

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

# ELEKTRITRASPORDI KONTAKTVÕRGUSÜSTEEMIDE KOORMUSVOOLU MÄÄRATLEMISE METOODIKATE ANALÜÜS

THE ANALYSIS OF THE CATENARY LOAD CURRENT COUNTING METHODS AT  
THE ELECTRIC TRANSPORT

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Anton Tšizov

Üliõpilaskood: 15578

Juhendaja: dotsent Jako Kilter

Tallinn, 2018

(Tiitellehe pöördel)

## AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

“.....” ..... 201.....

Autor: .....

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

“.....” ..... 201.....

Juhendaja: .....

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....” .....201... .

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ nimi ja allkiri /

# LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

*Autor:* Anton Tšišov

*Lõputöö liik:* Bakalaureusetöö

*Töö pealkiri:* Elektritranspordi kontaktvõrgusüsteemide koormusvoolu määratlemise meetodikate analüüs

*Kuupäev:* 24.05.2019

82 lk

*Ülikool:* Tallinna Tehnikaülikool

*Teaduskond:* Inseneriteaduskond

*Instituut:* Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

*Töö juhendaja:* dotsent Jako Kilter

*Töö konsultandid:* Tanel Sarnet, Svetlana Belogurova, Sergei Andreev

*Sisu kirjeldus:* Käesoleva lõputöö peamine eesmärk on uurida elektrifitseeritud transpordi kontaktvõrgu parameetrite dimensioneerimismeetmete rakendavust realselt eksisteeriva avaliku raudtee parameetrite määtlamise näitel. Uurimistöö kestel uuriti asjakohaseid teabeallikaid, mis käsitlevad kontaktvõrgusüsteemide koormusvoolu määratlemise meetodikate puuduseid, eeliseid ja sovitulislikku kasutusala. Lõputöö raames hinnati tööstusliku-, avaliku ja linnalähedaste raudteesüsteemide koormusmudelite iseärasusi analüüsiti nende raudteeliike toitvate veoalajaamade koormus sõltuvana aastaajast, nädalapäevast ja päeva osast. Transpordiettevõttega saadud dokumendite alusel koostati vajalik algandmete maht veoarvutuste teostamiseks ja kontaktvõrgusüsteemide dimensioneerimiks. Erinevate mööda vaadeldavat raudteeliigu läbivate koormate jaoks teostati veojõudude, lahendati pidurdusülesanne ja ronguliikluse peamised võrrandid. Saadud tulemuste alusel koostati rongide voolutarbimisdiagrammide. Normatiivse liiklusgraafiku ja koostatud voolutarbimisdiagrammide alusel valiti kontaktjuhtme ristlõike pindala.

Tõenäolisuslikke ja determenislikke meetodeid kasutades arvutati koormusvoolu efektiiv-, kesk ja ülekoormused, mida seejärel võrreldi teoreetilise voolu suuruste ja piirangutega, mis on avaldatud kontaktvõrgutootja poolt konkreetsele juhmetüübile. Arvutustulemuste analüüsi põhjal esitati hinnang eraldi iga rakendatud veovõrgu parameetri kasutuskõlblikusele ja kogu dimendioneerimisülesanne lahendamise edukusele tervikuna.

*Märksõnad:* raudtee koormusmudel, kontaktvõrgu arutusmeetodid, veoalajaama koormusgraafikud, veojõudude arvutused, rongi vooludiagram, kontaktvõrgu parameetride valik

## ABSTRACT

|  |  |
|--|--|
| <i>Author:</i> Anton Tšižov  | <i>Type of the work:</i> Bachelor Thesis |
| <i>Title:</i> The analysis of the catenary load current counting methods at the electrical transport   |  |
| <i>Date:</i> 24.05.2019  | 82 lk                                    |
| <i>University:</i> Tallinn University of Technology  |  |
| <i>School:</i> School of Engineering   |  |
| <i>Department:</i> Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics   |  |
| <i>Supervisor of the thesis:</i> Associate Professor Jako Kilter   |  |
| <i>Consultants:</i> Tanel Sarnet, Svetlana Belogurova, Sergei Andreev  |  |
| <p><i>Abstract:</i> The main purpose of this research was to study the implementation of load current calculation methods at the electrical transport. The chosen methods were validated based on actual exciting public railway system, where trains with variable technical parametres are operated. At the beginning of this diploma work the revelant literature about about advantages and disadvantages of each load calculating method was studied. The features of the power loading model at the public, industrial and suburban railway systems were studied. The ordinary traction substation load dependence on season, weekday and part of day for each mentioned railway type were presented. Given by railway operator primary data related to train traffic and documentation describing the features of railway infrastructure were validated and prepared for the calculation of the train dynamics affecting forces. According to the analysis of the train dynamics the trainset load current diagrams were described. Having studied load current diagrams and related train traffic documentation the most suitable cross-section of catenary wire was recommended. Implementing the stochastic ja deterministic calculating methods the average, effective and overloading current values were investigated. In terms of each methodics calculated values were compared with theoretical ones and also with the catenary manufacturer limitations. The conclusion of each implemented methods accuracy and the success of catenary wire choice in whole was made.</p> |  |
| <p><i>Keywords:</i> railway power model, catenary current calculating methods, traction substation load dependences, running resistance, train movement dynamics, current diagramms, stochastic ja deterministic methods, choise of wire cross-section area, catenary technical limitations</p>  |  |

# SISUKORD

|  |    |
|--|----|
| LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE .....  | 3  |
| ABSTRACT .....   | 4  |
| LÕPUTÖÖ ÜLESANNE .....   | 8  |
| EESSÕNA.....   | 13 |
| SISSEJUHATUS.....  | 14 |
| 1. KOORMUSVOOLU DIMENSIOMEERIMISMEETMETE ÜLEVAADE .....                | 17 |
| 1.1 Ühtlaselt hajutatud koormuse meetod .....                          | 17 |
| 1.2 Graafiku lõigete meetod .....                                      | 19 |
| 1.3 Üldistatud analüütiline meetod .....                               | 19 |
| 1.4 Tõenäolisuslik meetod .....  | 22 |
| 2. RONGI LIIKLUSDÜNAAMIKALE MÕJUVATE JÕUDUDE ÜLEVAADE .....            | 24 |
| 2.1 Peamine liiklustakistusjõud .....                                  | 24 |
| 2.2 Lisa liiklustakistusjõud .....                                     | 25 |
| 2.2.1 Lisa liiklustakistus kõveratest .....                            | 25 |
| 2.2.2 Lisa liiklustakistus tõustest ja kaldest .....                   | 27 |
| 2.2.3 Teised tähtsad lisa liiklustakistusjõudu komponendid .....       | 27 |
| 2.3 Pidurdusjõud.....  | 28 |
| 2.4 Veojõud .....  | 31 |
| 2.5 Rongiliikluse peamine võrrand .....                                | 32 |
| 3. RAUDTEE VEOVÕRGUDE LIIGITUS KOORMUSMUDELIE ISEÄRASUSUTE JÄRGI ..... | 34 |
| 3.1 Linnalähedus raudtee.....  | 34 |
| 3.2 Tööstuslik raudtee .....   | 35 |
| 3.3 Avalik raudtee.....  | 37 |
| 4. KOORMUSVOOLU METOODIKATE ANALÜÜS AVALIKU RAUDTEE NÄITEL .....       | 40 |

|   |    |
|---|----|
| 4.1 Lähteandmete ettevalmistus.....   | 40 |
| 4.1.1 Raudteesüsteemi lühikirjeldus.....  | 40 |
| 4.1.2 Koormate parameetrite määramine normatiivse liiklusgraafiku alusel.....                                       | 41 |
| 4.1.3 Jaamavahe pikiprofili analüüs.....  | 42 |
| 4.1.4 Elektrivedurite sisend-väljund karakteristikute interpoleerimine.....   | 43 |
| 4.1.5 Küsitluslehe täitmine.....  | 44 |
| 4.2 Veojõudude arvutused.....   | 45 |
| 4.2.1 Peamine eriliiklustakistusjõudu määramine.....  | 45 |
| 4.2.2 Pidurdusülesande lahendamine.....   | 47 |
| 4.2.3 Kõverate läbimisega põhjustatud lisaliiklustakistusjõudu määramine.....                                       | 49 |
| 4.2.4 Tõuste ja kaldega põhjustatud lisaliiklustakistusjõudu arvutamine.....  | 50 |
| 4.2.5 Rongide voolutarbimisdiagramme koostamine.....  | 51 |
| 4.3 Veovõrgu elektrilised arvutused.....  | 52 |
| 4.3.1 Koormusvoolu suuruse eksperthinnang.....  | 53 |
| 4.3.2 Ühtlaselt hajutatud koomuse meetod.....   | 55 |
| 4.3.3 Ühtlaselt hajutatud koomuse meetod.....   | 56 |
| 4.3.4 Tõenäosuslik meetod.....  | 58 |
| 4.3.5 Erinevate meetmete kaudu saadud tulemuste omavaheline võrdlemine.....   | 63 |
| KOKKUVÕTE.....  | 65 |
| SUMMARY.....  | 67 |
| KASUTATUD KIRJANDUS.....  | 68 |
| Lisa 1 Peamise eritakistusjõudu määramisvalemite esinevate tegurite väärtused erineva iseliiguga veeremi jaoks..... | 71 |
| Lisa 2 Kaubarongide numeratsioon.....   | 72 |
| Lisa 3 Aastate 2018-2019 Eesti Raudtee Ida suuna kaubarongide formeerimiskava.....                                  | 73 |
| Lisa 4 Eesti Raudtee kaubarongide numeratsioon.....   | 74 |

|   |    |
|---|----|
| Lisa 5 Aegviidu-Tapa jaamavahe pikiprofiil .....  | 75 |
| Lisa 6 Aegviidu-Tapa lavastiku maatriks.....  | 76 |
| Lisa 7 Series 10 iseliiguva veeremi sisend-väljund karakteristikud.....                     | 77 |
| Lisa 8 Series 10 elektriveduri karakteristiku lineaarse interpoleerimise väljavõte.....     | 78 |
| Lisa 9 Väljavõte peamise veotakistusjõudu arvutavast abirakendusest .....                   | 79 |
| Lisa 10 Väljavõte kõveratega põhjustava lisaveotakistusjõudu arvutavast abirakendusest..... | 80 |
| Lisa 11 Kaubarongi veoarvutuste koondtabel .....  | 81 |
| Lisa 12 Veovõrgu elektrilise arvutuse koondtabel .....                                      | 82 |

# LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

|                               |   |
|-------------------------------|---|
| Lõputöö teema:                | <b>Elektritranspordi kontaktvõrgusüsteemide koormusvoolu määratlemise meetodikate analüüs</b> |
| Lõputöö teema inglise keeles: | <b>The analysis on the catenary load current counting methodics at the electric transport</b> |
| Üliõpilane:                   | <b>Anton Tšišov, 155478</b>   |
| Eriala:                       | <b>elektroenergeetika AAVB</b>  |
| Õppekava juht:                | <b>professor Ivo Palu</b>   |
| Lõputöö liik:                 | <b>bakalaureusetöö</b>  |
| Lõputöö juhendaja:            | <b>dotsent Jako Kilter</b>  |
| Lõputöö esitamise tähtaeg:    | <b>mai 2019</b>   |
| Lõputöö ülesande kehtivusaeg: | <b>veebruari 2020</b>   |

---

Üliõpilane (allkiri)

---

Juhendaja (allkiri)

---

Õppekava juht (allkiri)

## 1. Teema põhjendus

Tänapäeval kasutatakse laialdaselt elektrivedu kõikides rööbastranspordi liikides. Raudteeliinide elektrifitseerimisega kaasnevad mitmed olulised majanduslikud ja tehnilised eelised. Eestis ja selle naaberriikides juurutatakse edukalt elektrivedu rööbastranspordil ning töötatakse läbi projekte, mis on seotud kontaktvõrgu ja veolajaamade ehitamise või elektriraudtee arendamisega. Peale elektrivedu juurutamist lisanduvad raudteetaristul uued elemendid: kontaktvõrk, veolajaamad ning tagasivoolujuhid, mida on tarvis korralikult dimensioneerida.

Seoses Rail Baltica projekti aktuaalsusega ja Eesti elektrisüsteemi koormusmodelite täpsustamise vajadusega elektrisüsteemi talitluse planeerimiseks on oluline analüüsida elektriraudtee süsteemi koormuse olemust, määratleda selle tüüpilist, minimaalset ja maksimaalset väärtusi nii püsitalitluse kui ka avariijärgneva režiimi korral. Käesolevas töös käsitletakse üldisemalt elektrifitseeritud rööbastranspordi kontaktvõrgusüsteemide koormusvoolu määratlemise algoritme ning vaadeldakse täpsemalt tõenäosuslikku meetodikat. Kontaktvõrgusüsteemi koormusvoolu meetodite alusel on võimalik edaspidistes uurimistöodes täpsustada elektriraudtee süsteemi liitumispunkti koormusmudeleid, optimeerida kontaktvõrgu süsteemi parameetreid ja laiendada tõenäosusliku meetodika kasutusala.



## **2. Töö eesmärk**

Töö eesmärgiks on hinnata praktiliste näidete alusel mitu arvutusmeetodite täpsust ja rakendavust kontaktvõrgu süsteemi koormusvoolu määramiseks.

## **3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:**

1. Uurida maailmas kasutusel olevaid kontaktvõrgusüsteemide koormusvoolude määratlemise meetodeid.
2. Käsitleda rongi dünaamikale mõjuvad jõusid ja nende suuruste määramise ettekirjutused.
3. Kogutud materjali põhjal koostada ja hinnata meetodikate rakendamiseks vajalike lähteandmete mahtu ning nende mõju meetodikate täpsusele.
4. Uurida käsitlevate meetodite rakendatavust ja täpsust kontaktvõrgu koormusvoolu määramisel avaliku ja tööstusliku raudteede näidete alusel.
5. Analüüsi tulemuste põhjal valida välja sobiv meetodika matemaatiline representatsioon ja anda hinnang meetodi täpsusele DC elektriraudtee süsteemi korral.

## **4. Lähteandmed**

Teoreetiliste aluse koostamisel lähtutakse kirjanduslikest allikatest: raamatud, teadusartiklid jne. Uurimistöö praktilise osa teostamise jaoks vajalikke andmeid (plaanitud vedude normatiivne sõidugraafikuid ning maagi sisse- ja väljalaadimise plaane, pikiprofiile) saadavad logistika ettevõtte esindajad. Elektrifitseeritud raudteelõigu kontaktvõrgu dimensioneerimisarvutuste korral kasutatakse raudteesüsteemi lühikirjeldust, jaamavahe pikiprofiile, veeremi sisend-väljund karakteristikuid, veotöö mahtu kehtestavad dokumente, rongide pidurisüsteemi kasutuseeskirja. Täiendavad lähteandmed modelleerimiseks ning kontaktvõrgu süsteemi koormusvoolude hindamiseks esitab juhendaja.

## **5. Uurimismeetodid**

Analüüsida teema kohaselt avaldatud kirjandust, mis käsitleb kontaktvõrgu süsteemide koormusvoolude määratlemist ning transpordi talitluse karakteristikuid. Eksisteerivaid arvutusmeetmeid saab jaguneda kaheks kategooriaks: meetoditeks konkreetse teostatud või plaanitud vedude sõidugraafiku põhjal ning meetoditeks keskmise veotöö alusel. Antud uurimistöö raames käsitletakse ühtlaselt hajutatud koormuste meetod, graafiku lõigete meetodi, liikuvate koondatud koormuste, üldistatud analüütiline meetmeid ja detailsemalt pöörduvad tõenäosuslikule meetodile. Iga kontaktvõrgu dimensioneerimise arvutusmeetodi raames on vastu võetud koormusmudelit lihtsustavad oletuse ja tehtud lihtsustused, mis aitab vähendada arvutustöö mahtu, aga tuleb alati arvestada nende tegevuste mõju arvutustulemuste täpsutele. Väljavalitud karakteristikute matemaatiline üldistamine ja sobitamine koormusmudelitega.

## 6. Graafiline osa

Graafilises osas kasutatakse tekstijooniseid, mis põhiosas peaksid käsitlema raudteelõigu peateede kontaktvõrgu ja rööbasahelate ühendusskeeme, raudteejaamade signalide ja pöörmehtade asukohtade plaane, jaamavahede pikiprofiile, elektrivedurite sisend-väljund karakteristikke, rongide vooludiagrammeid, kontaktvoolu suuruse jaotusdiagrammeid, kontaktvõrgu aseskeemid, väljatrükke ning screen-shot'teid modelleerimistarkvaradest jne.

## 7. Töö struktuur

sisukord, lõputöö ülesanne, eessõna, sissejuhatus

### 1. põhiosa:

#### 1.1 kirjanduse ülevaade

1.1.1 arvutuste tostamiseks vajalikud algandmed

1.1.2 rongiliikluse dünaamika

1.1.3 arvutusmeetmed

1.1.4 välja arvutatavate suuruste loetelu, arvutustäpsus ja mõõtühikud

#### 1.2 praktiline osa

1.2.1 ülesande püstitus ja algandmete ettevalmistus

1.2.2 veojõudu arvutus ja pidurdusülesande lahendamine

1.2.3 vooludiagrammi koostamine ja energiatarbimisaega arvutamine

1.2.4 kontaktvõrgu aseskeemi ja parameetride dimensioneerimine

### 2. Saadud tulemuste interpretatsioon ja võrdlemine

### 3. Kokkuvõte

Kasutatud kirjandus

## 8. Kasutatud kirjanduse allikad

Töös lähtutakse kõik võimalikest tunnustatud infoallikatest, sh. raamatud, teaduslikud artiklid, monograafiad, kollokviumid ning standardite kogumikud jms.

