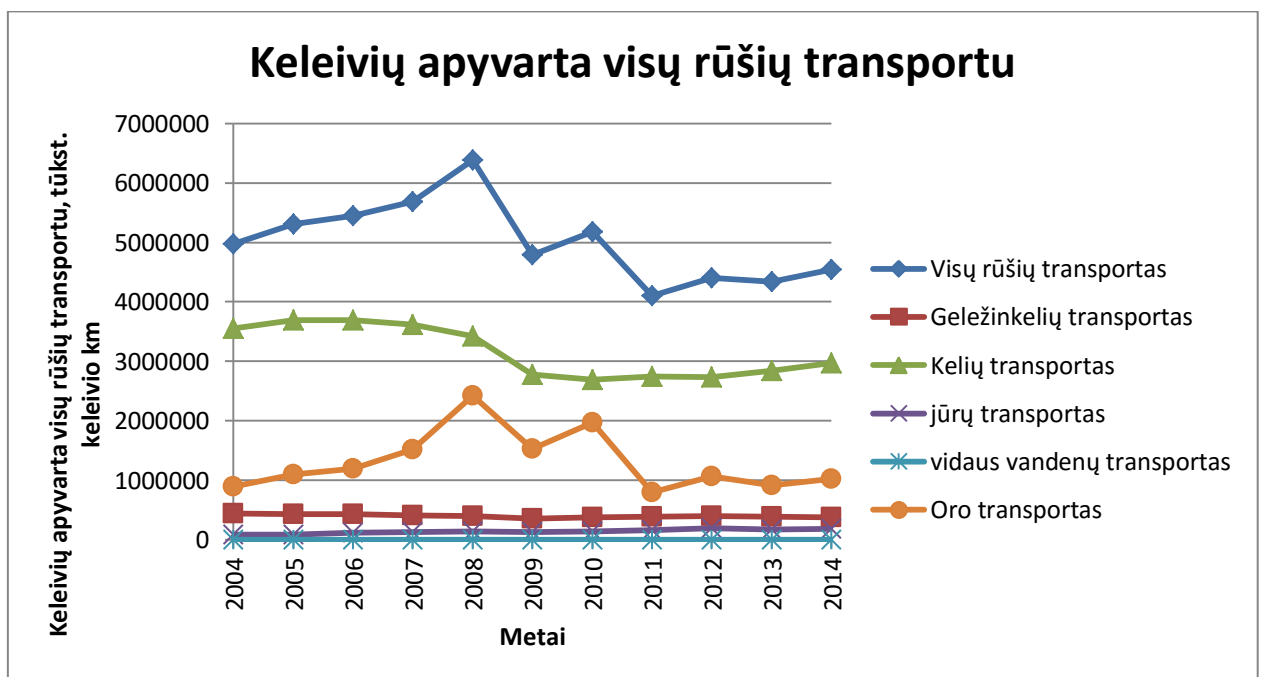
5.1 pav. Krovinių vežimas visų rūšių transportu



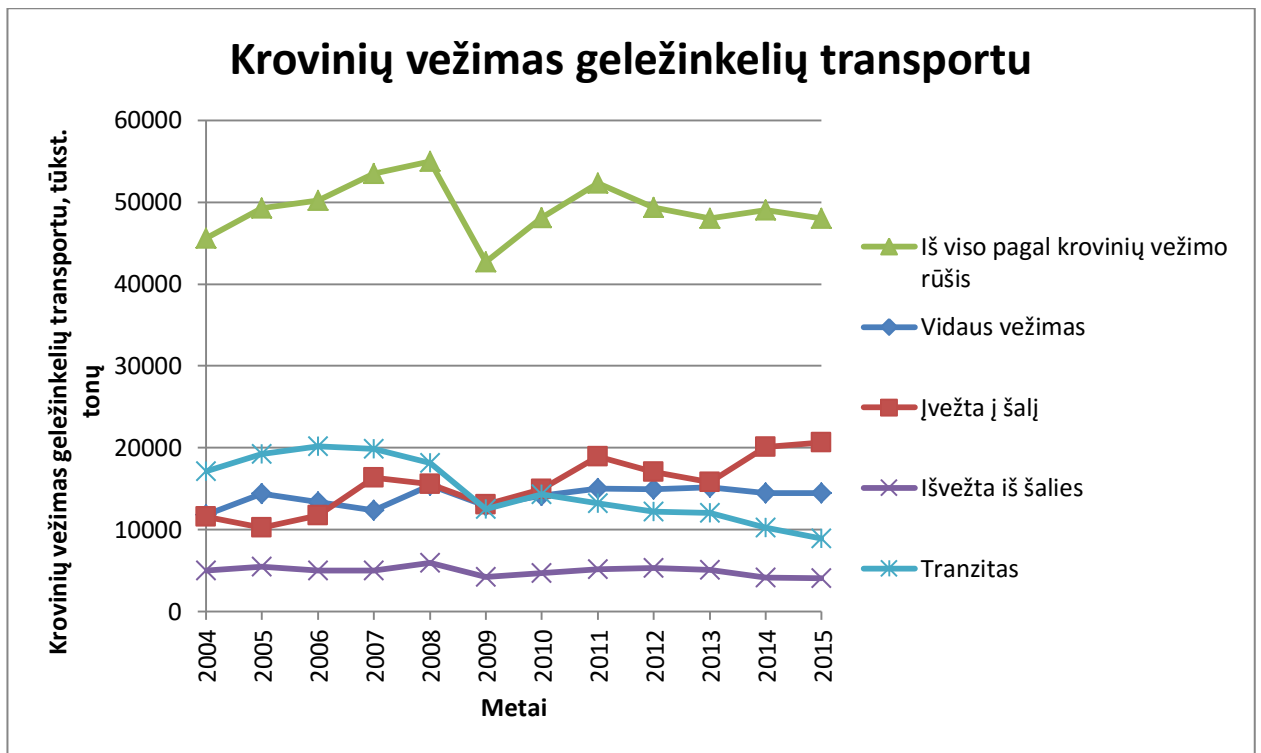
5.2 pav. Krovinių apyvarta visų rūšių transportu



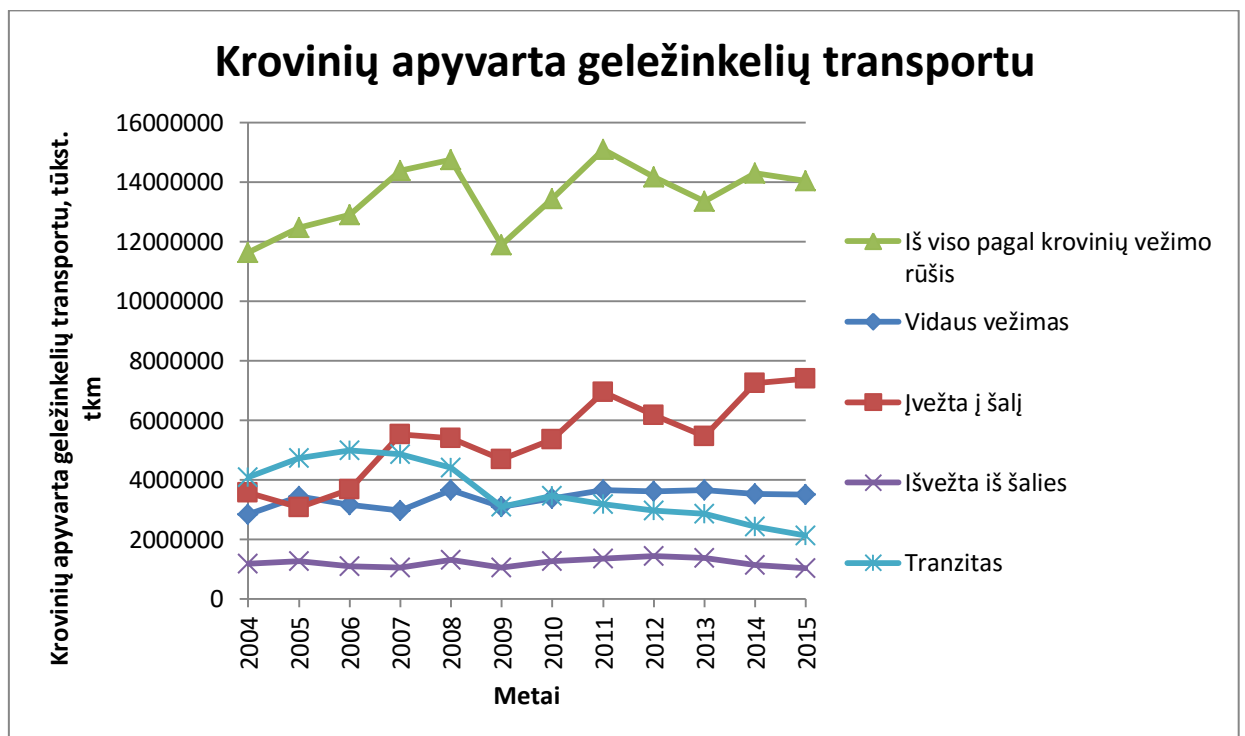
5.3 pav. Keleivių vežimas visų rūšių transportu