Tööks vajaliku lähtematerjali otsimisel lähtuda järgnevatest allikatest:

1. Kiessling, F., Puschmann, R., Schmieder, A., Contact Lines for Electric Railways, Planning, design and implementation, Publicis, Siemens, 2001. [raamat paberandjal]
2. Марквардт, К.Г., Электроснабжение электрических железных дорог, Транспорт, Москва, 1965. [raamat paberandjal]
3. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию, Том 2, Электрооборудование / Под ред. А.А. Федорова, Энергоатомиздат, Москва, 1987. [raamat paberandjal]
4. Химмельблау, Д., Анализ процессов статистическими методами, Мир, Москва, 1973. Himmelblau, David M., Process analysis by statistical methods, John Wiley and sons, 1970. [tõlgitud raamat paberandjal]
5. Анисимов, В.А., Анисимов, В.В., “Теория тяги поездов и тяговые расчеты”, Дальневосточный институт путей сообщения, Хабаровск, 2013.  
[Online] <https://sites.google.com/site/tagapoezd/home>
6. Справочник проектировщика промышленных, жилых и гражданских зданий и сооружений транспорта, Промышленный транспорт/ Под ред. А.С. Гельмана, Издательство литературы по строительству, Москва, 1972.  
[standardite kogumik paberandjal]
7. Eesti Raudtee kodune lehekülj [Online] <http://www.evr.ee/et>
8. Kilter, J., Kangro, T., Sarnet, T., Ivo, P., “Elektriraudtee ja selle mõjud elektrisüsteemi talitlusele”, Talinn: Eleringi toimetised №2/2015 (10), 2015.[publikatsioon paberandjal]
9. Правила технической эксплуатации железных дорог РФ, Министерство путей сообщения РФ, 1999. [online] <http://www.dzd-ussr.ru/doc/norm/pte.htm>
10. Справочник по проектированию электрических сетей и электрооборудования / Под ред. Ю.Г. Барыбина, Л. Е. Фёдорова, М. Г. Зименкова, А. Г. Смирнова, Энергоатомиздат, Москва, 1991. [raamat paberandjal]
11. Л. В. Балон, В. А. Браташ, М. Л. Бичуч и др, Электроподвижной состав промышленного транспорта/ Под ред. Л. В. Балона, Транспорт, 1987.

## 9. Lõputöö konsultandid

Tanel Sarnet, TTÜ nooremteadur

Svetlana Belogurova, Enefit Kaevanduste AS-i logistikaettevõtte raudteeinsener

Mstislav Panov, Skinest Rail'i AS juhatusliige

Sergei Andrejev, Eesti Raudtee elektrivõrkude osakonna juhataja

## 10. Töö etapid ja ajakava

|   |                                  |
|---|----------------------------------|
| lähteandmete kogumine, kirjanduse läbitöötamine | 01. veebruar - 28. veebruar 2019 |
| teoreetilise osa kirjutamine                    | 1. märts - 31. märts 2019        |
| arvutuste ja modelleerimise teostamine          | 1. aprill - 30. aprill 2019      |
| uuringu tulemuste kirjeldamine                  | 1. mai - 4. mai 2019             |
| järelduste kirjutamine, kokkuvõtte koostamine   | 5. mai - 10. mai 2019            |
| töö esimene versiooni valmimine                 | 10. mai 2019                     |
| juhendajale läbilugemiseks saatmine             | 10. mai - 13. mai 2019           |
| Täienduste sisseviimine                         | 14. mai - 17. mai 2019           |
| juhendajale teiseks läbilugemiseks saatmine     | 18. mai - 24. mai 2019           |
| Töö lõplik valmimine                            | 24. mai 2019                     |

## EESSÕNA

Antud diplomitöö esialgne kontseptsioon kujunes õppepraktika soorituse kestel Ida-Virumaal. Ahtme raudteejaama inseneriosakonna töötajad aitasid sõnastada lõputöö teemat, edaspidi seda täpsustas diplomitöö juhataja. Selle lõputöö raames kasutatud Maavara laadimisplaane, Ahtme - Raudi jaamavahe pikiprofiili, veeremi automaatpidurduse kasutuseeskirja ja teisi tööstusliku raudteesüsteemi talitlust kehtestavat dokumentatsiooni esitas Leo Saar, Enefit Kaevanduste AS-i logistikaettevõtte varahalduse juht. Ida suunda 2018.-2019. aastate liiklusgraafikuid, Aegviidu-Tapa jaamavahe pikiprofiili jagas Dmitrij Sazanov, Eesti Raudtee projektide peaspetsialist.

Selle lõputöö sisu ja tulemuste vastu peamiselt tunneksid huvi need raudteetaristu haldusettevõtted, mille infrastruktuuri ulatuses kavatakse korraldada elektrivedurite ja elektrirongide liikumist, pikendada eksisteerivat elektriraudteed ning samuti analüüsida kontaktvõrgu ehitamisega kaasnevat riski ja eeldusi. Autor soovib tänada Svetlanat Belogurovat, Enefit Kaevanduste logistikaettevõtte raudteeinseneri ja Sergei Andreevit, Eesti Raudtee elektrivõrkude juhatajat antud lõputöö jaoks teabeallikate valimise abistamise eest ja mõnede kasulikkude nõude eest.

## SISSEJUHATUS

Tänapäeval kasutatakse laialdaselt elektrivedu kõikides rööbastranspordi liikides, nimelt: avalikel raudteedel, linnasisemistel ja linnalähedastel kergerööpmeliinidel, metroodes, trammisüsteemides, mäendusettevõtete laia ja -kitsapööpmelise tööstuslikes transportvõrkudes jne. Raudteeliinide elektrifitseerimisega kaasnevad mitud olulist majanduslikku ja tehnilist eelist. Esiteks elektrivedurid suudavad liigutada raskemaid koormaid ja tunduvalt suurema kiirusega, kui diiselledurid, mis annab võimaluse tõhusalt suurendada raudteesüsteemi läbilaskevõimet, liiklustihedust ja veosekäivet. Teiseks on suuremates elektrijaamades toodetava ja elektrivõrgust ostetava elektrienergia omahind mitu korda väiksem, kui autonoomse diiselleduri jõuagregaatides energia tootmise maksumus. Lisaks sellele, elektrimasinad erinevalt sissepõlemismootoritest sisaldavad vähem hõõrduvaid, tiirlevaid ja kõrgemal temperatuuril töötavaid detaile. Seega elektrivedurite käitamis- ja teeninduskuulud on madalamad võrreldes kuludega diiselledurite kasutamise puhul. Ainult elektrivedurite rakendamise korral võib teostada rekuperatiivpidurdamist, mis annab võimalus ühekorruga reguleerida rööbastranspordi kiirust, säästa elektrienergiat ja pikendada vagunite veermikute eluiga. Lihtsamalt öeldes elektrimasinad omavad kõrgema kasuteguri, kui teised mootorid. Elektrivedurid ei tekita keskkonda saastavaid heitgaase, ja elektrirongide käitumisega ei kaasne selliste ohtlike ainete tekkimist, nagu heitõli ja ära kasutatud määrdeained. Elektrienergia on universaalne energia liik, sest seda saab toota nii tavapäraste soojuselektrijaamade kui ka kaasaegse "roheline energia" kaudu.

Eestis ja selle naaberriikides juurutakse edukalt elektrivedu rööbastranspordil ning töötatakse läbi projekte, mis on seotud kontakivõrgu ja veolajaamade ehitamise või elektriraudtee arendamisega. Näiteks, toimub Valgevenes avaliku raudteesüsteemi ulatuslik elektrifitseerimine: aastast 2016 korraldatakse elektrivedurite rongiliiklust veopingelistel raudteeliinidel Orsha—Minsk—Brest ja Molodechno—Minsk—Gomel, mis andis ligipääsu transiitvedude suurendamisele Venemaalt Poola ja Ukrainast Leedu suunal. Venemaal tehti lõpuni Nõukogude Liidu lagunemise tagajärjel pooleli jäänud mitu tähtsamat elektriraudtee arenguprojekte ja määrati uusi ehitusplatsi. Aastaks 2015 lõpetati Laadoga magistrali elektrifikatsiooni, pärast mida hakkas elektrivedu katkematu teenindama Venemaa peamisi transiitliine Kagu-Idast Luuga sadamani. 2016. aastal avati elektrirongide liiklust Moskva tsentraalsilmusvõrgus, kuhu ehitati 31 intermodaalset teiste transpordiliikidega ühendatud ümberistumisjaama. Toimuvad valmistustööd Baikali-Amuuri ja Moologa magistraalide ulatuslikuks elektrifikatsiooniks. Uuringud elektrifitseeritud rööbastranspordi valdkonnas Eesti jaoks on olulised ja kohapealsed seoses Euroopa laiemasse raudteetranspordisüsteemi integreeriva Rail Baltica projekti teostamisega.

Peale elektrivedu juurutamist lisanduvad raudteetaristul uued elemendid: kontaktvõrk, vealajaamad ja tagasivoolujuhid, mida on tarvis vajaliku täpsusega dimensioneerida ning korralikult projekteerida. Ühendades elektriraudteed põhivõrguga, tuleb lahti saada sellistest püsitalitluse probleemidest, nagu kõrgemate harmoonikute tekkimine veomuundurite ja teiste pooljuhttehnikaseadme funktsioneerimise ajal ning pingesümmeetria kolmefaasilises süsteemis ühefaasiliste üsna võimsate, muutuvate ja pidevas liikluses olevate tarbijate tõttu, mida kujundavad endast välja elektrirongid. Seoses Rail Baltica projekti aktuaalsusega ja Eesti elektrisüsteemi koormusmodelite täpsustamise vajadusega elektrisüsteemi talitluse planeerimiseks on oluline analüüsida elektriraudtee süsteemi koormuse olemust, määratada selle tüüpilist, minimaalset ja maksimaalset väärtusi nii püsitalitluse kui ka avariijärgneva režiimi korral. Käesolevas töös käsitletakse üldisemalt elektrifitseeritud rööbastranspordi (alalisvoolu avalikud elektriraudteed, mäendusetevõtete laiapööpmelise tööstuslik transport, metropoliten, trammisüsteem) kontaktvõrgusüsteemide koormusvoolu määratlemise algoritme ning vaadeldakse täpsemalt tõenäosuslikku meetodikat. Kontaktvõrgusüsteemi koormusvoolu meetodite alusel on võimalik edaspidistes uurimistöodes täpsustada elektriraudtee süsteemi liitumispunkti koormusmudeleid, optimeerida kontaktvõrgu süsteemi parameetreid ja laiendada tõenäosusliku meetodika kasutusala.

Antud lõputöö põhiosa sisaldab viit peatükke. Selle diplomitöö esimeses peatükis uuritakse maailmas kasutusel olevaid kontaktvõrgusüsteemide koormusvoolude määratlemise meetodeid ning nende viiside oletusi, lihtsustusi, eeldusi, puudusi ja rekomendeerivat kasutusala. Teises peatükis käsitletakse rongi dünaamikale mõjuvad jõusid ja nende jõudude suuruste määramise ettekirjutusi. Kolmandas peatükis esitatakse raudteesüsteemide liigitust koormusmudeli omaduste järgi, kirjeldatakse avaliku, tööstusliku ja linnalähedase raudteede veokoormuse iseärasusi ning määratakse neid raudteeliike toidavate vealajaamade koormuse olulisuse sõltuvusgraafikuid aastaajast, nädalapäevast ööpäeva osast ja teistest raudtee talitusparameetritest. Neljas peatükis põhjalikult uuritakse elektrifitseeritud transpordi kontaktvõrgu parameetrite dimesioneerimismeetmete rakendatavus tõeliselt eksisteeriva avaliku raudteelõigu veovõrgu parameetrite määratlemise näidel. Selle peatükki alguses teostatakse lähteandmete ettevalmistus veoarvutuste teostamiseks, nimelt: jaamavahe pikiprofiili alusel koostakse raudteetrassi kaldeid ja tõuseid kirjeldavat lavastiku maatriksit, otsitakse vaadeldavas raudteelõigus asuvate kõverate dimensionete üles, normatiivse liiklusgraafiku põhjal määratakse läbisõitvate rongide massi, pikkuste, sõidukiiruse väärtusi. Ettevalmistatud lähteandmetes tuginedes, teostatakse veojõudude aruvutusi, mille raames iga koorma jaoks rakendatakse rongiliikluse peamist võrrandit, lahendatakse pidurdusülesannet, arvestatakse peamist liiklustakistusjõudu ning samuti kõverate ja lavastikutega põhjustatud liiklustakistusjõudu.

Veoarvutuste tulemuste ja veotöö mahtu kehtestavate dokumentide alusel kujutakse voolutarbimisdiagramme ning eelnevalt valitakse kontaktvõrgujutme ristlõikepindalat. Koormate vooludiagrammide ja teiste raudtee talitlusnäitajate põhjal rakendatakse tõenäolisusi ja determenistlikke elektritranspordi kontaktvõrgusüsteemide koormusvoolu määratlemismetoodikaid, mille raames arvutatakse koormusvoolu efektiiv-, keskväärtusi ja samuti selle voolu suurust lubatud ülekoormusrežiimide korral. Suurt tähelepanu on pööratud tõenäolisusmeetodi kasutamisaspektidele. Peale erinevate arvutusmeetmete ärakasutamist saadud tulemusi võrreldi teoreetiliste suuruste ja piirangutega, mis avaldas kontaktvõrgutootja antud juhtmetüübi suhtes. Käesoleva peatükki lõpus antakse hinnang eraldi iga rakendatud veovõrgu parameetrite kasutuskõlblikusele ja kogu dimensioonierimisülesanne lahendamise edukuse tervikuna.

Antud lõputöö praktilise osa raames kasutati operaatorkäskusid Excel'i arutustabelites ja GeoGebra tarkvara. Tallinna Tehnikaülikooli tudeng oma Uni-ID kaudu võib saada kasutusele Office 365 tarkvarapaketti. Peale seda GeoGebra matemaatikapakett on tasuta ja vabalt kättesaadav Internetist.

Enne diplomitöö alustamist võib oletada, et kogutud lähteandmete mahust piisab vajaliku täpsusega püstitud kontaktvõrgu parameetrite dimensioneerimise jaoks. Käesoleva lõputöö autor eelnevalt väidab, et praktilise osa raames rakendatud veovõrgu arvutusmeetodid antud raudteesüsteemi jaoks saavad kasutuskõlblikuteks välja arvutatud hajutatud koormuste meetodi, mis ebaühtlase rongiliikluse korral tavaliselt annab allahinnatud tulemusi. Selle lõputöö koostaja peab võimalikuks hüpoteesi püstitamist sellest, et, teiste kontaktvõrgu parameetrite dimensioneerimismetoditega võrreldes, tõenäolisliku meetodi rakendamine kaasneb vähemate arvutusoperatsioonide teostamisega, kuigi nõuab jaotusfunktsioonide määramispiirkonna piirangute sisseviimist. Enne diplomitöö alustamist võib väita, et veotöö mahtu kehtestava ja raudteetaristu tehnilisi parameetreid kirjeldava tehnilise dokumentasiooni alusel on võimalik hinnata koormusvoolu suurust, eelnevalt valida kontaktjuhtme ristlõikepindalat ja seejärel kontrollida selle dimensioonierimise korralikust täpsemate stohastiliste ja determenislikkude meetmete põhjal.



# 1. KOORMUSVOOLU DIMENSIOMEERIMISMEETMETE ÜLEVAADE

Rööbastranspordi elektrivarustussüsteemi ja elektrivõrgu dimensioneerimise arvutusülesandeid võib põhimõtteliselt teostada erinevate viisidega. Eksisteerivaid arvutusmeetmeid saab jaguneda kaheks kategooriaks: meetoditeks konkreetse teostatud või plaanitud vedude sõidugraafiku põhjal või meetoditeks keskmise veotöö alusel. Seda kujundab liiklussagedus, mis väljendatakse ühe tüübi rongide koguse mingi ajaperioodi jooksul või vaheintervallina kahe ühesuguste rongide vahel. Arvutusmeetodid sõidugraafiku alusel rohkem sobivad arvutustöödele avalikkudel raudteedel, metropolitenidel ja linnalähedastel elektriraudteel, sest nendel raudteetranspordi liikidel sõiduplaanist hoitakse kinni piisavalt edukalt. Paljude liiklushäirete tõttu maapealse linnarööbastranspordi teostatud vedude graafikud võivad oluliselt erineda kavatsatud sõiduplaanidest, seega selle rööbastranspordi liigi korral on mugavam kasutada arvutusviise keskmiseveotöö alusel. [6], [4]

## 1.1 Ühtlaselt hajutatud koormuse meetod

**Ühtlaselt hajutatud koormuse meetod** koosneb sellest, et tegelik rööbastranspordiga tekitavat tegelikku punktkoormust asendatakse uuritava kontaktvõrgu lõigus ühtlaselt hajutatud koormusega. Sellisel juhul ühtlaselt jagunenud koormuse (nn pikkerikoormuse) suurus valitakse niimoodi, et koormus fiidritsoonis oleks võrdne tegeliku koormusega. Pikkerikoormus saab arvutada rongiga tarbitava voolu keskmise väärtuse, keskmise kooremate arvu liinis või keskmise rongide elektrienergia kaudu. Viimase suuruse alusel pikkerivoolu väärtuse kontaktvõrgus arvutusliku ajaperioodi jooksul saab määrata valemiga:

$$j = \frac{A}{U \cdot T \cdot L}, \quad (1)$$

kus  $j$  – pikkerivoolu väärtus kontaktvõrgus, A/km,

$U$  – veovõrgu nimipinge, V,

$T$  – arvutusliku ajaperioodi kestus, h,

$L$  – fiidritsooni pikkus, km,

$A$  – elektrienergia kulu antud fiidritsoonis arvutusliku ajaperioodi jooksul, kWt.

Ühe toidefiidri keskmine koormusvool kahe-suunalise toide korral võib üles leida valemiga:

$$I_F = \frac{j \cdot L}{2}, \quad (2)$$

kus  $I_F$  – ühe toidefiidri keskmine koormusvool, A,

$L$  – fiidritsooni pikkus, km,

$J$  – pikkerivoolu väärtus kontaktvõrgus, A/km.

Suureim pingekadu fiidertsooni keskpunktis kahe-suunalise toidesüsteemi korral võib määrata valemiga:

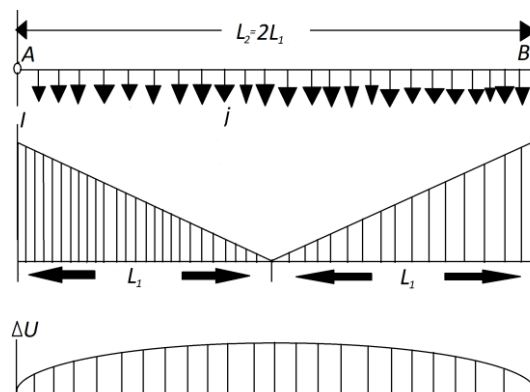
$$\Delta U_{max} = \frac{j \cdot R_0 \cdot L^2}{8}, \quad (3)$$

kus  $\Delta U_{max}$  – suureim pingekadu fiidertsooni keskpunktis, V,  
 $R_0$  – kontaktvõrgu pikkeritakistus ühe kilomeetri kohta,  $\Omega/\text{km}$ ,  
 $L$  – fiidritsooni pikkus, km,  
 $J$  – pikkerivoolu väärtus kontaktvõrgus, A/km.

Kahe-suunalise toidesüsteemi korral võimsuskaod rongi fiidritsooni keskpunktis asumise hetkel koosnevad kahedest võrdsetest komponentidest, seega maskimaalsed võimsuskaod arvutatakse järgmise valemi kaudu:

$$\Delta P = \frac{j^2 \cdot R_0 \cdot L^3}{12}, \quad (4)$$

kus  $\Delta P$  – maskimaalsed võimsuskaod fiidritsoonis, kW,  
 $R_0$  – kontaktvõrgu pikkeritakistus ühe kilomeetri kohta,  $\Omega/\text{km}$ ,  
 $L$  – fiidritsooni pikkus, km,  
 $J$  – pikkerivoolu väärtus kontaktvõrgus, A/km.



Joonis 1.1 Koormusvoolu ja pingekadu ühtlaselt hajutatud koormuste arvutusmeetodi korral [4].

Antud meetod ei arvesta rongide arvu muutmist. Sellele lisaks, koondkoormusi vahetatakse hajutatud koormustega, seega meetod ei võimalda määrata maksimaalseid ja minimaalseid hetksuursusi. Homogeense hajutatud koormuse viis peaaegu alati annab allahindatud tulemusi. Sageda rongide peatuste korral (nt trammisüsteem, metropoliten või linnalähedane elektrirong) saadud arvutatavate suuruste keskmised väärtused oluliselt erinevad tegelikkudest suurudest. Seetõttu pakutud metodoloogia rakendatakse ainult nende arvutusülesannete korral, kus ei ole vaja suurt arvutustäpsust. [4]

## 1.2 Graafiku lõigete meetod

**Graafiku lõigete meetodi** põhimõtte järgi määratakse kindlal ajahetkel rongide asukohad vaadeldaval raudteelõigul ja nendega tarvitataavaid voole, mis sõltuvad elektriveduri sõidurežiimist (pidurdamine või kiirendus, veomootorite ühendusskeem). Peale seda saadakse elektrivõrgu hetkahel, kus koormuste paiknemiskohad ja väärtused vastavad antud ajahetkele. Iga hetkskeemi korral arvutatakse selle parameetreid, nimelt: koormust toitvas liinis, pingelangu fiidertsooni lõpul, võimuskadusid ja teisi vajalikke suurusid. Pingekadu antud rongi pantograafil vaadeldakse tavaliselt teiste rongide suhtes. Hetkskeemi põhjal arvutatud parameetrid iseloomustavad raudtee sisenemise elektrivarustussüsteemi kindlal ajahetkel. Kasutades paljude hetkahelate arvutustulemusi, võib kirjeldada uuritavate suuruste sõltuvust ajast. Vajalikud lähteandmed selle meetodiga arvutuste teostamise jaoks on rongide sõidugraafik vaadeldavas raudteelõigus, elektriveduritega tarbitavate voolude diagrammid ja kontaktvõrgu dimensioonid. [4]

Kuna on võimatu vaadelda lõpmatu palju hetkskeeme ja katta iga elektriraudtee talitlushetke, võetakse ainult niipalju hetkahelaid, et tagada vajalikku arvutustulemust. Sõltuvalt tehnilist ülesandest rongide sõidugraafiku lõiget tehakse kas võrdsete ajaintervallide vahel (nn ühtlase lõigete meetod) või sõidugraafiku kindlates kohtades (nn iseärase lõigete meetod). Graafiku lõigete meetod on kõige paremini kasutatav siis, kui on täidetud järgmised eelised: liiklustihedus, vaheajad kahe pärisuunaliste rongide vahel ja peatuste ajad arvutusliku ajaperioodi jooksul jäävad samaks (st sõidugraafik on ühtlane), koormate vooludiagrammid on võrdsed, kui raudteelõigus on kaks peateed, siis mõlemate teede kontaktvõrk ja rööbasahelad on ühendatud rööbiti ning mõlematel teedel on samasugune ühedusskeem, uitvoolud, tagasivoolu- ja toiteliinide ning veoalajaamade väliskarakteristikud ei ole vaja arvestada. [31]

Paraku tõelistes rööbastranspordisüsteemides need tingimused peaaegu pole täidetud, mis piirab selle meetodi kasutusala. Vaatamata graafiku lõigete meetodi lihtsustusele, tuleb maksimaalse ja minimaalse suuruste arvutustäpsuse suurendamiseks oluliselt laiendada vaadeldava hetkskeemide hulka, mis märgatavalt suurendab arvutustöö hulka. [4]

## 1.3 Üldistatud analüütiline meetod

**Üldistatud analüütiline meetod** piisavalt täielikult kirjeldab raudteetranspordi elektrivarustussüsteem talitluse iseärasusi: koormuste väärtuste ja asukohtade pidev muutmine ning samuti vaadeldaval jaamavahel üheaegselt asuvate rongide arvu varieerumine. Selle kontaktvõrgu dimensioneerimise metodika valemid peamiselt tugineb tõenäosusteooria reeglitele, sest veokoormuste väärtused ja paiknemiskohad olulisel määral omavad juhuslikku iseloomu.

Üldistatud analüütiline meetodika raames on tehtud järgmisi oletusi: igal ajahetkel kogu arvutusliku ajaperioodi jooksul vaadeldaval raudteelõigul üheaegselt asuvate rongide arv ei muutu, koormad võivad paikneda uuritaval jaamavahel ükskõik kus (st kõik nende paiknemised üksteise suhtes omavad sama tõenäosust), teiste uuritaval jaamavahel liikuvate rongide elektritarbimisest sõltumatult iga elektrivedur saab tarvitama suvalise voolu, mille väärtus on piiratud vaid antud koorma tehniliste omadustega.

Selle meetodiga kaudu arvutuste läbiviimiseks on tarvis teada keskmise veetöö mahtu uuritaval raudteelõigul, kontaktvõrgu parameetreid ja keskmiselt tarbitava voolu väärtust arvutusliku ajaperioodi jooksul. Keskmise veetöö maht võib määrata ajaintervalliga kahede samasuunaliste rongide vahel või liiklusagedusega. Selle meetodi raames iga koorma iseloomustavad efektiivne koormusvool, keskmine koormusvool, sõiduaeg, rongi tühijoosku- ja veorežiimide suhe, keskmise ja efektiivse vooluväärtuste suhe, kuubkeskmise ja keskmise vooluväärtuste suhe. [6], [4]

Ristküliku elementides koosneva vooludiagrammi alusel keskmise voolu väärtust saab ligikaudselt arvutada järgmise valemi kaudu:

$$I_K = \frac{\sum_0^m (i_n \cdot t_n)}{T}, \quad (5)$$

kus  $i_n$  – voolu väärtus nivoodiagrammi antud elemendis (ristküliku elemendi kõrgus), A,  
 $t_n$  – antud voolu väärtusega nivoo kestus vooludiagrammis (ristkülikelemendi pikkus), min,  
 $T$  – koorma sõiduaeg vaadetaval jaamavahel, min.

Ristküliku elementides koosneva vooludiagrammi alusel voolu efektiivväärtust saab ligikaudselt arvutada järgmise valemi kaudu:

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \sum_1^m (i_n^2 \cdot t_n)}, \quad (6)$$

kus  $i_n$  – voolu väärtus nivoodiagrammi antud elemendis (ristküliku elemendi kõrgus), A,  
 $t_n$  – antud voolu väärtusega nivoo kestus vooludiagrammis (ristkülikelemendi pikkus), min,  
 $T$  – koorma sõiduaeg vaadetaval jaamavahel, min.

Ristküliku elementides koosneva vooludiagrammi alusel voolu kuubkeskmist väärtust saab ligikaudselt arvutada järgmise valemi kaudu:

$$I_{kub} = \sqrt[3]{\frac{1}{T} \cdot \sum_1^m (i_n^3 \cdot t_n)}, \quad (7)$$

kus  $i_n$  – voolu väärtus nivoodiagrammi antud elemendis (ristküliku elemendi kõrgus), A,  
 $t_n$  – antud voolu väärtusega nivoo kestus vooludiagrammis (ristkülikelemendi pikkus), min,  
 $T$  – koorma sõiduaeg vaadetaval jaamavahel, min.

Rongi sõiduaaja ja elektrienergia tarbimisaja suhet arvutatakse järgmiselt:

$$\alpha = \frac{T_s}{T_t}, \quad (8)$$

kus  $T_s$  – koorma sõiduaeg, min

$T_n$  – koorma energiatarbimisaeg, min.

Koorma efektiiv- ja keskvoolude suhe arvutatakse järgmise valemi kaudu:

$$K_E = \frac{I_{ef}}{I_K}, \quad (9)$$

kus  $I_{ef}$  – voolu efektiivne väärtus, A,

$I_K$  – voolu keskvaartus, A.

Koorma kuubkeskmise ja keskmise voolude suhe arvutatakse järgmiselt:

$$K_3 = \frac{I_{kub}}{I_K}, \quad (10)$$

kus  $I_{kub}$  – voolu kuubkeskmise väärtus, A,

$I_K$  – voolu keskvaartus, A.

Toidefiidri efektiivvool määratakse järgmise valemi kaudu:

$$I_{F,ef} = \sqrt{\left(\frac{1}{2} \cdot \sum_1^n (i_j \cdot n_j)\right)^2 + \frac{1}{4} \left(\sum_1^n (i_j^2 \cdot n_j) \cdot (1.33 \cdot K_E^2 - 1)\right)}, \quad (11)$$

Kus  $I_{F,ef}$  – toidefiidri efektiivvool, A,

$i_j$  – q-tüübi rongi keskmine voolu väärtus, A,

$n_j$  – q-tüübi rongi kogus vaadeldava ajaperioodi jooksul, tk.

Keskmine pingekadu q-tüübi rongi pantograafini leitakse järgmiselt:

$$\Delta U = \frac{R_0 \cdot L}{12} \left[ \sum_1^n (i_q \cdot n_q) + i_v (2 \cdot \alpha_v - 1) \right] \quad (12)$$

kus  $\Delta U$  – keskmine pingekadu q-tüübi rongi pantograafini, V,

$R_0$  – kontaktvõrgu pikkeritakistus ühe kilomeetri kohta,  $\Omega/\text{km}$ ,

$L$  – fiidritsooni pikkus, km,

$i_v$  – üheaegselt q-tüübi rongiga fiidritsoonis teiste asuvate rongide keskvol, A,

$\alpha_v$  – üheaegselt q-tüübi rongiga fiidritsoonis asuvate rongide elektrienergia tarbimistegur,

Keskmine võimsuskadu veovõrgus üldistatud analüütilise meetodi raames määratakse allatoodud valemi kaudu:

$$\Delta P = \frac{R_0 \cdot L}{12} \left[ \sum_1^n (i_q \cdot n_q) \right]^2 + \sum_1^n (i_q^2 \cdot n_q) \cdot (2 \cdot K_E^2 - 1), \quad (13)$$

kus  $\Delta P$  – keskmine võimsuskadu q-tüübi rongi pantograafini,

$R_0$  – kontaktvõrgu pikkeritakistus ühe kilomeetri kohta,  $\Omega/\text{km}$

$L$  – fiidritsooni pikkus, km

$i_v$  – üheaegselt q-tüübi rongiga fiidritsoonis teiste asuvate rongide keskvol, A

$\alpha_v$  – üheaegselt q-tüübi rongiga fiidritsoonis asuvate rongide elektrienergia tarbimistegur

Üldistatud analüütilise meetodi raames on tarvis taandada q-tüübi rongi liiklustihedust ühele tunnile allatoodud avaldise kaudu:

$$n = \frac{N \cdot L}{24 \cdot v}, \quad (14)$$

kus  $N$  – q-tüübi koorma rongipaari arv ööpäeva kohta, rongipaar/päev,

$L$  – fiidritsooni pikkus, km,

$v$  – rongi tehniline sõidukiirus vaadeldavas raudteelõigul, km/h.

## 1.4 Tõenäolisuslik meetod

**Tõenäolisuslik meetodiga** võib peaaegu ammendavalt kirjeldada rööbastranspordi elektrivarustussüsteemi talitluse omadusi (koormuste suuruste ja asukohtade pidev muutmine, rongide sõidugraafiku operatiivne muutmine raudteetaristu hooldustööde või rikete tõttu). Katseliselt või teoreetiliste arvutuste põhjal koostatakse statistilist andmemahutu, mille järgi leiakse üles sellised juhuslikku suurust iseloomustavaid karakteristikke, nagu aritmeetiline keskmine, dispersioon, ruutkeskmine hälve, statistiline moment. Nende suuruste kaudu otsitakse, millele jaotusseadusele koormusvoolu juhuslik suurus kõige paremini vastab. [10]

Tõenäosusliku analüüsi tulemuste põhjal valitakse välja sobiv uuritaval raudteelõigul koormusvoolu juhuslikku suurust kirjeldav matemaatiline representatsioon. Enamikkell juhtudel koormusvoolu juhuslik suurus piisava täpsusega allub normaaljaotus seadusele, mis annab võimalus lihtsalt määrata koormusvoolu maksimaalseid ja minimaalseid suurusi, kasutades Kolme sigma reeglit. [4] Tõenäolisusteoorias rajanevad arvutusmeetodid käsitlevad koormusvoolu, pinge- ja võimsuskadude väärtusi ning teisi rööbastranspordi talitusparameetreid juhuslikkude suurustena, mida võib liigitada pidevateks, diskreetseks ja olekute muutujateks. Pidevad juhuslikud suurused katavad mingi arvude vahemikku (nt koormusvoolu suurus), diskreetsed suurused saavad vaid eraldisteks arvustuslikuteks (nt rakendatud veokontrolleri positsiooni number), olekuparameetreid võib omistada ainult loogiliste või lingvistiliste definitsioonitega (nt sisselülitatud, väljalülitatud).

Juhusliku suuruse hajuvust ja teisi omadusi kirjeldavad kõike tähtsamad suurused on aritmeetiline keskmine, dispersioon, standartne hälve. Aritmeetiline keskmine on kogu katsete mõõtetulemuste väärtuste ja katsede arvude jagatis. Dispersiooni saab üles leida, jagades kõigete mõõtetulemuste väärtuste aritmeetilist keskmist hälvete ruudude summat ja katsede arvudega. Ruutkeskmiseks hälveks peetakse ruutjuurt dispersiooniks. Mingi juhusliku suuruse tõenäolisusena nimetatakse selle sündmuse ilmumisega kaasnevate sündmuste ja kõigete võimalikkude sündmuste suhet.

[7], [8]. Elektriraudtee veokoormuste tõenäolisusliku analüüsi raames on tarvis valida sobivat matemaatilist representatsioonit koormumudeli omaduste kirjeldamiseks. Koormusvoolu, pinge- ja

võimsus kadude pidevaid statistilisi ridasid jagatakse ühtlasteks intervallideks, mille kogust võrdlustatakse ruutjuuruga arvutusliku perioodi jooksul läbisõitvate rongide arvust. [4]

Näiteks, koormusvoolu statistilises jadas ühe intervalli pikkust saab hinnata järgmiselt:

$$I_Q = \frac{I_{MAX} - I_{MIN}}{\sqrt{n}}, \quad (15)$$

kus  $I_{MAX}$ ,  $I_{MIN}$  – arvutisimulatsiooni või veojõudue arvutuste raames saadud vastavalt maksimaalne ja minimaalne koormusvoolu väärtused, A,

$n$  – arvutusliku perioodi jooksul läbisõidud rongide arv, tk.

Koormusvoolu vaadeldavasse intervallisse sattumistõenäolisus on võrdne järgmise avaldisega:

$$p_Q = \frac{t(I \in int)}{T}, \quad (16)$$

kus  $T$  – arvutusliku perioodi kestus, min.

Iga käsitlevases intervallides asuva esindaja väärtuse võrdlustatakse selle intervalli keskesindaja suurusega:

$$I_{Q/2} = I_{ül} - \left(\frac{I_{ül} - I_{al}}{2}\right) = I_{al} + \left(\frac{I_{ül} - I_{al}}{2}\right), \quad (17)$$

kus  $I_{ül}$ ,  $I_{al}$  – intervalli vastavalt ülemine ja alumine piirid, A.

Koormusvoolu väärtuse statistilist keskmist ja teist algmomenti arvutatakse järgmiselt:

$$m_X^* = \sum_1^{\sqrt{n}} (I_{Q/2} \cdot p_Q), \quad (18)$$

$$a_2^* = \sum_1^{\sqrt{n}} ((I_{Q/2})^2 \cdot p_Q), \quad (19)$$

kus  $m_X^*$  – koormusvoolu väärtuse statistiline keskmine, A,

$a_2^*$  – koormusvoolu väärtuse teine algmoment, A<sup>2</sup>,

$I_{Q/2}$  – koormusvoolu intervalli keskesindaja suurus, A,

$p_Q$  – koormusvoolu sattus vaadeldavasse vahemikuisse sattumistõenäolisus,

$n$  – arvutusliku perioodi jooksul läbisõidud rongide arv, tk.