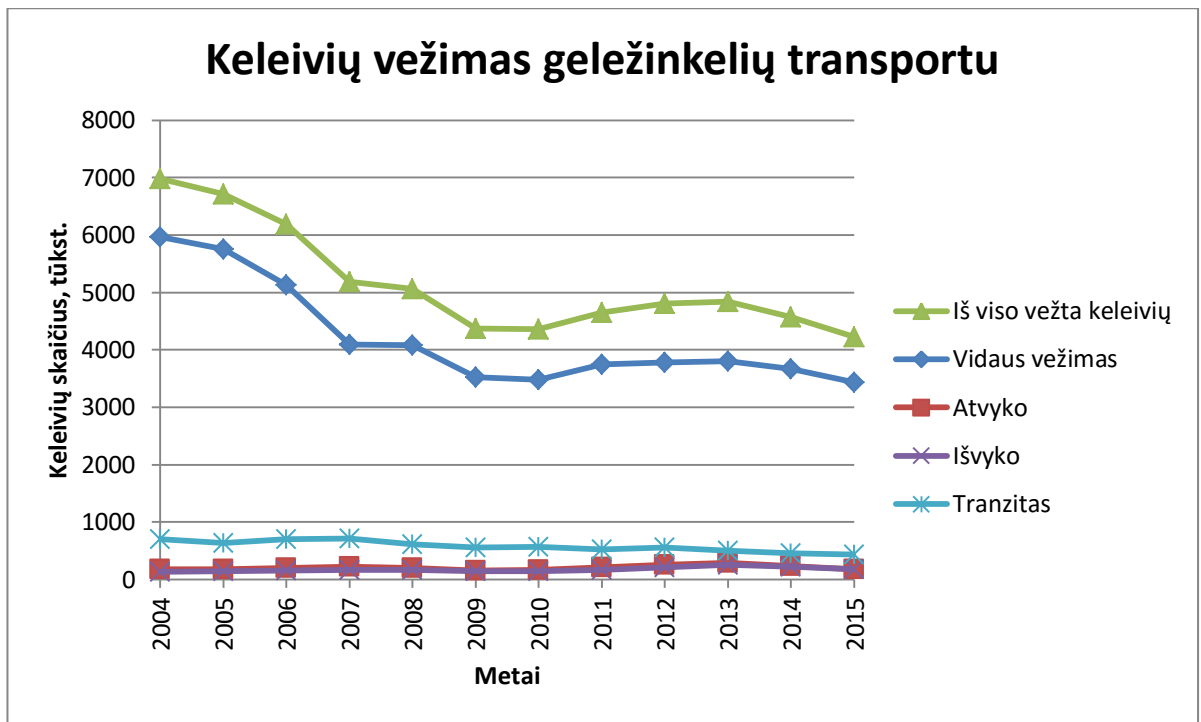
5.4 pav. Keleivių apyvarta visų rūšių transportu



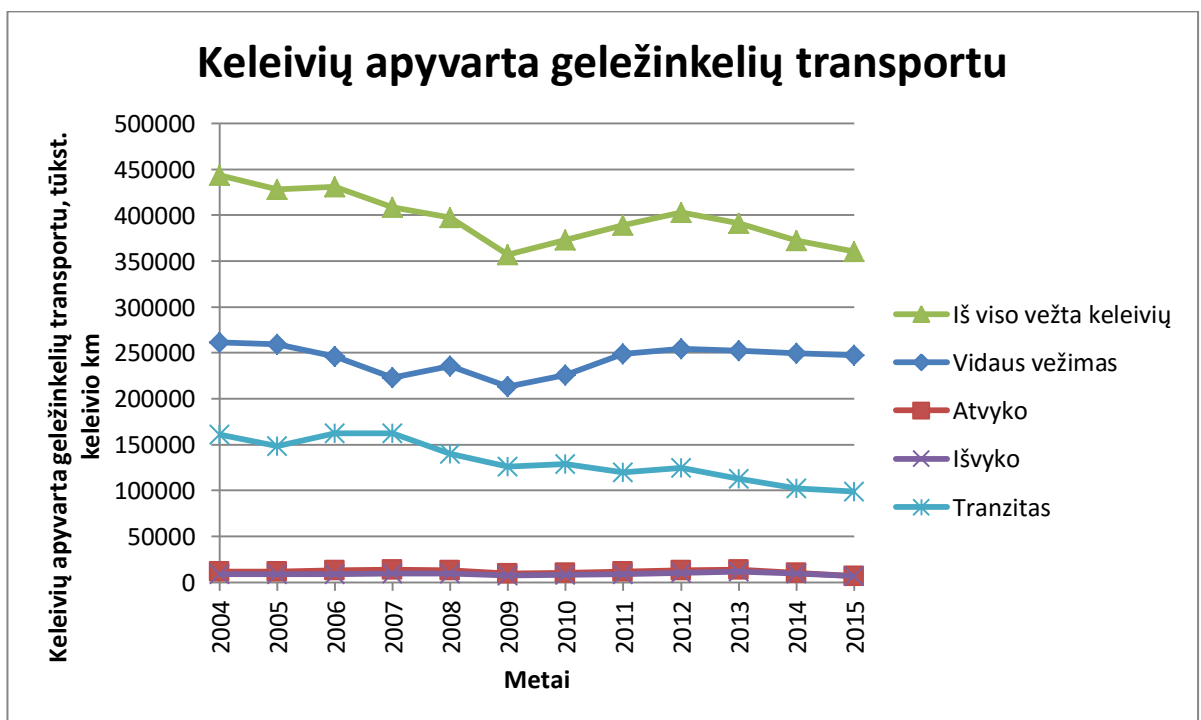
5.5 pav. Krovinių vežimas geležinkelių transportu



5.6 pav. Krovinių apyvarta geležinkelių transportu



5.7 pav. Keleivių vežimas geležinkelių transportu



5.8 pav. Keleivių apyvarta geležinkelių transportu

Remiantis pateiktomis diagramomis galima teigti, jog krovinių vežimo apimtys kelių ir geležinkelių transportu yra gana panašios, tačiau vertinant krovinių apyvartos rodiklį, tampa akivaizdu, kad apyvarta didesnė krovinius vežant kelių transportu. Tai reiškia, kad keliais kroviniai nuvežami didesnius atstumus. Tai nestebina žinant faktą, kad didžioji dalis krovinių iš Lietuvos ir į

Lietuvą geležinkeliais keliauja į Rytus, o partneriai vakaruose pasiekiami naudojant kelių transportą arba laivus.

Vertinant keleivių vežimą, tai vienareikšmis lyderis yra kelių transportas. Didžiausią keleivių apyvartą taip pat generuoja kelių transportas, nors nedaug atsilieka ir oro transportas. Tai reiškia, kad įveikdami didesnius atstumus keleiviai mieliau renkasi oro transportą. Galima pastebėti ir tendenciją, jog keleivių vežimai geležinkeliais Lietuvoje kasmet mažėja.

Lyginant krovinių ir keleivių vežimus tarpusavyje, akivaizdu, jog krovinių vežimas geležinkelių transportu turi savo rinką, o keleivių vežimai, tuo tarpu, yra visiškai nekonkurencingi lyginant su kitomis transporto rūšimis. Kroviniai vežami įvairiais maršrutais ne tik į NVS šalis, tačiau ir į Vakarų Europą: kursuoja tokie konteineriniai traukiniai kaip „Saulė“, „Šeštakai Express“, „Milan Express“. Jei pirmieji du kursuoja pagal poreikį (t. y. tuomet, kuomet yra krovinių), tai konteinerinis traukinys „Milan Express“ kursuoja kartą į savaitę. Tuo tarpu keleiviai gali rinktis tik du tarptautinius maršrutus: Vilnius–Maskva ir Vilnius–Minskas. O tai reiškia, kad nėra jokio maršruto Vakarų Europos link.

Taigi akivaizdu, kad šiuo metu daugiausiai naudos iš kintamo vėžės pločio įrenginio būtų galima gauti naudojant tokį įrenginį traukiniuose vežančiuose keleivius ir sukuriant naujus tarptautinio susisiekimo geležinkelių maršrutus. Žinant faktą, kad įgyvendinus projektą „Rail Baltica“ šalyje vis tiek liks skirtingos vėžės pločio keliai, tokio įrenginio panaudojimas netolimoje ateityje padėtų sukurti kelionių geležinkeliais rinką. O tuomet, kai projektas „Rail Baltica“ bus baigtas, kintamo vėžės pločio traukinio važiuoklės sistemos panaudojimo galimybės tik dar labiau išsiplėstų.

Krovinių vežimas kintamo vėžės pločio aširačiais aprūpintu traukiniu taip pat galėtų atnešti naudos praplečiant maršrutų skaičių ar atliekant specifinių produktų vežimus, tačiau, manoma, jog gauti leidimus tokius traukinius eksploatuoti Rusijos geležinkelių infrastruktūroje būtų sudėtingiau, nei gauti tokius leidimus eksploatuoti traukinius Vakarų Europos geležinkelių infrastruktūroje. Todėl šiame darbe toliau nagrinėjama keleivių vežimo perspektyva ir galima ekonominė tokios veiklos nauda

5.2. Ekonominis efektas

J. Butkevičiaus straipsnyje [33] nagrinėta galimybė paleisti tiesioginį keleivinį traukinį „Vilnius–Varšuva“, kuris būtų aprūpintas kintamo vėžės pločio traukinio važiuokle. Preliminari kaina perkant naujus Euronight tipo vagonus siekia apie 11,4 mln. eurų, vagonų gamyba užtruktų apie 12 mėn.. Papildomai reiktų pirkti 8 adaptyvius aširačius, kurie būtų skirti pakeitimui, nes vienam aširačiui pagaminti reikia maždaug 6 mėn., todėl atsarga turi būti pasirūpinta iš anksto.