Koormusvoolu dispersioon määratakse järgmise avaldise kaudu:

$$D_X^* = a_2^* - (m_X^*)^2, \quad (20)$$

kus  $D_X^*$  – koormusvoolu väärtuse dispersioon, A<sup>2</sup>

$m_X^*$  – koormusvoolu väärtuse statistiline keskmine, A

$a_2^*$  – koormusvoolu väärtuse teine algmoment, A<sup>2</sup>

Koormusvoolu juhusliku suuruse kirjeldav jaotusseadus peab rahuldama järgmisi tingimusi:

$$m = m_X^*; \quad \sigma = \sqrt{D_X^*} \quad (21)-(22)$$

Koormusvoolu juhusliku suuruse matemaatiline representatsioon:

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{D_X^* \cdot 2\pi}} e^{-\frac{(x-m)^2}{2 \cdot D_X^*}}, \quad (23)$$

## 2. RONGI LIIKLUSDÜNAAMIKALE MÕJUVATE JÕUDUDE ÜLEVAADE

Koorema liiklusedünaamikale mõjuvaid jõusid võib põhimõtteliselt liigida peamiseks liiklustakistusjõuks, lisaks liiklustakistusjõuks, pidurdusjõuks ja veojõuks. Peamine liiklustakistusjõud esineb rongi kogu sõiduaja kestel. Lisa liiklustakistusjõud tekib ainult mingi tingimuste korral (näiteks, kõverate või tõusete läbimisel). Pidurdusjõud avaldub oma mõju peale koorema pneumaatilise, regeneratiivse või elektrodünaamilise pidurduse rakendumist. Veojõudu kujundab elektriveduri mootoritega edastav pöördemoment. Veojõudude arvutusülesannete lahendamise raames on mugavam käsitleda koorema liiklusedünaamikale mõjuvaid jõusid taandatuna iseliikva veeremi, koorema või kogu rongi massi ühele tonnile, seega kasutatakse paariveotakistusjõudu, lisaeriveotakistusjõudu, eripidurdusjõudu ning eriveojõudu. [9], [10]

### 2.1 Peamine liiklustakistusjõud

Peamist liiklustakistusjõudu põhjustab veerehõõrdumine, vaguni või veeremi automaathaagi ja liikuvate osade ning raudteetaristu ebatäiuslikkus. Selle takistusjõudu olulisust kujundavad hõõrdumine ja hürdodünaamiline takistus vagunite ratastesse paigaldatud rullaagrite kaelates, energia hajumine rööbastee pealisehituses ja veeremi kandevedrutes, rööpaste ja ratade mikroebatasasused, liiug- ja veerehõõrdejõud ratade mööda rööbastee liikumise korral ning teised faktorid. Peamise liiklustakistusjõu suurust sõltub rongi kiirusest, vaguni kandeveõimest ja koormatusest, rattasteljede arvust, rööbastee seisukohast ja teistest tehnilistest parameetritest. Kuna vagunite ja vedurite mehhanismide projekteerimisstaadiumis on võimatu arvestama oluliseid liiklustakistusjõudu kujundavaid mõjureid peamise eriveotakistusjõu väärtuse määramine teostatakse empiiriliste valemite kaudu, mida koostakse katsesõidude tulemuste põhjal peale uue vaguni või veduri valmistamist. Peamise liiklustakistus võib hinnata järgmise valemi kaudu:

$$W = m \cdot (c_1 + c_2 \cdot v), \quad (24)$$

kus  $W$  – rongi peamine liiklustakistus, N

$m$  – veeremi mass, kg

$v$  – rongi sõidukiirus, km/h

$c_1$  – veeremi tehnilisi parameetreid iseloomustav konstant, N/kg

$c_2$  – veeremi tehnilisi parameetreid iseloomustav tegur,  $s^{-1}$

Tüüpilised  $c_1$  teguri väärtused satuvad vahemikku 0.01-0.02 N/kg, enamikkudel juhtudel  $c_2$  väärtused kõikub vahemikus 0.00015-0.0003  $s^{-1}$ . [1], [10]



Veojõudude arvutusülesannete lahenduseeskirja põhjal peamise eritakistusjõudu väärtuse määramine 1520 mm rööpmelaiuse raudteetranspodri kohta teostatakse järgmiste valemitega:

$$w' = c_1 + \frac{c_2 + c_3 \cdot v + c_4 \cdot v^2}{q}, \quad (25)$$

$$w'' = c_1 + c_2 \cdot v + c_3 \cdot v^2 \quad (26)$$

kus  $w'$ ,  $w''$  – rongi peamine liiklustakistus, kgj/t

$q$  – veeremi erikoormus ühe telje kohta, t/telg

$v$  – rongi sõidukiirus, km/h

$c_1, c_2, c_3, c_4$  – veeremi tehnilisi parameetreid iseloomustavad konstant

Erinevatele veeremile vastavad  $c_1$ - $c_4$  tegurite väärtused on ülesleitavad Veojõudude arvutusülesannete lahenduseeskirjades ja käesoleva töö lisas 1. [1], [10]

## 2.2 Lisa liiklustakistusjõud

Lisa liiklustakistusjõud avaldub oma mõju ainult mingi tehniliste faktorite kokkulangevuse korral. Veojõudude dimensioneerimisülesanne lahendamise raames uuritakse eraldi lisatakistusjõusid, mis on põhjustatud kõverate ja tõusute läbimise, ebasoodsade ilmastiku tingimuse (tugev tuul ja madal õhutemperatuur), vagunisse paigaldatud generaatorite rihmülekannete, õhukeskonna hõõrdumise ja teiste faktoritega. [10], [9]

### 2.2.1 Lisa liiklustakistus kõveratest

Rongiliikluse mehaanilise stabiilsuse tagamise jaoks raudtee kõverates lõikudes välimist rööbast tõstetakse mingi millimeetri üles, võrreldes sisenemise rööbaga, seega vaguni ekipaažiosa kaldub, ja tekib sisenemisi rataseid rööbale pigistav lisajõud. Peale seda veeremi välimised rattad läbivad raudtee pööretes suuremat distantsi kui sisenemised rattad, seega liiguvad veeremi välimised rattad libistamisega, mis kujundab lisahõõrdejõudu. Raudtee kõveratega põhjustatud liiklustakistusjõud sõltub pööre ja rongi pikkusest, välimise rööba tõusest, raudtee rööpmelaiusest, vaguni ekipaažiosa konstruktsioonist, välimise ja sisenemiste rööpaste teljete läbijooksust ja teistest parameetritest. [10], [1]

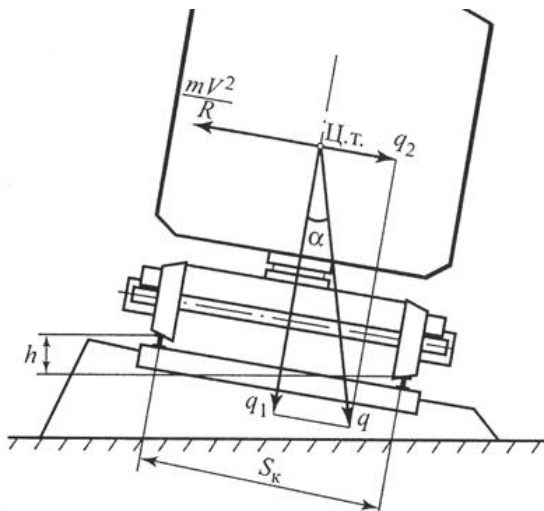
Kuna raudteetrassi projekteerimisstaadiumis ja raudtee ehitusfaasis on võimatu arvestama oluliseid kõveratega põhjustatud takistusjõudu kujundavaid faktoreid peamise eriveotakistusjõu väärtuse määramine toimub empiiriliste valemite kaudu, mida koostakse peale katsesõitude tulemuste läbitöötlemist.

Lisaliiklustakistusjõu raudteetrassi pööretes, mille raadius ületab 150 meetrit, võib hinnata järgmise valemi kaudu:

$$w_c = \frac{6.5}{R-55}, \quad (27)$$

kus  $w_c$  – rongi lisa eriliiklustakistus kõveras, kgj/t

$R$  – kõvera raadius, m [1]



Joonis 2.1 Kõveras sõitvale rongile mõjuvate jõudude vektorikujutised:  $h$  – välimise rööba tõus,  $S_k$  – välimise ja sisenemiste rööpate teljete läbijooks, Ц.т. – veeremi massikese,  $mV^2/r$  – kesktõukekiirendus,  $q_2$  – kesktõukekiirendust kompenseeriva raksujõudu horisontaalne komponent [10].

Juhul, kui koorema ulatus röötsuunas on suurem kui kõvera pikkus, siis pööre läbimise kestel rong üheagselt asub nii kõveras kui ka sirges raudteelõikudes. Selles olukorras veojõudude arvutusülesannete lahenduseeskirja raames soovitakse rakendada järgmist valemit:

$$w_c = \frac{700}{R} \cdot \frac{s_{kv}}{l_r}, \quad (28)$$

kus  $R$  – kõvera raadius, m

$s_{kv}$  – kõvera pikkus, m

$l_r$  – koorema pikkus, m

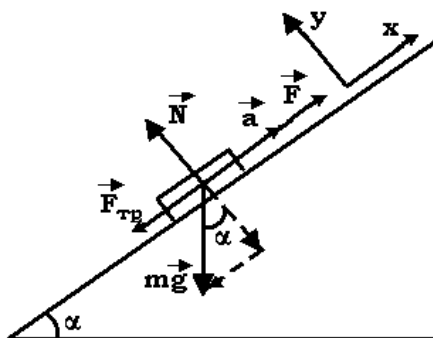
Juhul, kui koorema pikkust ei ületa kõvera pikkust, siis pööre läbimise kestel rong mingi sõiduaja jooksul asub ainult kõveras raudteelõigul. Selles olukorras veojõudude arvutusülesannete lahenduseeskirja raames soovitakse kasutada järgmist valemit:

$$w_c = \frac{700}{R}, \quad (29)$$

kus  $R$  – kõvera raadius, m [10], [9]

## 2.2.2 Lisa liiklustakistus tõustest ja kaldest

Kui raudteetrassil leiduvad tõused ja kalded, on vaja arvestada rongiliiklust takistava jõu lisakomponenti, sest sellistes raudteelõikudes tugireaktsioon täielikult ei kompenseeri raskusjõudu.



Joonis 2.2 Tõustes sõitvale rongile mõjuvate jõudude vektorikujutised [18].

Rongi liikludünaamikale mõjuvate tugireaktsiooni ja raskusjõu vektorite ühele teljele projekteerimise ja vektoritega tehete teostamise kaudu saab tõestada, et tõuste ja kaldega põhjustatud eriveotakistuse väärtus arvuliselt võrdub kalde elemendi suurusega selles tingimustes, et arvutuste raames koorema mass on esitatud tonnides, kalde suurus on antud promillides (rööbastee suhteline tõus raudtee 1 kilomeetri kohta), lisaeriveotakistust mõõdetakse kilogrammjõudes rongi massi ühe tonni kohta.

$$w_i = \frac{W_i}{mg} = \frac{\tan(\alpha) \cdot N}{mg} = \frac{\tan(\alpha) \cdot 1000 \cdot mg}{mg} = \frac{i}{1000} \cdot 1000 \cdot mg = \frac{i}{1000} \cdot 1000 \cdot mg = i \quad (30)$$

kus  $w_i$  – lisaeritakistusjõud tõustest ja kaldest, kgj/t

$i$  – kalde suurus, m

$\alpha$  – kalde tõusu nurk, °

$N$  – tugireaktsioon, kN

$g$  – vaba langemise kiirus, m/s<sup>2</sup>

Tõusete lisatakistusjõu käsitlemise korral seda väärtust võetakse positiivse märgiga, aga kaldede lisatakistusjõu arvutamisel seda väärtust võetakse negatiivse märgiga. [10], [1]

## 2.2.3 Teised tähtsad lisa liiklustakistusjõudu komponendid

Vagunitesse paigaldatud generaatorid, mis toidavad saloonvalgustust reisivagunites, soojuskandja tsirkulatsiooni tagavaid pumbasid külmkappvagunites ja teisi tarbijaid, töötavad rongi kineetilise energia abil. Neid generaatoreid tavaliselt ühendatakse vaguni rattadega rihmülekanne kaudu.

Vagunitesse paigaldatud generaatoritega põhjustatav lisa eritakistusjõudu komponendi suurus sõltub erikoormusest ühe veeremi telje kohta, rongi omatarbe võimsusest, koorma sõidukiirusest. Lisa eritakistusjõu generaatorajamitest võib arvutada valemiga:

$$W_{vg} = \frac{136 \cdot P'}{q \cdot v}, \quad (31)$$

kus  $w_{vg}$  – eritakistusjõudu generaatorajamitest, kgj/t

$P'$  – rongi omatarbe erivõimsus ühe vaguni kohta, kW/vagun

$q$  – veeremi erikoormus ühe telje kohta, t/telg

$v$  – koorema sõidukiirus, km/h

Veeremitesse paigaldatud generaatoritega koormate osakaalu ja rongi omatarbe erivõimsus ühe vaguni kohta peamiselt määrab raudteesüsteemi rongiformeerimiskava.

Lisa eritakistusjõudu liikumist alustamise korral arvestatakse kaubarongi väljumise korral peale peatust, mille kestus ületab 20 minutit, kiiruste vahemikus 0-10 km/h. See eriliiklustakistuse komponendi, mis peamiselt sõltub keskmist erikoormusest ühe telje kohta, arvutatakse järgmise valemiga:

$$W_{vp} = \frac{28}{q+7}, \quad (32)$$

kus  $w_{vp}$  – lisa eritakistusjõudu liikumist alustamise korra, kgj/t

$q$  – veeremi erikoormus ühe telje kohta, t/telg

Ebasoodsade ilmastiku tingimusega põhjustatud liiklustakistusjõudu mõjule pöörakse tähelepanu sellistes olukordades, kui õhutemperatuur langeb väärtuseni  $-25\text{ C}^\circ$  ja kui tuule kiirus ületab 12 m/s. Antud liiklustakistusjõudu komponendi määramine toimub nomogrammide kaudu, mis on esitatud veojõudude arvutusülesanne lahenduseeskirjas. [9], [10]

## 2.3 Pidurdusjõud

Rongi pidurdusjõuduks peetakse kõige vagunite piduriklotside tegeliku pigistusjõudude ratale ja tegeliku piduriklotside hõõrdetegurite korrutiste summat või kogu koorema arvutusliku piduriklotside pigistusjõudude summa ja taandatud piduriklotside hõõrdeteguri korrutist:

$$B = 1000 \sum (K \cdot \varphi_K), \quad (33)$$

kus  $B$  – rongi pidurdusjõud, kgj

$K$  – ühe vaguni piduriklotsi tegelik pigistusjõud ratale, tj

$\varphi_K$  – ühe vaguni piduriklotsi hõõrdetegur

$$B = 1000 \varphi_{Kp} \sum K_p, \quad (34)$$

kus  $B$  – rongi pidurdusjõud, kgj

$K_p$  – ühe vaguni piduriklotsi arvutuslik pigistusjõud ratale, tj

$\varphi_{Kp}$  – ühe vaguni piduriklotsi taandatud hõõrdetegur

Selleks, et vältida piduriklotside pigistusjõudu ja hõõrdeteguri kahemuutujate funktsionaalsõltuvuse rongi sõidukiirusest, koorema pidurjõudude arvutusvalemites kasutatakse piduriklotsi arvutuslikku väärtust samal ajal, kui piduriklotsi hõõrdetegurit taandakse rongi kiirusele järgmiste valemite kaudu:

$$\varphi_{Kp} = 0,27 \cdot \frac{v + 100}{5 \cdot v + 100}, \quad (35)$$

$$\varphi_{Kp} = 0,36 \cdot \frac{v + 150}{2 \cdot v + 150}, \quad (36)$$

kus  $\varphi_{Kp}$  – ühe vaguni piduriklotsi taandatud hõõrdetegur

$v$  – rongi sõidukiirus, km/h

Valemit 34 rakendatakse malmipidurdusklotsidega varustatud vagunitega kohta, aga valemit 35 on tarvis kasutada komposiitpidurdusklotsidega varustatud veeremi puhul. Erinevatest materjalidest tehtud pidurdusklotsidega vagunide ühe rongi koosseisus esinemise korral kogu koorema pidurdusklotside resulteerivat hõõrdetegurit käsitletakse veeremi massi järgi kaalutud keskmiseks suuruseks. Kuni 20 plomille kaldetes sõitvate kaubarongi veduri pneumaatiliste pidurite mõju võib mitte arvestada, muidu tuleb arvesse võtta veduri pidurdusjõudu. Samuti tuleb arvestada veduri pneumaatiliste pidurite mõju juhul, kui iseliikuv veerem sõidav reservina ilma vagunideta. Normatiivsed pidurdusklotside pigistusjõudud on esitatud veojõudude arvutusülesannete lahenduseeskirjas. [10], [11]

Koorema arvutuslikuks pidurdusteguriks peetakse kogu rongi pidurdusklotside pigistusjõudude summa ja rongi massi suhe:

$$\rho = \frac{\sum K_p}{Q + P_r}, \quad (37)$$

kus  $\rho$  – rongi arvutuslik pidurdustegur, tj/t

$K_p$  – ühe vaguni piduriklotsi arvutuslik pigistusjõud ratale, tj

$Q$  – koorema mass, t

$P_r$  – veduri registrimass, t

Seoses sõidugraafiku alusel sätestatud peatusega reisirongi pidurdamise teostamise korral selle pidurdustegurit võetakse 0,6 nominaalväärtusest elektrirongi korral ja 0,5 nimiväärtusest elektriveduri korral.