Vieno aširačio kaina lygi 33,4 tūkst. eurų, taigi 8 aširačiai kainuotų 267,2 tūkst. eurų. Taigi viso projekto kaina siektų apie 11,7 mln. eurų, o pats traukinys eksploatacijai galėtų būti paruoštas maždaug per vienerius metus.

Jei traukinį sudarytų 4 vagonai, kiekviename po 28 sėdimas vietas, tuomet visame traukinyje būtų 112 vietų. Manoma, jog traukinys galėtų kursuoti kiekvieną dieną, o bilieto kaina turėtų būti panaši arba šiek tiek brangesnė nei keliaujant autobusu – apie 25 eurus. Vertinant geriausią variantą, kuomet parduodami visi traukinio bilietai, per metus būtų galima gauti maždaug 1 mln. eurų pajamų. Tokiais tempais, nevertinant riedmenų priežiūros išlaidų (tačiau įskaičiuojant atsarginių aširačių kainą), kintamo vėžės pločio važiuoklės sistemos panaudojimas turėtų atsipirkti maždaug per 12 metų. Vertinant mažiau optimistine prognoze, investicijos turėtų atsipirkti keliais metais vėliau.

Tačiau kintamo pločio traukinio važiuoklės sistemos privalumas yra ne tik galima tiesioginė ekonominė nauda. Pagrindinis tokio sprendimo privalumas – įgyvendinimo trukmė, lyginant su projekto „Rail Baltica“ įgyvendinimo trukme (projektas jau tęsiasi 20 metų, o galutinio įgyvendinimo termino vis dar nėra numatyta). Kintamo vėžės pločio važiuoklės sistema ir traukinys „Vilnius–Varšuva“ galėtų pradėti kursuoti 2-3 metų bėgyje, o galbūt netgi greičiau.

Lietuvos geležinkelių tinkle pradėjus naudoti kintamo vėžės pločio važiuoklės sistemą keleivių vežimas traukiniais nepasidarytų savaimė pelningas, tačiau galėtų geriau konkuruoti su kelių ir oro transportu. Šios sistemos panaudojimas taip pat galėtų padėti tiksliau įvertinti preliminarią ekonominę projekto „Rail Baltica“ naudą, kuria dabar kartais abejojama.

5.3. Penktojo skyriaus išvados

3. Kintamo vėžės pločio traukinio važiuoklės sistema pirmiausiai galėtų būti pritaikyta keleivių vežimuose, atgaivinant Lietuvos geležinkelių tinklo jungtį su Vakarų Europa ir paleidžiant traukinį Vilnius–Varšuva. Remiantis optimistinėmis prognozėmis, sistema galėtų atsipirkti per maždaug dvylika eksploatacijos metų.

4. Traukinys maršrutu Vilnius–Varšuva galėtų būti paleistas maždaug per 2-3 metus, taigi greičiau, nei realiai galėtų būti pabaigtas projektas „Rail Baltica“, kuris įvardintos pabaigos datos dar neturi. Taip greičiau būtų užtikrinta Lietuvos geležinkelių jungtis su Vakarų Europa, kas, iš tiesų, ir buvo pirminis projekto „Rail Baltica“ tikslas.

5. Įgyvendinus projektą „Rail Baltica“ kintamo vėžės pločio sistemos panaudojimo poreikis ne tik kad nesumažėtų, tačiau turėtų ir padidėti, nes atsirastų galimybė praplėsti kelionių maršrutus.

IŠVADOS

1. Egzistuoja nemažai vėžės pločio keitimo sistemų, kurios skiriasi įvairiais parametrais, tačiau visos jo turi du dalykus: vėžės sandūros vietoje ant kelio įrengtą įrenginį, sudarytą iš pagalbinių bėgių ir gretbėgių, bei adaptyvų aširatį. Įvairiose sistemose naudojamos skirtingos ratų blokavimo sistemos, taigi ir skirtingi įrenginiai ant kelio, o tai sukuria naują problemą – skirtingos vėžės pločio keitimo sistemos yra nesuderinamos tarpusavyje, o vien Europoje jų yra bent keturios. Todėl turi būti sprendžiama arba suderinamumo problema, arba mažinamas skirtingų sistemų skaičius ir pereinama prie vieno tipo sistemos.