Pidurdusteeks peetakse kaugust, mida läbib rong iseliikva veeremi pidurduskraana rakendamise ajahetkest koorema sihikiiruse saavutamise ajamomendini. Kuna koorema pneumaatiline pidurdussüsteem koosneb mehaanilisest ülekannetest, mis toimivad teatud viivitusaga ja pidurid rongi ulatuses ei rakendu üheaegselt, rongi pidurdustee pikkus koosneb ettevalmistavast pidurdusteest ja tegelikkust pidurdusteest. Ettevalmistuse pidurdustee arvutatakse allatoodud valemi kaudu:

$$s_e = 0,278 \cdot v_o \cdot t_e , \quad (38)$$

kus  $s_e$  – ettevalmistuse pidurdustee, m

$v_o$  – rongi sõidukiirus vahetult pidurdamise algusel, km/h

$t_e$  – rongi pidurdussüsteemi ettevalmistusaeg, s

Koorema pneumaatilise pidurduse ettevalmistuseag, mille arvutusvalemid saab üles leida veojõudude arvutusülesannete lahenduseeskirjas, sõltub koorema pikkusest. Näiteks, vähem kui 200 ratastelge sisaldav kaubarongi pidurdussüsteemi ettevalmistusaeg võib määrata valemiga:

$$t_e = 7 - \frac{10 \cdot i_c}{1000 \cdot \rho_p \cdot \varphi_{kp}} , \quad (39)$$

kus  $t_e$  – rongi pidurdussüsteemi ettevalmistusaeg, s

$i_c$  – eriliiklustakistusjõud tõustest (kaldete korral võetakse negatiivse märgiga), kgj/t

$\rho_p$  – arvutuslik koorema pidurdustegur, tj/t

$\varphi_{kp}$  – arvutuslik veeremi pidurdusklotsi hõõrdetegur [9], [12]

Pidurdusülesannete lahendamise raames tegelik pidurdustee jagatakse väikesteks intervallideks, mille ulatuses rongi aeglustamine võetakse konstantsena. Mööda üht arvutuslikku löiku läbitud pidurdusteed võib arvutada valemiga:

$$s = \frac{500 \cdot (v_a^2 - v_l^2)}{\zeta \cdot (1000 \cdot \rho_p \cdot \varphi_{kp} + i_c + w_o)} , \quad (40)$$

kus  $v_a, v_l$  – rongi sõidukiirused vastavalt arvutusliku intervalli algusel ja lõpul

$\zeta$  – koorema aeglustus või kiirendus taandatud erijõudu 1 kgj/t mõju tõttu,  $\left(\frac{\text{km/h}^2}{\text{kgj/t}}\right)$

$\rho_p$  – arvutuslik koorema pidurdustegur, tj/t

$\varphi_{kp}$  – arvutuslik veeremi pidurdusklotsi hõõrdetegur antud kiirusintervallides

$i_c$  – eriliiklustakistusjõud tõustest (kaldete jaoks võetakse negatiivse märgiga), kgj/t

$w_o$  – rongi peamine liikluseritakistus veduri tühijooksu korral antud kiirusintervallides, kgj/t

Tavaliste arvutustingimuste korral iga veeremi kohta  $\zeta$  väärtust võib võrdustada  $120 \left(\frac{\text{km/h}^2}{\text{kgj/t}}\right)$ .

Rongi sõidukiiruse langetamist ühe arvutusliku teelõigu ulatuses määratakse järgmise avaldisega:

$$\delta v = \frac{\zeta \cdot (b + w_o + i_c) \cdot \Delta t}{3600} , \quad (41)$$

kus  $\Delta t$  – arvutusliku teelõigu läbimisaeg, s

$b$  – rongile rakendatud eripidurdusjõud, kgj/t

Rongile rakendatud eripidurdusjõudu määratakse pidurdusjõudu väärtuse koorema massi ühele tonnile taandamise teel:

$$b = \frac{10^3 \cdot B}{m}, \quad (42)$$

kus  $B$  – rongile rakendatav pidurdusjõud, kgj

$m$  – rongi mass, t

Pidurdustee ulatust leitakse, liites kõigil kiirusintervallidel läbitud teepikkusi ning ettevalmistamise teedepikkust kokku:

$$s_p = \sum s + s_e, \quad (43)$$

kus  $s_p$  – koorema pidurdustee, m

$s$  – rongiga läbitud kaugus antud kiirusintervallide ulatuses, m

$s_e$  – koorema pidurdussüsteemi ettevalmistamistee, m

Tüüpilised teguri  $\zeta$  väärtused erinevate koormate kohta ja normatiivne pneumaatiliste pidurite rakendumisajad erinevate vagunite kohta on toodud veojõudude arvutusülesannete lahenduseeskirjas. [9]

## 2.4 Veojõud

Veojõudu piiranguid iseliiguva veeremi ratasteljetes peamiselt kujundavad veomootorite kommutatsioonitingimused ja suureim lubatav klemmipinge, rataste ja rööbaste nakketegur, veomuunduri täitetegur, elektriveduri või elektrirongi maksimaalse lubatud konstruktsiooni kiirus. Rongi liikludünaamika arvutusülesannete raames veojõudu suurust määratakse elektrivedurite ja elektrirongide tootjaga veoarvutuste eskirjas avaldatud iseliiguva veeremi sisend-väljund karakteristikute kaudu, mida esindatakse kas graafiliselt kõverjoonte parvete alusel või analüütiliselt andmetabelite põhjal. [17]

Need sisend-väljund karakteristikud võib jaguneda veojõu- ja voolu karakteristikuteks. Esimene karakteristik näitab veduri veojõudu väärtuse sõltuvust koormaga saavutavast kiirusest. Voolukarakteristik kirjeldab elektriveduriga tarbitava voolu suurust sõltuvalt rongiga saavutavast kiirusest. Veojõudude arvutusel tuleb valida selliseid karakteristikke, mis vastavad rongi sõidukiirusele. Vajaliku rongi liikumiskiiruse korral parameetrite puudumisel on tarvis taandada kahte lähimatele arvutuslikudele sõidukiirusele vastavaid karakteristikke tegeliku koorma sõidukiiruse parameetrile lineaarse interpolatsiooni teel järgmiste valemite kaudu:

$$I_{d, teg} = \frac{v_{(1)} - v}{v_{(1)} - v_{(2)}} \cdot (I_{d(v1)} - I_{d(v2)}) + I_{d(v2)}; \quad (44)$$

$$F_{, teg} = \frac{v_{(1)} - v}{v_{(1)} - v_{(2)}} \cdot (F_{(v1)} - F_{(v2)}) + F_{(v2)}, \quad (45)$$

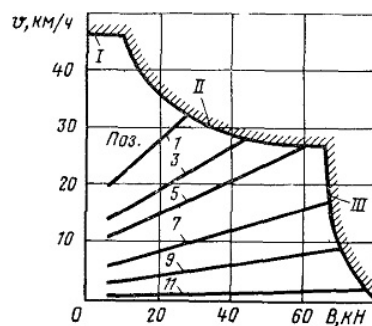
kus  $I_{d(v_1)}$  ja  $I_{d(v_2)}$  – vastavalt esimese ja teise veduri arvutusliku kiirusele vastavad koomusvoolu väärtused, A

$F_{(v_1)}$  ja  $F_{(v_2)}$  – vastavalt esimese ja teise veduri arvutusliku kiirusele vastavad veojõudu väärtused, kN

$v_{(1)}$  ja  $v_{(2)}$  – vastavalt esimese ja teise arvutusliku veduri režiimidele kuuluvad liikumiskiirused, km/h

$v$  – rongi tegelik sõidukiirus, km/h

Iseliiguva veeremi veojõudu ja koomusvoolu funktsionaalsõltuvuse kiirusest genereerimisele andmetabelite põhjal on tarvis kasutada vähimruutude meetodit või teisi maailmas kasutusel olevaid arvutusvõtteid.



Joonis 2.3 Rongi sõidukiiruse ja kollektormasinatega varustatud elektriveduri veojõudu sõltuvusgraafik [17]:

$v$  – rongi liikumiskiirus,  $B$  – elektriveduriga saavutatav veojõud, I – maksimaalse lubatava sõidukiirusega põhjustatud veojõudu piirang, II – suureima lubatava veomootorite klemmpingega põhjustatud veojõudu piirang, III – lubatava nakketeguriga kujundatud veojõudu piirang

Joonis 2.3 kajastab koormaga sõidukiiruse sõltuvust kollektormasinatega varustatud elektriveduri saavutatavast veojõudust. Veorežiimi peetakse lubatuks, kui seda kirjeldav punkt satub piirangujoontega moodustatud kõverjoonelise trapetsi pindalasse. [17]

## 2.5 Rongiliikluse peamine võrrand

Peamiseks veojõudude arvutusülesannete lahendamisevõtteks peetakse rongiliikluse peamise võrrandi lahendamist, mis kujutab endast välja Newtoni teise seaduse modifikatsiooni:

$$\frac{dv}{dt} = \zeta \cdot (f - w), \quad (46)$$

kus  $dv$  – kiiruse keskmine muutmine vaadetaval teelõigul käsitleva ajaperioodi keskel, km/h

$dt$  – käsitleva ajavahemiku kestus, s

$f$  – iseliiguva veeremiga rakendav eriveojõud, kgj/t

$w$  – rongi resulteeriv eriveotakistusjõud, kgj/t

Koorma resulteeriva eriliiklustakistusjõudu arvutatakse järgmise valemi kaudu:

$$w = w_o + w_i + w_c, \quad (47)$$



kus  $w$  – rongi resulteeriv eriliiklustakistusjõud, kgj/t

$w_0$  – rongi peamine eriliiklustakistusjõud, kgj/t

$w_i$  – rongi lisa eriliiklustakistusjõud tõustest ja kaldest, kgj/t

$w_c$  – rongi lisa eriliiklustakistusjõud kõveratest, kgj/t

Eriliiklustakistusjõudu komponendid määratakse tehniliste arvutustega veotöö mahtu kehtestava ja raudteetaristu omadusi kirjeldavate dokumentide alusel. Rongile rakendatud eriveojõudu määratakse veojõudu väärtuse koorema massi ühele tonnile taandamise teel:

$$f = \frac{10^3 \cdot F}{m}, \quad (48)$$

kus  $F$  – veduriga edastav veojõud, kgj

$m$  – rongi mass, T

Kuna valemis 46 kiirenduse asendamine kiiruse ja aja juurdekasvude suhega toob sisse aruvutusviga, tuleb kasutada mõistlikult väikesi  $dv$  ja  $dt$  väärtusi rongi liikumisdünaamika ülesannete lahendamise raames. Veojõudude lahenduseeskirja põhjal sovitatakse omistada  $dv$  väärtusi vahemikust 5-10 km/h ja võtta  $dt$  väärtusi vahemikust 3 – 6 s. Peamist rongiliikluse võrrandit saab lahendada analüütiliselt integreerimise teel või ligikaudsete meetmete kaudu.

[16], [9]

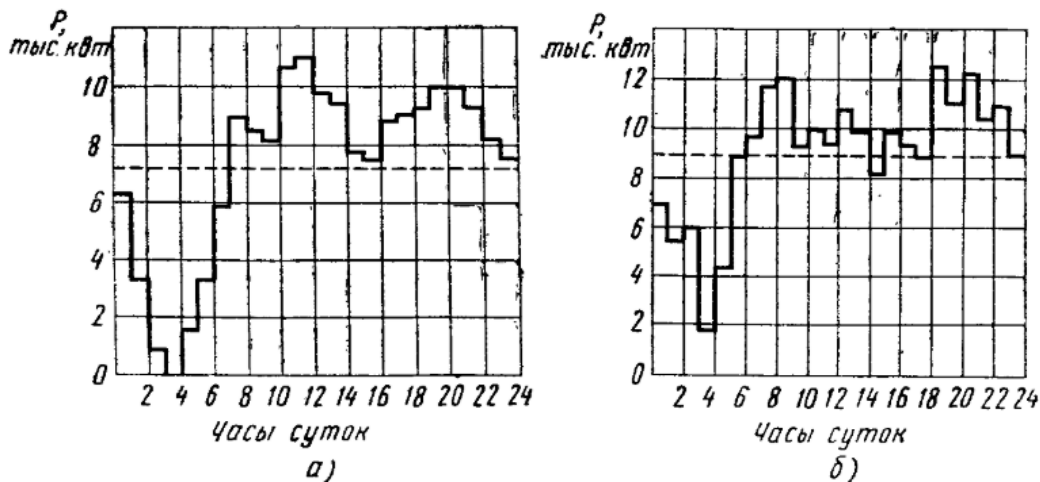
### 3. RAUDTEE VEOVÕRGUDE LIIGITUS KOORMUSMUDELIE

#### ISEÄRASUSUTE JÄRGI

Raudteesüsteeme võib liigida erinevate talitusparameetrite järgi. Kontaktvõrgu dimensioneerimisülesannete lahendamise raames on tarvis klassifitseerida raudteeliine tekkinud veokoormuste kaudu, analüüsides nende olulisuse sõltuvust aastaajast, nädalapäevast, ööpäeva tunnist, veotöö mahtust ja teistest talitusparameetritest. Tõeliselt eksisteerivate raudteede käsitlemise korral võib üheaegselt puutuda mitu veokoormusmodelite tunnustega, seega on tarvis kasutada koondkoormusmodelit. [3], [4]

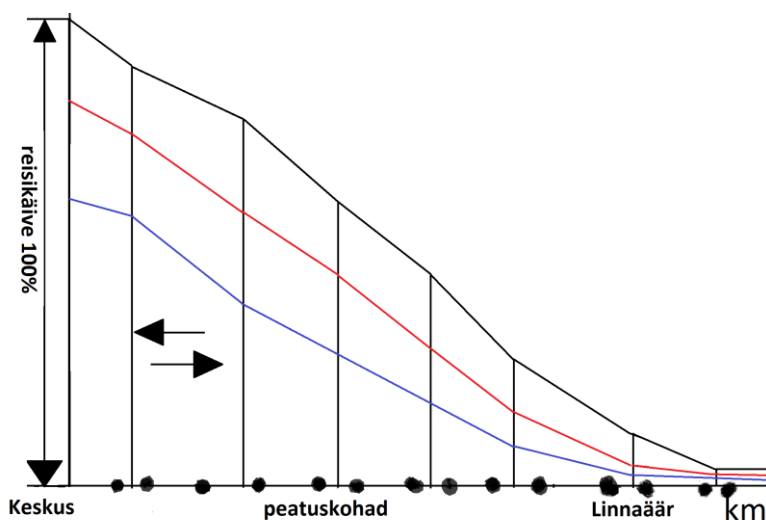
#### 3.1 Linnalähedus raudtee

Linnalähedusraudteeks peetakse LRT-süsteeme, metropoliteene, trammisvõrke ja teiste maapealisi ja -alumisi elektrifitseeritud rööbastranspordiliikisid, mille liinid ühendavad linnaaglomeratsioonit kujundavaid elumassive, ärikeskuseid ja tööstuslikke piirkondi. Ülesmainitud transpordivahendid annavad võimalust linnaelanikkudele kiirelt ja mugavalt teostada pendelmigratsioone töökohta ja kodu vahel. Linnalähedusraudteedes võib määrata veokoormuse suuruste püsivat sõltuvusi aastaajast, nädalapäevast, ööpäeva tunnist ja elektrirongi kaugusest linnast. Sellist raudteeliini toitvate veoalajaamade ööpäevast koormusgraafikut iseloomustavad koormuse järsku tõusud hommiku- ja õhtutipptundides ning koormuse täielik puudumine öösel. Uuritava raudteetüübi koormuse olulisus puhkepäevadel on oluliselt madalam, kui tööpäevadel. Seoses puhkusperioodide tõttu suvel veokoormuse väärtus langeb argipäevadel ja suureneb puhkepäevadel, võrreldes talvise koormusgraafikutega. Linnalähedusraudtee elektrivarustust tagava veoalajaamde koormusgraafikke kajastab joonis 3.1 [2], [5]



Joonis 3.1 Puhtalt linnaläedase raudtee toitva veoalajaama ööpäevased sõltuvusgraafikud: a) talvine koormusgraafik, b) suvine koormusgraafik [4].

Linnaläheduse raudtee koormusmodelite dimensioonierimine võib põhimõtteliselt teostada kahede erinevate viisidega. Metropoliitenides ja teistest transportliikidest isoleeritud rajades läbivates LRT-süsteemides sõiduplaanist hoitakse kinni piisavalt edukalt, seega sellistes raudteesüsteemides võib rakendada koormusmodeli arvutusviisi normatiivse sõidugraafiku alusel. Paljude liiklühäirete tõttu trammisüsteemide ja teiste isoleerimata maapealsete rööbastranspordi teostatud vedude graafikud võivad oluliselt erineda kavatsatud sõiduplaanidest, seega selle raudteeliini liigi korral on mugavam kasutada arvutusviise keskmise veotöö alusel. Linnaläheduse raudtee tähtsat iseärasust peetakse reisikäive kahanemine aglomeratsiooni keskuset eemaldamine korral. Seda tunnust illustreerib joonis 3.2 [4], [5]



Joonis 3.2 Reisijate hulga sõltuvus kaugusest aglomeratsiooni keskusest linnalähedasel raudteel [4]. must joon – reisikäive talveperioodil, sinine joon – reisikäive suveperioodil, punane joon – aastakeskmine reisikäive

Linnaläheduse raudteel opereerivate rongide voludiagrammid, kiirendus- ja pidurduskarakteristikud on võrdsed, liiklustihedus on peaaegu ühtlane, vaheajad kahe pärisuunaliste rongide vahel ja peatuste ajad arvutusliku ajaperioodi jooksul jäävad samaks (st liiklusgraafik on paralleelne). Esiletoodud linnaläheduse raudteesüsteeme iseärasused võimaldavad vajaliku täpsusega määrata veokoormuse parameetreid keskmise veotöö alusel. Peale seda erinevaid ajamomente esindavad veovõrgu hetkskeemid sageli langevad üksteistega kokku, seega koormusmodeli dimensioonierimine saab samuti teostada normatiivse sõidugraafiku alusel, käsitledes minimaalse sõidugraafiku lõikude arvu. [2], [5]

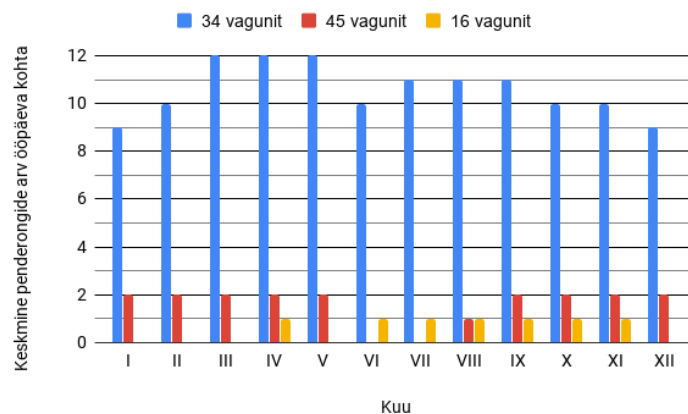
### 3.2 Tööstuslik raudtee

Tööstuslik raudtee rahuldab mäendusettevõtete veondusvajadusi. Selle raudteeliigi peamiste ülesannete hulgas on metallmaagi, maavara või kütuse transporteerimine karjäärides ja maa-

alumises maardlades asuvatest kaevandamiskohtadest tarbimiskeskustesse rikastusvabrikute ja soojuselektrijaamade juurest, sulatud metalli, sellest tehtud toorikute ja teiste vaheproduktide ülekandmine tsehhide vahel, peale maavara rikastamist jäetud tühikimi edastamine terrikonniidele ja teised tähtsad talitlusoperatsioonid. [14]

Vekoormuse suurust tööstuslikul raudteel peamiselt kujundavad raudteega tenindavate elektrijaamade või rikastusvabrikute tarbimisnõudmine ja maavara ümbertöötamisvõime, kivimi kaevandamishorisoni ja rikastusvabrikute absoluutkõrguste vahe (nn veo tarnekõrgus). [15]

Erinevalt avaliku raudteega tööstusliku rööbastranspordi veotöö mahtu kehtestab mitte normatiivne liiklusgraafik, vaid maavara sisse-allalaadimiskava, mida koostakse vahetult enne uut töövahetust rikastusvabrikute töö operatiivplaanide ja soojuselektrijaama ennustatud koormusgraafikute põhjal, seetõttu tööstusliku raudtee korral ei sa rakendada koormusmudeli arvutusviisi normatiivse sõidugraafiku alusel. Selle raudteesüsteemi koormusmudeli dimensioneerimisülesanne lahendatakse kas keskmise veotöö mahtu kaudu või valimisstatistikas ja tõenäolisusteoorijas rajanevate meetmete kaudu. Joonisel 6 on esitatud ühe tööstusliku raudtee keskmist veotöö mahtu kujutav diagramm. [17]



Joonis 3.3 Ühe tööstusliku raudtee keskmine veotöö maht ühe ööpäevase vahetuse kuude kaupa [17]

Kuna tööstuslikus raudteesüsteemis kurseerivad ainult poolvagunitest või dumpkaridest koosnevad pendelrongid, mis teenindavad suletud tehnoloogisi marsruuti, kooremad omavad sarnased vooludiagramme ning pidurdus- ja kiirenduskarakteristikuid. Tööstusliku rööbastranspordi projekteerimispraktikas on levinud järgmine valem, millega võib hinnata alalisvoolu veoalajaama vajalikku nimivõimsust:

$$P_{al} = k_m \cdot (P_{vn} \cdot \frac{n_v}{k_r} + P_{vk} \cdot n_v), \quad (49)$$

kus  $P_{al}$  – arvutuslik alalisvoolu veoalajaama nimivõimsus, kW

$P_{vn}$  – veoargegaadi nimivõimsus, kW

$P_{vk}$  – veoargegaadiga keskmiselt tarbitav võimsus ühe ööpäeva ulatuses, kW /telg

$n_v$  – üheaegselt töötavate veoargegaatide arv

$k_m$  – veomuundurite ülekoormusvõimet arvestav tegur

$k_r$  – üheaegselt raskendatud veorežiimis talitlevate veogregaatide koguse arvestav tegur

Tööstusliku raudteed toitva veoalajaama nimivõimsuse kiirhinnangu teostamiseks tuuakse siisse nn elektrivedurite nõudmistegurit, mis näitab veoalajaama nominaalvõimsuse ja töötavate elektrivedurite resulteeriva arvutusliku tunnivõimsuse suhet:

$$k_n = \frac{P_{al}}{P_{res,v}}, \quad (50)$$

kus  $P_{al}$  – arvutuslik alalisvoolu veoalajaama nimivõimsus, kW

$P_{res,v}$  – veoargegaadi nimivõimsus, kW

$k_n$  – elektrivedurite nõudmistegur

Vahelduvvoolu tööstusliku rööbastraspordit toitva veoalajaama vajalikku näivvõimsuse võib määrata allatoodud valemi kaudu:

$$S_{al} = \frac{P_{al} \cdot k_f}{\cos(\varphi)}, \quad (51)$$

kus  $P_{al}$  – valemi 9 kaudu saadud arvutuslik veoalajaama nimivõimsus

$k_f$  – kolmefaasiliste trafode parameetreid ühefaasilise veovõrgu tingimusele taandav tegur

$\cos(\varphi)$  – võimsustegur

Valemities 9-11 sisaldavate tegurite väärtused on ülesleitavad tööstusliku rööbastraspordi projekteerimisekirjas. [15], [14]

### 3.3 Avalik raudtee

Antud raudteeliik teostab vedude transporteerimist suhteliselt suurtele kaugustele ja transiitveovoogude teenindamist. Plaanitud vedude normatiivne liiklusgraafikut peetakse avaliku raudtee rongiliikluse korraldamise põhialus, mis ühendab kogu raudteetaristu ja raudteetranspordi sfäärides töötavate ettevõtete tegevust. Normatiivne liiklusgraafik on ette määratud vajalikku reisi- ja kaubavedude nõudmise täieliku katmisele, rongiliikluse ohutust tagamisele, raudteejaamade läbilaskmehõime ja jaamavahede liiklustiheduse optimaalsele ärakasutamisele, veduribrigaadide puhkuse ja töö režiimist kinnipidamisele ning raudteetaristu, side, turvangu ja elektrivarustussüsteemide hooldustööde võimaldamisele. [4], [29]

Avaliku raudtee veokoormuse olulisust peamiselt sõltub veotöö mahtust, raudteetrassi tehnilistest parameetridest ja raudteeliinide kogupikkust, mingil määral eksisteerivad edastavate vedude karakteristikude seaduspärasused aastajast, nimelt: talviti tarnitakse rohkem kütust, suvel viiakse üle rohkem mineraalväetiseid ja põldmajandusvedusid. On keeruline määrata üsna suurt liiklustihedust omava avaliku raudtee veokoormuse suuruse püsivate ööpäevasi sõltuvusgraafikke,

sest selline raudtee talitleb pidevalt muutuva veotöö mahuga sõltumatu nädalapäevast ja ööpäeva osast. [5], [16]

Avaliku raudtee elektrivarustussüsteemi iseloomustab elektrienergia tarbimise erimaht, mis näitab elektrienergia erikulu 1 brutto-tonni edastamise jaoks 1 kilomeetrile:

$$a = \frac{A}{Q \cdot L}, \quad (52)$$

kus  $A$  – raudtee elektrivarustussüsteemi tarbitud elektrienergia kogumaht, kWt

$Q$  – edastatud koormate summaarne mass, T

$L$  – vaadeldava raudteelõigu pikkus, km.

Alalisvoolu elektriraudteel tarbimise erimaht võib hinnata järgmise empiirilise valemiga:

$$a = 4,0 \cdot (w_k + i_e), \quad (53)$$

kus  $w_k$  – keskmine resulteeriv eriliiklustakistusjõud, kgj/T

$i_e$  – ekvivalentse tõuse suurus, ‰

$L$  – vaadeldava raudteelõigu pikkus, km.

Vahelduvvoolu elektriraudteel elektrienergia erikulu saab hinnata järgmise empiirilise valemiga:

$$a = 3,8 \cdot (w_k + i_e). \quad (54)$$

Keskmi eriliiklustakistusjõudu määratakse rongide keskmise sõidukiiruse alusel, aga ekvivalentse tõuse väärtust määratakse juhtiva kalde suuruse põhjal, mis kujutab endast välja suureimat tõuset vaadeldaval raudteelõigul. Tavalistel tingimustel talitleva avaliku elektriraudtee elektrienergia erikulu sattub vahemikku  $10-15 \frac{W \cdot t}{T \cdot km}$ . [6], [14]

Tabelis 3.1 on esitatud erinevatele rongi sõidukiirustele vastavatele keskmised eriliiklustakistusjõudu suurused. Tabelis 3.2 on antud mitmekesistele juhtivate kalde suurusele vastavate ekvivalentse kaldete väärtused.

Tabel 3.1 Erinevatele koormate sõidukiirustele vastavatele keskmised eriliiklustakistusjõudu suurused

| Rongi sõidukiirus<br>km/h | Keskmine eriliiklustakistusjõud,<br>N/t |
|---------------------------|---|
| 40                        | 25                                      |
| 50                        | 28                                      |
| 60                        | 31                                      |
| 70                        | 35                                      |

Tabel 3.2 Mitmekesistele juhtivate kalde suurusele vastavate ekvivalentse kaldete väärtused

| Juhtiv tõus<br>‰ | Ekvivalentne kalde<br>‰ |
|------------------|-------------------------|
| 4                | 0,5                     |

|    |     |
|----|-----|
| 6  | 0,8 |
| 8  | 1,2 |
| 10 | 1,6 |
| 12 | 1,8 |
| 14 | 2   |

Elektriraudteel tarbitud elektrienergia kogumaht võib hinnata valemiga:

$$A = a \cdot Q \cdot L, \quad (55)$$

kus  $a$  – teoreetiline elektriraudtee elektrienergia erikulu,  $\frac{W \cdot t}{T \cdot km}$

$Q$  – raudteesüsteemi brutto-veokäive,  $T \cdot km$

$L$  – vaadeldava raudteelõigu pikkus, km.

Koormusvoolu eksperthinnang võib teostada järgmise avaldise kaudu:

$$I = \frac{A \cdot 10^3 \cdot 60}{T \cdot U}, \quad (56)$$

kus  $U$  – kontaktvõrgu nimipinge, kV

$T$  – kogu mööda vaadeldavat raudteelõigu läbitavate rongide summaarne sõiduaeg, min

Avaliku raudtee kontaktjuhtme ristlõikepindala dimensioneeritakse niimoodi, et iga elektriraudtee talitusrežiimide korral arvutuslik voolutihedus ei ületaks  $5 \text{ A/mm}^2$

Avalikul raudteel veopäringuid tavaliselt teostavad korraga mitu veoperaatorit, mis kasutavad üksteistest erinevate kiirendus- ja pidurduskarakteristikutega ronge ja -vedureid, mis muudab raudteeliiklust sellel raudteetüübil ebaühtlaseks (st ei ole konstantset ajaintervalli kahe pärisuunalise rongide vahel, muutub kooremate sõidukiirus, erinevad peatusajad). Esiletoodud avaliku raudtee talitluseärasused ei võimalda vajaliku täpsusega määrata koormusmudelit keskmise veotöö alusel, sest nende parameetritega opereerimine oluliselt moonutaks koormusvoolu maksimaalseid ja minimaalseid suurusid. Peale seda graafikulõigete meetodi rakendamise avaliku raudtee koormusmudeli dimensioneerimisel nõuab laiendama käsitlevate hetkskeemide hulka, mis oluliselt suurendab arvutustöö mahtu. Koormusmudel analüütilised arvutusmeetodid ei arvesta liiklusjuhtimiskeskuse avaliku raudtee operatiivjuhtimist, mille järgi võib teostada mõnede rongide tühistamist või kahe kaubarongi sõiduplaane ümbertõustmist ja sellega oluliselt mõjutada elektriraudtee talitusparameetreid. Avaliku raudtee veokoormuse analüüsi raames on mugavam loobuda deterministliku mudeli käsitlemist ning kasutada valimisstatistikas ja tõenäolsusteoorias rajanevaid arvutusmeetmeid. [4]

## **4. KOORMUSVOOLU METOODIKATE ANALÜÜS AVALIKU RAUDTEE NÄITEL**

Käesoleva determenistlikkude ja tõenäolisuslikkude meetmete rakendatavuse analüüsi teostatakse kontaktvõrgu projekteerimisülesanne lahendamise raames tõesti eksisteeriva Aegviidu-Tapa avaliku raudteelõigu jaoks. Kontaktjuthme dimensioneerimisülesanne koosneb neljast etapist: lähteandmete ettevalmistus, veojõudude arvutused, veovõrgu elektrilised arvutused erinevate meetmete raames, saadud tulemuste omavaheline võrdlemine.

### **4.1 Lähteandmete ettevalmistus**

Veovõrgu projekteerimisülesanne sooritamist alustati lähteandmete ettevalmistamisest, mis koosnes rongide parameetrite määramisest normatiivse liiklusgraafiku alusel, raudteetrassil asuvate tõuste, kaldete ja kõverate dimensioone kirjeldamisest jaamavahe pikiprofiili põhjal, iseliiguva veeremi sisend-väljund karakteristikke arvutuslikkude sõidukiiruste korral lineaarse interpoleerimise kaudu taandamist.

#### **4.1.1 Raudteesüsteemi lühikirjeldus**

Rongiliiklust Tapa-Aegviidu jaamavahel avati 1870. aastal Paldiski-Tallinn-Narva raudtee rajamise raames. Aastal 1973 naabritavat Raasiku-Aegviidu raudteelõiku elektrifitseeriti 3,3 kV alalisvoolu toidesüsteemiga. Tänapäeval uuritakse eksisteeriva veovõrgu pikendamise Tapa-Aegviidu raudteelõigu ulatuses. Vaadeldav jaamavahe on kaheteeline. Käsitlev raudteelõik varustatud kolmekohalise valgusfooride autoblokeeringutega. Rööpad on ühendatud keevitamise kaudu, seega sidelapid puuduvad.

Otseste kaubarongide liikumist käsitleval jaamavahel kavatakse teostada series 10 elektriveduritega. Väljaveo- ja koondkaubarongide opereerimist püüakse täita series 8m elektrivedurite kaudu. Transiitveovoogude teenindavate konteinerrongide käivet teostavad series 82m elektrivedurid. Tallinn-Moskva rahvusvahelise kiirrongi kurseerimist teenindavad CS-2T elektrivedurid, linnalähedase reisirongide liinides kavatakse kasutada ER-22 elektrironge.

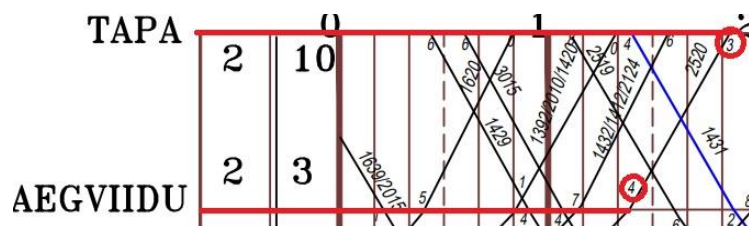
Paaritu suunas peamiselt edastatakse järgmisi vedusid: mineraalvæetised hopperites, nafta ja selle ümbertöötlemisega seotud produktid, diiselkütus, bensiin tsisternides, konteinerid suure tonnaažiga platvormidel, lubjakivikillustik poolvagunites, põlevkivikeemia produktid (määrdeained jms), veeldatud maagaas tsisternides, kakaoad kinnistes vagunites, sõidukid ja tööstuslik tehnika platvormidel.



Paaris suunas peamiselt liikuvad järgmised veod: tühjad tsisternid nafta, diiselkütuse, bensiini ja määrdeainete sisselaadimise jaoks, tühjad hopperid mineraalväetiste sisselaadimisele, konteinerid suure tonnaaziga platvormidel, palgid ja lauad platvormidel või poolvagunites.

#### 4.1.2 Koormate parameetrite määramine normatiivse liiklusgraafiku alusel

Avalikul raudteel igale rongile antakse sõidugraafikuga kehtestatud number, kus on sisse kodeeritud koormate suund, otstarbe, eelisõigus, info veetava koorma kohta. Vaatleme numbri 2520 koorma parameetrite määramist Eesti Raudtee aastate 2018-2019 Ida suuna normatiivse liiklusgraafiku alusel (vt lisa 2). Kaubarongide numeratsiooni põhjal (vt lisa 3) see on otsene koondkaubarong segatud mitmekesiseid vedusid sisaldavate vagunitest koosneva, mis sõidab Tallinna raudteesõlmest üle Valga Riia suunda. Selleks, et määrata väljumisaeg Aegviidu jaamast tuleb üles leida vajalikule rongile kuuluva joone ja uuritava raudteejaamale vastava ordinaati lõikepunkti (vt joonis 4.1). Kuna lõikepunkt asub paremkätt kahest joonest peale jämedat sirgjoone, number 2520 kaubarong väljub Aegviidu jaamalt hiljem kui kell 1:20. Lõikejoone kõrval seisav number, kui palju minutit tuleb liita sellele kellajale, seega kaubarongi väljumisaeg on 1:23. Samasuguse tööpõhimõttega võib määrata antud kaubarongi saabumisaega Tapa raudteejaamale.



Joonis 4.1 Kaubarongi 2520 väljumisaeg Aegviidu jaamalt ja Tapa jaamale saabumisaeg määramise tööpõhimõte. [19]

Normatiivse liiklusgraafiku paremal serval asuvad jaamavahelised kaugused. Teades väljumisaega esimeselt raudteejaamalt, saabumisaega teisele raudteejaamale ja kaugust kahe raudteejaamade vahel, võib määrata rongi keskmist kiirust järgmise valemi kaudu:

$$v = \frac{(t_{(2)} - t_{(1)}) \cdot 60}{L}, \quad (57)$$

kus  $t_{(1)}$  ja  $t_{(2)}$  – vastavalt esimeselt raudteejaamalt väljumisaeg ja teisele raudteejaamale saabumisega formaadis tt:mm:ss,

$L$  – jaamavaheline pikkus, km.