2. Traukinio aširatis dirba sudėtingomis sąlygomis: jį veikia didelės statinės ir dinaminės apkrovos, riedėjimą palengvinantis, bet patvarumą mažinantis praktiškai taškinis rato kontaktas su bėgiu, presuota jungtis tarp rato stebulės ir ašies, kur pasireiškia trinties korozija. Sukurtas aširačio skaičiuojamasis modelis, įvertinantis abu veikiančius kontaktus: ašies ir rato, bei rato ir bėgio. Pastarasis kontaktas padeda apibrėžti aširačio kraštines sąlygas. Tokiu būdu gaunamas realus deformacijų ir įtempių pasiskirstymas.

3. Lyginant visų svarbiausiųjų pjūvių įtempių pasiskirstymą esant skirtingam vėžės pločiui, mažiausiai pakinta ašies kakliuko įtempiai. Nors atramos taškas kiekvienam ratui pasislenka per 42,5 mm, o tai reiškia, kad tiek padidėja jėgos petys (atitinkamai ir lenkimo momentas), tačiau pats jėgos pridėjimo taškas nepakinta, o ratas pasislenka ta ašies dalimi, kuri turi didžiausią skerspjūvį, todėl įtempiai ašies kakliuko pjūvyje išlieka panašaus intensyvumo net ir kintant vėžės pločiui. Taigi ašies kakliuko įtempiai daugiausiai priklauso nuo apkrovos intensyvumo, ašies kakliuko geometrijos ir postebulinės ašies dalies diametro, bet ne nuo vėžės pločio. Todėl, projektuojant kintamo vėžės pločio aširačius ašies kakliuko diametro didinti nereikėtų.

4. Įtempių pasiskirstymas nagrinėjamuose svarbiausiuose pjūviuose kintant vėžės pločiui išlieka panašus, tačiau įtempiai esant siauresnei vėžei visuose pjūviuose yra didesnio intensyvumo, todėl siekiant naudoti tą pačią ašį esant skirtingam vėžės pločiui, ašies skerspjūviai (postebulinės ir vidurinės dalies) turėtų būti didinami.

5. Aširačio suminės deformacijos ir poslinkiai atitinka realių sistemų ir literatūroje aprašytas deformacijas bei poslinkius, nes ašis pagrinde yra deformuojama lenkimo momento. Didžiausi įtempiai susidaro ašies išorėje, o vidinėje dalyje įtempiai artėja prie nulio. Išskyrus ašies zoną po rato stebule, kur gana dideli įtempimai susidaro ir ašies vidurinėje dalyje. Tačiau tai galima vertinti kaip skaičiuojamojo modelio netobulumą. Analitiškai apskaičiuotos reakcijos jėgos lyginant su tyrimo metu gautais rezultatai skiriasi 13-15,7%. Šis skirtumas gali atsirasti, dėl tų pačių priežasčių, susijusių su kraštinėmis sąlygomis. Tačiau skirtumas tarp rezultatų nėra labai ženklus ir

praktiškai išlieka pastovus kintant apkrovai, taigi skaičiavimo rezultatus galima vadinti patenkinamais.

6. Vienas pagrindinių SUW 2000 tipo aširačių sistemos trūkumų pastebėtų atliekant bandomuosius važiavimus yra fretinginis ašies dilimas, atsirandantis veikiant didelėms apkrovoms ir virpesiams, kurie susidaro, esant tarpeliui tarp rato ir ašies. Tokio dilimo galima išvengti ašį dengiant molibdeno danga, tačiau tai brangiai kainuoja, be to padengus ašį tokia danga padidėja paviršiaus trinties koeficientas, todėl reikalinga didesnė jėga norint perstumti ratą į kitą poziciją.

7. Tampriosios įvorės geometrija yra palanki kauptis įtempių koncentracijoms, galimas atsitiktinis tokios įvorės dantuko lūžimas pasireiškiant plastinėms deformacijoms. Apskaičiuota, kad tokia įvorė turėtų atlaikyti maždaug 700 tūkst. apkrovimo ciklą, tačiau šis skaičius labai priklauso nuo pasirinktos medžiagos savybių. Šiuo atveju tikslios tikrosios šios įvorės medžiagos savybės nėra žinomos, todėl ciklą skaičių galima vertinti tik kaip orientacinę reikšmę. Įvorės geometrija turėtų būti koreguojama siekiant sumažinti įtempių koncentraciją (įvedant suapvalinimus dantukų ir pagrindo tvirtinimo vietoje).

8. Automatinė vėžės pločio keitimo sistema Lietuvoje galėtų būti panaudota kaip projekto „Rail Baltica“ papildinys keleivių vežimuose. Ši sistema leistų Lietuvai geležinkelių tinklu su Vakarų Europa susijungti daug greičiau, nei bus baigtas „Rail Baltica“ projektas. Skaičiuojama, jog tiesioginį traukinį Vilnius-Varšuva būtų galima paleisti per 2-3 metus, o investicijos turėtų atsipirkti per maždaug eksploatacijos 12 metų. Kadangi jau nutiesta „Rail Baltica“ atkarpa iki Kauno, būtent šioje vietoje tikslinga būtų įrengti vėžės pločio keitimo įrenginį.

9. Automatinė vėžės pločio keitimo sistema greičiausiai nepasiteisintų, jei Lenkijoje artimiausiu metu nebus atnaujinta bent jau geležinkelio atkarpa nuo Lietuvos valstybės sienos iki Balstogės. Be, tokiu atveju, nepasiteisintų ir visas projektas „Rail Baltica“.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

- [1] L. P. Lingaitis, J. Butkevičius, I. Podagėlis, K. Sakalauskas, G. Vaičiūnas, G. Bureika, I. Gailienė, V. Petrenko, and R. Subačius, *Geležinkeliai. Bendrasis kursas*. Vilnius: Technika, 2009.
- [2] “Lietuvos Respublikos Susisiekimo ministerijos internetinis puslapis ,” 2016. [Interaktyvus]. Prieiga: <http://www.transp.lt>.
- [3] “AB Lietuvos geležinkeliai internetinis puslapis.” [Interaktyvus]. Prieiga: <http://www.litrail.lt>.
- [4] “Lietuvos geležinkelių 2014-ųjų metų veiklos ataskaita,” AB Lietuvos geležinkeliai, 2015.
- [5] “Projekto „Rail Baltica“ internetinis puslapis .” [Interaktyvus]. Prieiga: <http://www.rail-baltica.lt/>.
- [6] A. García Álvarez, “Automatic track gauge changeover for trains in Spain,” vol. 4. Fundación de los Ferrocarriles Españoles, 2010.
- [7] *Geležinkelio kelio priežiūros taisyklės K/111*. 2012.
- [8] M. Kanclerz, “Study on European Automatic Track Gauge Changeover Systems.” 2007.
- [9] “Internetinė statistikos enciklopedija.” [Interaktyvus]. Prieiga: <http://www.statemaster.com/encyclopedia/List-of-rail-gauges>.
- [10] “Siemens internetinis tinklapis.” [Interaktyvus]. Prieiga: <http://www.mobility.siemens.com/>.
- [11] J. Armitstead, “Geležinkelių nuotraukų galerija.” [Interaktyvus]. Prieiga: <http://www.johndarm.clara.net/>.
- [12] E. Digrytė, “Traukinys į Varšuvą: lietuviams reikalingas, lenkams nelabai,” *Veidas*, 2016.
- [13] “255K Sugretintų vėžių kelio tiesimo ir priežiūros instrukcija (1435 ir 1520 mm pločio vėžės).” .
- [14] G. Vaičiūnas, *Lokomotyvai ir vagonai - 2. Mokomoji knyga*. Vilnius: Technika, 2012.
- [15] M. Spiriyagin, C. Cole, Y. Quan Sun, M. McClanachan, V. Spiriyagin, and T. McSweeney, *Design and Simulation of Rail Vehicles*. Taylor & Francis Group, 2014.
- [16] “ИЛЛЮСТРИРОВАННОЕ УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ КОНСТРУКЦИЯ ТЕЛЕЖЕК ГРУЗОВЫХ И ПАССАЖИРСКИХ ВАГОНОВ” [Interaktyvus]. Prieiga: <http://rcit.su/techinfoC3.html>.
- [17] Ž. Bazaras, R. Dundulis, and J. Kalpokas, *Geležinkelio riedmenys*. Kaunas: Technologija, 1995.
- [18] H. Sivilevičius, Š. Šukevičius, L. Maskeliūnaitė, and J. Bražiūnas, *Transporto sistemos elementai: Praktinių darbų metodikos nurodymai*. Vilnius: Technika, 2012.
- [19] E. Dulinskas, *1520 mm vėžės pločio geležinkelių linijos projektavimas, kai viršutinėje kelio*

konstrukcijoje naudojami gelžbetoniniai pabėgiai. Mokomoji knyga. Geležinkelio projektavimo nurodymai. Vilnius, 2011.