Kaubarongi formeerimise kava (vt lisa 4) uurides, võib märgata seda, et number 2520 kaubarong koosneb 10 koormatatest poolvagunitest, 5 tühjatest ja 5 koormatud kinnistest vagunitest, 7 platvormidest konteinerite jaoks, 11 vedelgaasi tsisternvagunitest, 11 tsisternidest naftatoodele, 3 universaalplatvormidest. Sama dokumendi jälgides, võib ülesleida, et 2520 kaubarongi veondust teenindab series 10 elektrivedur.

Kaubarongi kogumass määratakse järgmise avaldise kaudu:

$$m_R = \sum_1^n (m_q \cdot n_q) + m_v, \quad (58)$$

kus  $m_q$  – q-tüübi vaguni mass, t,  
 $n$  – q-tüübi ühesuguste vagunite arv rongis, tk,  
 $m_R$  – elektriveduri pikkus, t.

Ühe vaguni mass arvutatakse järgmise valemiga:

$$m_q = m_{TARA} + m_{CARGO}, \quad (59)$$

kus  $m_{TARA}$  – ühe vaguni taaramass, t,  
 $m_{CARGO}$  – ühe vaguni kandevõime, t.

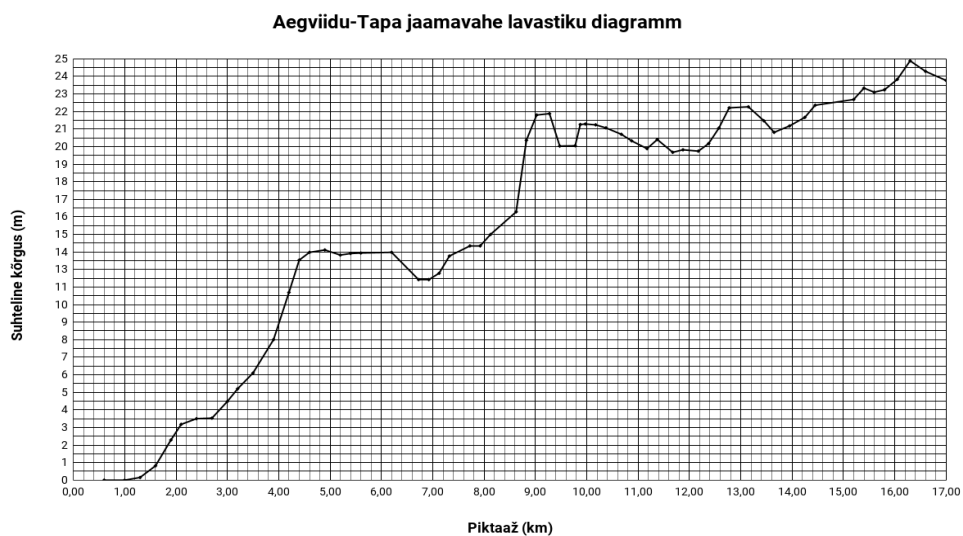
Arvutame kaubarongi 2520 kogumassi valemite 58-59 alusel:

$$m_{2520} = \sum_1^7 (m_q \cdot n_q) + m_v = 13,92 \cdot 11 + 14,73 \cdot 11 + 25,38 \cdot 7 + 12,02 \cdot 10 + 12,02 \cdot 10 + 14,62 + 184,0 \approx \approx 2000 \text{ T.}$$

Erineva veeremi pikkused saab võtta veooperaatoriga esindatud lähteandmetes (vt lisa 5). Kaubarongide formeerimiskava alusel määrati sõidukiirusi, massi, koormatust, vagunikoosseisu ja teisi vajalikke parameetreid kõikide läbisõitvate rongide jaoks.

### 4.1.3 Jaamavahe pikiprofiili analüüs

Peale Aegviidu-Tapa jaamavahe pikiprofiili (vt lisa 6) läbilugemist koostati raudteetrassi lavastiku diagrammi (*ing railway line profile diagram*), mida kajastab joonis 4.2, ja koguti antud jaamavahel asuvate kõverate kirjeldavaid tehnilisi parameetreid, mis on esitatud tabelis 4.1. Antud jaamavahe analüüsi alusel koostati raudteetrassi lavastiku maatriksi, mis on esitatud lisa 7.



Joonis 4.2 Ahtme-Raudi jaamavahe raudteetrassi lavastiku diagramm

Tabel 4.1 Tehnilised andmed Aegviidu-Tapa jaamavahel asuvate kõverate kohta

| Jrk nr | Kõvera alguspunkt / ordinaat | Kõvera lõpupunkt / ordinaat | Kõvera pikkus k / m | Välimise rööba tõus h / mm | Raadius r / m |
|--------|------------------------------|-----------------------------|---------------------|----------------------------|---------------|
| I      | 163,212                      | 163,612                     | 400                 | 60                         | 1265          |
| II     | 164,152                      | 164,975                     | 823                 | 40                         | 2130          |
| III    | 166,430                      | 166,999                     | 569                 | 70                         | 1072          |
| IV     | 172,777                      | 173,252                     | 475                 | 40                         | 2130          |

#### 4.1.4 Elektrivedurite sisend-väljund karakteristikute interpoleerimine

Juhul, kui rongi liikumiskiiruse korral iseliiguva veeremi parameetrid puuduvad, on tarvis taandada kahtele lähimatele arvutuslikulele sõidukiirusele vastavaid karakteristikke tegeliku koorma sõidukiiruse parameetritele lineaarse interpolatsiooni teel järgmiste valemite kaudu. Vaatleme Series 10 elektriveduri veojõudu ja koormusvoolu parameetrite taandamine sõidukiirusele 43,2 km/h arvutuslikulele kiirustele 45 km/h ja 40 km/h kuuluvate karakteristikude alusel valemite 44-45 alusel:

$$I_{d\,43,2} = I_{d\,45} - \frac{43,2 - 40,0}{45,0 - 40,0} \cdot (I_{d\,45} - I_{d\,40}) ;$$

$$F_{43,2} = F_{45} - \frac{43,2 - 40,0}{45,0 - 40,0} \cdot (F_{45} - F_{40}) ,$$

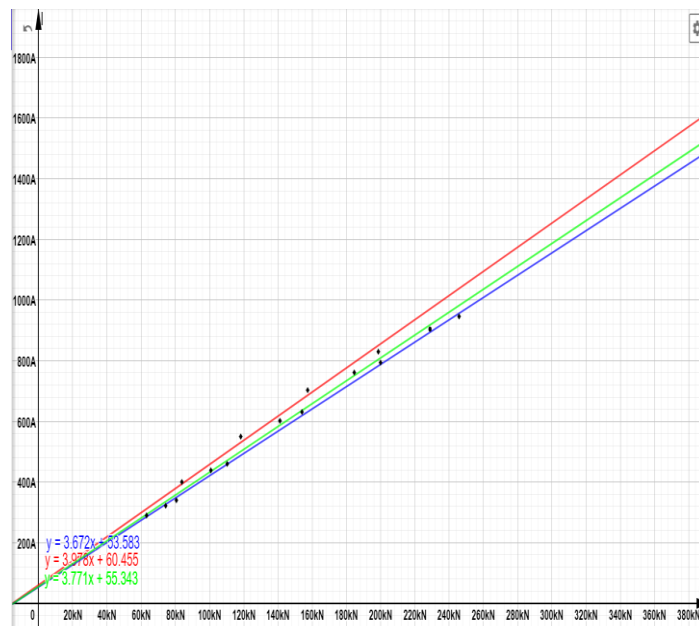
Tabelis 4.2 on esitatud Series 10 elektriveduri veojõudu ja koormusvoolu funktsionaalsõltuvus rongi sõidukiirustel 40 km/h, 43.2 km/h ja 45 km/h.

Tabel 4.2 Series 10 elektriveduri veojõudu ja koormusvoolu funktsionaalsõltuvus rongi sõidukiirustel 40 km/h, 43.2 km/h ja 45 km/h.

| Sõidukiirus 45 km/h |                      | Sõidukiirus 40 km/h |                      | Sõidukiirus 43,2 km/h |                      |
|---------------------|----------------------|---------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|
| Veojõud<br>F / kN   | Koormusvool<br>I / A | Veojõud<br>F / kN   | Koormusvool<br>I / A | Veojõud<br>F / kN     | Koormusvool<br>I / A |
| 63,2                | 290,0                | 80,6                | 340,0                | 74,336                | 322,0                |
| 83,8                | 400,0                | 110,3               | 460,0                | 100,76                | 438,4                |
| 118,2               | 550,0                | 154,0               | 631,0                | 141,112               | 601,8                |
| 157,3               | 703,0                | 199,9               | 794,0                | 184,564               | 761,2                |
| 198,6               | 830,0                | 245,8               | 946,0                | 228,808               | 904,2                |

Leiame neid funktsionaalsõltuvusi represeneerivate lineaarsete funktsioonide  $I(F) = A \cdot F + B$  empiirilisi konstante, kasutades töörista Best fit line'i Geogebra matemaatikapakettis.

Joonis 4.3 kajastab Geogebra tarkvaras koostatud Series 10 elektriveduri veojõudu ja koormusvoolu funktsionaalsõltuvusi ja nende kirjeldavaid matemaatilisi representatsioone rongi sõidukiirustel 40 km/h, 43.2 km/h ja 45 km/h.



Joonis 4.3 Geobra Series 10 elektriveduri veojõudu ja koormusvoolu funktsionaalsõltuvus:  
 F – veojõud, I – koormusvool; sinine – 40 km/h, roheline – 42,3 km/h, punane – 45,0 km/h

Erinevatele iseliiguvale veeremile kuuluvate sisend-väljund karakteristiku lineaarse interpoleerimise kaudu taandatud funktsionaalsõltuvused ja neid kirjeldavate lineaarsete funktsioonide  $I(F) = A \cdot F + B$  empiirilised konstandid on esitatud lisis 8.

#### 4.1.5 Küsitluslehe täitmine

Peale logistikaettevõtte tehnilise osakonna intervjuerimist ja nendega esitatud normatiivset dokumentatsiooni uurimist täideti küsitlusleht, kuhu sisse viidi selle raudteelõigu tehnilisi parameetreid, kuhu kavatakse juurutada elektrivedu. Küsitluslehte sisseviidud andmeid kirjeldab tabel 4.3.

Tabel 4.3 Küsitlusleht Aegviidu-Tapa kontaktvõrgu dimensioneerimisülesanne kohta

| Kriteerium  | Kirjeldus                                |
|---|--|
| Rööbasteede arv                                       | kaheteeline                              |
| Side- ja turvangusüsteem                              | kolmetäheline automaatsblokeering        |
| Jaamavahe pikkus/fiidertsooni pikkus (km)             | 20,9/17,0                                |
| Fiidertsooni kauguste reeper, sellele vastav piketaaz | Aegviidu jaama sissesõidufoorid, 162,000 |

|  |  |
|--|--|
| Fiidertsooni piirid  | Aegviidu jaama sissesõidufoorid Tapa jaama sissesõidufoorid  |
| Kasutatav toitesüsteem veovõrgus   | 3,0 (3,3 kV) DC  |
| Kontaktvõrku seksioneerivate isoleeritud vahemikute asukohad   | SV №1 - Aegviidu jaama sissesõidufoor<br>SV №2 - seksioneerimispost 6,200<br>SV №3 - Tapa jaama sissesõidufoor                                   |
| Maksimaalne lubatud sõidukiirus  | kiirrong - 120 (km/h)  |
| Pidevate sõidukiiruse piirangukohad  | puuduvad   |
| Katsepidurdamise kohad, nominaalne kiirus vahetult enne katsepidurduse algust, normatiivse pidurdustee pikkus, nõutav sõidukiiruse vähendamine, pidurdusaste | Paaris suund (Aegviidu-Tapa):<br>puudub<br>Paaritu suund (Tapa-Aegviidu):<br>177 pk 10, 50 km/h, 350 m, 4-6 km/h<br>võrra, I aste ehk 0.14 (MPa) |
| Rööbastee kirjeldus  | rööba mark 60E1, rööpad ühendatud keevimise kaudu, I kvaliteedi kategooria rööbastee   |

## 4.2 Veojõudude arvutused

Ettevalmistatud lähteandmetes tuginedes, iga rongi jaoks teostatatakse veojõudude arvutusi, mille raames rakendati rongiliikluse peamist võrrandit, lahendati pidurdusülesannet, arvestati peamist liiklustakistusjõudu ning samuti kõverate ja lavastikutega põhjustatud liiklustakistusjõudu.

### 4.2.1 Peamine eriliiklustakistusjõudu määramine

Vaatleme peamise eriliiklustakistusjõudu arvutuseeskirja numbri 2520 otsese koondkoorema näidel. Antud kaubarong koosneb 10 koormatatest poolvagunitest, 5 tühjatest ja 5 koormatud kinnistest vagunitest, 7 platvormidest konteinerite jaoks, 11 vedelgaasi tsisternvagunitest, 11 tsisternidest naftatoodele, 3 universaalplatvormidest. 2520 kaubarongi veondust teenindab series 10 elektrivedur. Koorema tehniline sõidukiirus vaadeldavas jaamavahel on 43,2 (km/h). Kaubarongi liikumine toimub mööda kevitatud rööbasteed. Käsitlevas rongi koosseisus olevate vagunide kandevõime, taaramassi ja teiste tehniliste parameetrite tavapärased väärtused on ülesleitavad logistikaettevõtte esindajaga esitatud materjalides (vt lisa 9). Nendes materjalides tugines, Veoarvutuste eeskirja põhjal oli valitud sobivad arvutusvalemid, mille alusel oli teostatud peamise eriliiklustakistusjõudu määramine (vt lisa 1).

Ühe poolvaguni telje kohta erikoomuse määramine:

$$q_{01} = \frac{m_{TARA 1} + m_{CARGO 1}}{K} = \frac{24,5 + 0,0}{4} = 6,125 \text{ (T/telg)}$$

Kuna antud veeremi kohta  $q_0 > 6$ , on tarvis kasutada valemit 24. Ühe poolvaguni peamise eriliiklustakistuse väärtuse arvutamine:

$$w'_{01} = 0,7 + \frac{3,0 + 0,09 \cdot 43,2 + 0,002 \cdot 43,2^2}{6,125} = 0,700 + 1,125 + 0,609 = 2,434 \text{ (kgj/T) ehk } 24,3 \text{ (N/t)}$$

Ühe koormata kinnisvaguni telje kohta erikoomuse määramine:

$$q_{02} = \frac{m_{TARA 2} + m_{CARGO 2}}{K} = \frac{26,0 + 0,0}{4} = 6,500 \text{ (T/telg)}$$

Ühe koormata kinnisvaguni peamise eriliiklustakistuse suuruse arvutamine:

$$w'_{02} = 0,7 + \frac{3,0 + 0,09 \cdot 43,2 + 0,002 \cdot 43,2^2}{6,500} = 0,700 + 1,060 + 0,574 = 2,334 \text{ (kgj/T) ehk } 23,3 \text{ (N/T)}$$

Ühe täielikult laetud kinnisvaguni telje kohta erikoomuse määramine:

$$q_{03} = \frac{m_{TARA 2} + m_{CARGO 2}}{K} = \frac{26,0 + 68,0}{4} = 23,500 \text{ (T/telg)}$$

Ühe täielikult laetud kinnisvaguni peamise eriliiklustakistuse suuruse arvutamine:

$$w'_{03} = 0,7 + \frac{3,0 + 0,09 \cdot 43,2 + 0,002 \cdot 43,2^2}{23,50} = 0,700 + 0,293 + 0,159 = 1,152 \text{ (kgj/T) ehk } 11,5 \text{ (N/T)}$$

Ühe koormata konteinerplatvormi telje kohta erikoomuse avutamine:

$$q_{04} = \frac{m_{TARA 3} + m_{CARGO 3}}{K} = \frac{25,0 + 0,0}{4} = 6,250 \text{ (T/telg)}$$

Ühe koormata konteinerplatvormi peamise eriliiklustakistuse suuruse arvutamine:

$$w'_{04} = 0,7 + \frac{3,0 + 0,09 \cdot 43,2 + 0,002 \cdot 43,2^2}{6,250} = 0,700 + 1,102 + 0,597 = 2,399 \text{ (kgj/T) ehk } 24,0 \text{ (N/T)}$$

Ühe tühja naftatoodete tsisternvaguni ühe telje kohta erikoomuse avutamine:

$$q_{05} = \frac{m_{TARA 4} + m_{CARGO 4}}{K} = \frac{27,4 + 0,0}{4} = 6,850 \text{ (T/telg)}$$

Ühe tühja naftatoodete tsisternvaguni peamise eriliiklustakistuse suuruse arvutamine:

$$w'_{05} = 0,7 + \frac{3,0 + 0,09 \cdot 43,2 + 0,002 \cdot 43,2^2}{6,850} = 0,700 + 1,006 + 0,545 = 2,251 \text{ (kgj/T) ehk } 22,5 \text{ (N/T)}$$

Ühe tühja vedelgaastsisterni ühe telje kohta erikoomuse avutamine:

$$q_{06} = \frac{m_{TARA 5} + m_{CARGO 5}}{K} = \frac{33,0 + 0,0}{4} = 8,250 \text{ (T/telg)}$$

Ühe tühja vedelgaastsisterni peamise eriliiklustakistuse suuruse arvutamine:

$$w'_{06} = 0,7 + \frac{3,0 + 0,09 \cdot 43,2 + 0,002 \cdot 43,2^2}{8,25} = 0,700 + 0,835 + 0,452 = 1,987 \text{ (kgj/T) ehk } 19,9 \text{ (N/T)}$$

Ühe universaalplatvormi ühe telje kohta erikoomuse avutamine:

$$q_{07} = \frac{m_{TARA 6} + m_{CARGO 6}}{K} = 5,500 \text{ (T/telg)}$$

Kuna antud vaguni kohta  $q_0 < 6$ , on tarvis kasutada valemit 25. Ühe universaalplatvormi peamise eriliiklustakistuse väärtuse arvutamine:

$$w'_{07} = 1,0 + 0,042 \cdot 43,2 + 0,00016 \cdot 43,2^2 = 1,0 + 1,814 + 0,299 =$$

$$= 3,113 \text{ (kgj/T) ehk } 31,1 \text{ (N/T)}$$

Series 10 tüübi elektriveduri universaalplatvormi ühe telje kohta erikoomuse avutamine:

$$w_0'' = 18,6 + 0,08 \cdot 43,2 + 0,0024 \cdot 43,2^2 = 18,60 + 3,456 + 4,479 \approx 26,5 \text{ (N/T)}$$

Massi järgi kaalutud keksmise eriliiklustakistuse määramine kogu rongi kohta:

$$W_0 = \frac{26,5 \cdot 184 + 24,3 \cdot 24,5 \cdot 10 + 23,3 \cdot 26,5 + 11,5 \cdot (26,0 + 68,0) \cdot 5 + 24,0 \cdot 25,0 \cdot 7 + 22,5 \cdot 27,4 \cdot 11 + 19,9 \cdot 33 \cdot 11 + 31,1 \cdot 22 \cdot 3}{184 + 24,5 \cdot 10 + 26 \cdot 5 + (26,0 + 68,0) \cdot 5 + 25,0 \cdot 7 + 27,4 \cdot 11 + 33 \cdot 11 + 22 \cdot 3} = =$$

$$\frac{4876,0 + 5953,5 + 3029,0 + 5405,0 + 4200,0 + 6781,5 + 7223,7 + 2052,6}{1950} = \frac{39521,3}{1950} \approx 20,3 \text{ (N/T)}$$

Rongide peamise eriliiklustakistuse väärtuse arvutamise optimeerimise jaoks Excel'i arvutustabelites oli koostatud abirakendus. Selle kasutaja määrab rongide koosseisu, vagunite koormatust ja kogust, veeremi liikluskiirust, rööbastee olukord ja teisi vajalikke raudtee talitusparameetreid. Peale lähteadmete sisestamist abirakendus VLOOKUP() vertikaalaotsingu operaatori kaudu leiab vastavate veeremite karakteristikke, kontrollib arvutustingimusi mitmekihilise IF() loogikafunktsiooni abiga ja väljastab peamise eritakistusjõudu massi järgi kaalutud keskmist väärtust. Väljavõtted esiletoodud rakendusest on esitatud lisan 10.