- [20] R. de San Dámaso Martín, “Joint operation of different characteristics railways networks.” High-speed railway network executive direction, 2010.
- [21] “Bochumer Verein Verkehrstechnik GmbH internetinis puslapis.” [Interaktyvus]. Prieiga: <http://www.bochumer-verein.de/>.
- [22] S. Lotysz, “Changing to Automatic Track Gauge Changeover.” [Interaktyvus]. Prieiga: <http://www.inventingeurope.eu/story/changing-to-automatic-track-gauge-changeover>.
- [23] J. Kanaporienė and Ž. Bazaras, “Geležinkelio vėžės keitimo įrenginių ašių stiprumo tyrimas,” in *Technologijos mokslai šiandien ir rytoj - 2011: studentų mokslinių darbų konferencijos pranešimų medžiaga*, 2011, pp. 194–199.
- [24] “CAF internetinis tinklapis,” 2016. [Interaktyvus]. Prieiga: <http://www.caf.net/>.
- [25] “Gauge-changing Free Gauge Train on test in Kyushu,” 2014. [Interaktyvus]. Prieiga: <http://www.railwaygazette.com/news/high-speed/single-view/view/gauge-changing-free-gauge-train-on-test-in-kyushu.html>.
- [26] J. L. Lopez Gomez and B. G. Calderon, “Variable-gauge wheelset for a railway vehicle with independent drive wheels directly coupled to coaxial motors,” 2008.
- [27] “Talga internetinis puslapis.” [Interaktyvus]. Prieiga: <http://www.talgo.com/pdf/TXXIen.pdf>.
- [28] H. Holland, K. Jendricke, H. Koch, W. Rode, G. Schulz, and M. Schwartze, “Spurwechselradsatz für Schienenfahrzeuge,” 1998.
- [29] “Interoperability, security and safety of goods movement with 1435 and 1520 (1524) mm track gauge railways: new technology in freight transport including hazardous products,” Politechnika Warszawska, 2008.
- [30] O. Stukalina and A. Dzhaleva-Chonkova, “Problems of rail connections between Ukraine and its neighbouring Countries,” *Mech. Transp. Commun.*, vol. 10, no. 3/2, 2012.
- [31] “Schaeffler Technologies AG & Co. KG.” [Interaktyvus]. Prieiga: http://www.ina.de/content.ina.de/en/branches/industry/rail_vehicles/applications_4/pulled_cars/freight_cars/suw_2000_track_gauge_changing_system/SUW_2000_track_gauge_changing_system~1.jsp.
- [32] P. Lencki and W. Sawczuk, “Wybrane zagadnienia z eksploatacji zestawu przestawczego SUW-2000,” *Logistyka*, vol. 3, pp. 2789–2798, 2015.
- [33] J. Butkevičius, “Development of passenger transportation by railroad from Lithuania to European states,” *Transport*, vol. 22, no. 2, pp. 73–79, 2007.
- [34] J. Butkevičius, “The research into the development of passenger transport by land,” *Transport*, vol. 19, no. 5, pp. 195–201, 2004.

- [35] A. Šimėnas, „„Rail Baltica“ projektas: kada turėsime greitąjį traukinį į Varšuvą,” *Transportas*, 2009.
- [36] F. Dionori, L. Casullo, S. Ellis, D. Ranghetti, K. Bablinski, C. Vollath, and C. Soutra, “Krovinių vežimas keliais. Kodėl ES krovinių siuntėjai renkasi sunkvežinius, o ne traukinius? Santrauka.” p. 4, 2015.
- [37] M. Mikulėnas and G. Vaičiūnas, “Krovininio geležinkelių transporto konkurencingumo tyrimas,” in *15-oji Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija “Mokslas - Lietuvos ateitis,”* 2012, pp. 334–337.
- [38] K. V. Sokolovskaja, “Kelių ir geležinkelių transporto sąveika siekiant intermodalumo,” in *18-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos “Mokslas - Lietuvos ateitis” teminė konferencija Verslas XXI amžiuje,* 2015, pp. 37–45.
- [39] S. Guzowski and M. Michnej, “Influence of technological methods increasing surface layer durability on axles fretting wear in railway wheel sets,” *Maintenance Rehabil.*, vol. 18, no. 1, pp. 1–9, 2016.
- [40] T. Makino and H. Sakai, “Fatigue Property of Railway Axles for Shinkansen Vehicles,” 2013.
- [41] “ГОСТ 22780-93 межгосударственный стандарт оси для вагонов железных дорог колеи 1520 (1524) мм.” 1993.
- [42] “ANSYS Help Documentation.” .
- [43] “Ansys Lecture No. 3. Introduction to Contact.” ANSYS, 2010.
- [44] Š. Šukevičius, *Kompiuterizuotas projektavimas ir modeliavimas*. Vilnius: Technika, 2012.
- [45] “Technomatematikos studijų internetinis konspektų puslapis.” [Interaktyvus]. Prieiga: http://www.techmat.vgtu.lt/konspektai/Skaic_mech/Inziner_met/Teorija/zGG_P13.pdf.
- [46] S. Guzowski, “Zuzycue frettingowe w srodkach transportu,” in *Logistyka*, 2014, pp. 396–401.
- [47] “Lietuvos statistikos departamento oficialios statistikos portalas.” [Interaktyvus]. Prieiga: <http://osp.stat.gov.lt/>. [Prisijungta:2016-05-30].

PRIEDAI

1 priedas. SUW-2000 tipo aširačio modelio brėžinys.