#### 4.2.2 Pidurdusülesande lahendamine

Pidurdusülesanne lahendamine oli käsitletud hoppersrongi katsepidurduse näidel.

Kaubarongi automatpidurduste valmistusaja määramiseks tuleb arvutada rattastelgede arvu:

$$n = 46 \cdot 4 + 12 = 200 \text{ (tk)}$$

Kuna summarne rattastelgede kogus ei ületa 200 ühikut, kaubarongi automatpidurduste valmistusaja arvutamiseks on tarvis kasutada valemit 38:

$$t_{\pi} = 7 - \frac{10 \cdot 0,00}{1000 \cdot 0,292 \cdot 0,216} = 7,0 \text{ (sek)}$$

Koorema pidurdusteguri määramine teostatakse valemi 36 kaudu:

$$\sigma_p = \frac{6 \cdot 6,9 \cdot 2 + 7,0 \cdot 4 \cdot 46}{150 + 46 \cdot (24,5 + 69,5)} = \frac{6 \cdot 6,9 \cdot 2 + 7,0 \cdot 4 \cdot 46}{150 + 46 \cdot (24,5 + 69,5)} = \frac{82,8 + 1288}{150 + 4324} = \frac{1307,8}{4474} \approx 0,292 \text{ (tj/T)}$$

Kaubarongi peamine eriliiklustakistusjõud vahetult peale pidurdamise algust:

$$w_1'' = 0,7 + \frac{3,0 + 0,1 \cdot 45 + 0,0025 \cdot 45^2}{23,5} = 0,7 + 0,319 + 0,215 = 1,234 \text{ (kgj/T) ehk } 12,4 \text{ (N/T)}$$

Elektriveduri peamine eriliiklustakistusjõud vahetult peale pidurdamise algust:

$$w_{0,I}' = 1,9 + 0,01 \cdot 45 + 0,0003 \cdot 45^2 = 1,900 + 0,4500 + 0,6075 \approx 2,958 \text{ (kgj/t) ehk } 29,6 \text{ (N/T)}$$

Hoppersrongi peamise eriliiklustakistusjõu massi järgi kaalutud keskmine väärtus:

$$W_{kkmI} = \frac{2,958 \cdot 150 + 1,234 \cdot (24,5 + 69,5) \cdot 46}{150 + 46 \cdot (24,5 + 69,5)} = \frac{443,7 + 5335,8}{150 + 46 \cdot (24,5 + 69,5)} = \frac{5779,5}{4474} \approx 1,292 \text{ (kj/T) ehk } 12,9 \text{ (N/T)}$$

Elektriveduri pidurdusklotsid on tehtud komposiitmaterjalidest, seega tegeliku kiiruse taandatud piduriklotside hõõrdeteguri määramine toimub valemiga 34:

$$\varphi_{kp-E,I} = 0,27 \cdot \frac{45 + 100}{5 \cdot 45 + 100} = 0,27 \cdot \frac{145}{325} \approx 0,120$$

Hoppervaguni piduriklotsid on valmistatud malmist, seega piduriklotside tegeliku kiiruse taandatud hõõrdeteguri määramine toimub valemiga 35:

$$\varphi_{Kp-V,I} = 0,36 \cdot \frac{45+150}{2 \cdot 45+150} = 0,36 \cdot \frac{195}{240} \approx 0,293$$

Kogu kaubarongi piduriklotsi hõõrdeteguri massi järgi kaalutud keskmise väärtus:

$$\varphi_{Kp,I} = \frac{0,120 \cdot 150 + 0,293 \cdot 46 \cdot (24,5 + 69,5)}{150 + 46 \cdot (24,5 + 69,5)} = \frac{18,000 + 1266,932}{4474} = \frac{1284,932}{4474} \approx 0,287$$

Rongi summaarse pidurdusjõudu määramine teostakse valemi 33 kaudu:

$$B_{TI} = 1000 \cdot \varphi_{Kp} \Sigma K_P = 1000 \cdot 0,287 \cdot 1307,8 \approx 375\,000 \text{ (kgj)}$$

Veeremi eripidurdusjõudu võib üles leida, taandades pidurdusjõudu suurus rongi massi ühele tonnile:

$$b_{TI} = \frac{375\,000}{4474} = 83,89 \text{ (kgj/T)}$$

Esimese kontantse kiirendusega lõigu pikkuse arvutamine:

$$s_{p-I} = 0,278 \cdot 45 \cdot 7 = 87,57 \text{ (m)}$$

Intervallis läbitud teepikkust ja keskmise kiiruse vähendamist arvutati valemite 39-40 kaudu:

$$\partial V_I = \frac{120 \cdot (0,0 \cdot 83,89 + 1,292 + 0,000) \cdot 3}{3600} = \frac{1,92}{10} \approx 0,1292 \text{ (km/h)}$$

$$s_{TI} = \frac{500 \cdot (45^2 - (45 - 0,13)^2)}{120 \cdot (1000 \cdot 0,8 + 0,00 \cdot 0,292 \cdot 0,216 + 1,292 + 0,000)} = \frac{500 \cdot (45^2 - 44,87^2)}{120 \cdot (0,000 + 1,292 + 0,000)} \approx 37,67 \text{ (m)}$$

Järgmise intervalli konstantse kiirendusega määratakse eelmise intervalli kiiruse langetamise olulisuse põhjal:

$$V_{II} = V_I - \partial V_I \quad w''_{II} = w''_{(V_I - \partial V_I)} \quad w'_I = w'_{(V_I - \partial V_I)}$$

$$\varphi_{Kp-E,II} = \varphi_{KpE, (V_I - \partial V_I)} \quad \varphi_{Kp-V,II} = \varphi_{KpV, (V_I - \partial V_I)}$$

Summeerides tulemusi kõikides intervallides saadakse resulteerivat pidurdusteet ja summaarset pidurdusaega:

$$s_{ps} = \sum_1^7 (s_n) = 87,57 + 37,67 + 38,92 + 43,27 + 41,35 + 39,03 + 35,92 + 34,26 + 28,26 = 386,25 \text{ (m)}$$

$$t_{ps} = \sum_1^7 (s_n) = 3 \cdot 8 + 7 = 31 \text{ (s)}$$

Pidurdusülesande lahenduse tulemused on esitatud tabelis 4.4.

Tabel 4.4 Pidurdusülesande lahenduse tulemused

| Jrk | Intervalli kestus dt / s | Ordinaat / x | Veeremi sõidukiirus v / (km/h) | Peamine liiklustakistusjõud, w <sub>o</sub> (kgj/T) | Pidurdusklootsi taandatud hõõrdetegur φ <sub>k</sub> | Eri-pidurdusjõud b <sub>t</sub> (tj/T) | Pidurdustegur |
|-----|--------------------------|--------------|--------------------------------|---|--|--|---------------|
| 1   | 0                        | 4,800        | 45,00                          | 1,2920  | —  | —                                      | —             |
| 2   | 7                        | 4,863        | 45,00                          | 1,2920  | —  | 0,000                                  | 0,000         |
| 3   | 10                       | 4,900        | 44,87                          | 1,2900  | —  | 0,000                                  | 0,000         |



|    |    |       |       |        |       |        |       |
|----|----|-------|-------|--------|-------|--------|-------|
| 4  | 13 | 4,939 | 44,03 | 1,2780 | 0,287 | 8,389  | 0,029 |
| 5  | 16 | 4,982 | 41,86 | 1,2490 | 0,290 | 20,973 | 0,073 |
| 6  | 19 | 5,024 | 39,22 | 1,2120 | 0,292 | 25,431 | 0,088 |
| 7  | 22 | 5,063 | 36,54 | 1,1770 | 0,295 | 25,605 | 0,088 |
| 8  | 25 | 5,099 | 34,30 | 1,1490 | 0,298 | 21,558 | 0,073 |
| 9  | 28 | 5,133 | 33,32 | 1,1370 | 0,299 | 8,705  | 0,029 |
| 10 | 31 | 5,161 | 33,21 | 1,0870 | —     | 0,000  | 0,000 |

#### 4.2.3 Kõverate läbimisega põhjustatud lisaliiklustakistusjõudu määramine

Uurime rongi lisaliiklustakistusjõudu kõverate läbimisest numbriga 2520 kaubarongi näidel. Kuna see lisaliiklustakistusjõudu komponendi olulisust peamiselt sõltub pöörde sisenemise rööbaga kontakteeruva rataste pindala suurusega, on tarvis arvutada kaubarongi pikkust:

$$L_R = \sum_1^n (L_q \cdot n_q) + L_v, \quad (60)$$

kus  $L_R$  – kogu rongi pikkus, m

$L_q$  – q-tüübi vaguni pikkus, m

$n$  – q-tüübi ühesuguste vagunite arv rongis, tk

$L_R$  – elektriveduri pikkus, m

Andmed 2520 koorma vagunite koosseisust on ülesotsitavad veotöö mahtu kehtestavast dokumentidest. Erineva veeremi pikkused saab võtta veooperaatoriga esindatud lähteandmetes (vt lisa). Enne kõverate läbimisega põhineva lisaliiklustakistusjõudu olulisuse määramist tuleb arvutada rongi pikkust:

$$L_R = \sum_1^7 (L_q \cdot n_q) + L_v = 13,92 \cdot 11 + 14,73 \cdot 11 + 25,38 \cdot 7 + 12,02 \cdot 10 + 12,02 \cdot 10 + 3 \cdot 14,62 + 32,8 = 810,0 \text{ m}$$

Kasutades uuritava jaamavahe pikiprofiili analüüsi tulemusi ja kaubarongi 2520 tehnilisi parameetreid määrame rongi erilisaliiklustakistusjõudu pöörete läbimisel. Kuna vaadeldava koorema ulatus rööbaste ületab kõverate I, III ja IV pikkusi, siis antud erilisaliiklustakistusjõudu komponendi suurus nende pöörete jaoks on vaja arvutada valemi 27 kaudu:

$$W_{C,I} = \frac{700}{R_I} \cdot \frac{s_{kvI}}{l_{r2520}} = \frac{700}{1265} \cdot \frac{400}{810} \approx 0,273 \text{ kgj/T ehk } 27,3 \text{ N/T}$$

$$W_{C,III} = \frac{700}{R_{III}} \cdot \frac{s_{kvIII}}{l_{r2520}} = \frac{700}{1072} \cdot \frac{569}{810} \approx 0,459 \text{ kgj/T ehk } 45,9 \text{ N/T}$$

$$W_{C,IV} = \frac{700}{R_{IV}} \cdot \frac{s_{kvIV}}{l_{r2520}} = \frac{700}{2130} \cdot \frac{475}{810} \approx 0,193 \text{ kgj/T ehk } 19,3 \text{ N/T}$$

Kuna kõvera II pikkus ületab uuritava kaubarongi ulatust rööbaste ületab kõvera II pikkusi, siis antud erilisaliiklustakistusjõudu komponendi suurus kõvera II jaoks on tarvis määrata valemi 28 kaudu:

$$w_{c,II} = \frac{700}{2130} \approx 0,328 \text{ kgj/T ehk } 32,9 \text{ N/T}$$

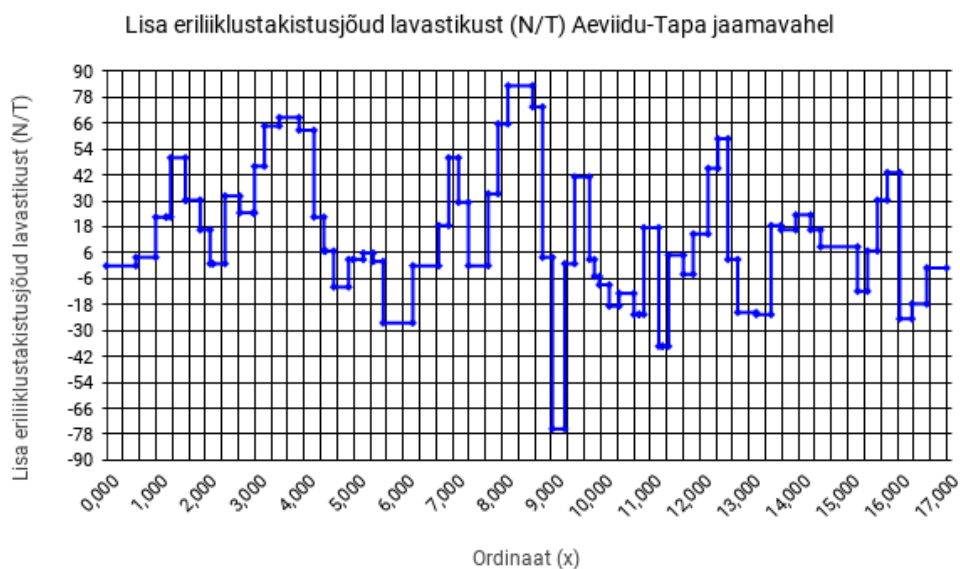
Raudteetrassis asuvate kõveratega põhjustava erilisaliiklustakistusjõudu suuruse arutamise jaoks Excel'i arvutustabelites oli koostatud abirakendus. Selle kasutaja määrab rongi pikkus normatiivse sõidugraafiku alusel ja andmeid raudteelõigu topoloogia kohta. Peale lähteadmete sisestamist abirakendu kontrollib arvutustingimusi ja valib sobivat arvutusvalemit mitmekihilise IF() loogikafunktsiooni abiga ning väljastab peamise erilisaliiklustakistusjõudu suurust kõikides käsitlevas raudteelõigus asuvate kõverate kohta. Väljavõtted esilemainitud rakendusest on esitatud lisa 11.

#### 4.2.4 Tõuste ja kaldega põhjustatud lisaliiklustakistusjõudu arutamine

Selle lisaliiklustakistusjõudu elemendi määramine toimub valemi 29 kaudu. Tuleb pöörduda tähelepanu sellele, et tõuste ja kaldega põhjustatud eriveotakistuse väärtus arvuliselt võrdub kalde elemendi suurusega selles tingimustes, et arvutuste raames koorema mass on esitatud tonnides, kalde suurus on antud promillides (rööbastee suhteline tõus raudtee 1 kilomeetri kohta), lisaeriveotakistust mõõdetakse kilogramm-jõudes rongi massi ühe tonni kohta. Uurime kaubarongi raudteetrassi lavastikuga põhjustatud lisaliiklustakistusjõudu määramist 59. Aegviidu jaama poolest asuvas profiili elemendis (vt lisa 6 ja 7):

$$w_i = \frac{W_i}{\text{mg}} = \frac{\tan(\alpha) \cdot N}{\text{mg}} = \frac{\tan(\alpha) \cdot 1000 \cdot \text{mg}}{\text{mg}} = \frac{4,4}{1000} \cdot 1000 \cdot \text{mg}}{\text{mg}} = \frac{4,4}{1000} \cdot 1000 \cdot \text{mg}}{\text{mg}} = 4,4 \text{ (kgj/T) ehk } 44 \text{ (N/T)}$$

Tõusete ja kaldetega kujundava lisaliiklustakistusjõudu suuruse sõltuvust Tapa – Aegviidu jaamavahest asuvast ordinaadist kajastab joonis 4.4.



Joonis 4.4 Lavastikuga kujundava lisaliiklustakistusjõudu suuruse sõltuvust Tapa – Aegviidu jaamavahe ordinaadist

## 4.2.5 Rongide voolutarbimisdiagramme koostamine

Rongide vooludiagrammi kujutamiseks Excel'i tarkvaras oli koostatud koondtabelid, kus maatrikskujul arvestatakse rongiliiklusedünaamikale mõjuvaid jõusid, lahendatakse peamist rongiliiklusvõrrandit, arvutatakse iseliikva veeremiga tarbitava koormusvoolu suurus ja vajaliku liiklusrežiimi tagava võimsuse suurus kõikide profiilelemendite ja konstantse kiirusega teelõigete jaoks. Uurime numer 2520 kaubarongi vooludiagrammi kujutamise põhimõtet sellele kuuluva koondtabeli fragmendi alusel (vt lisa 12).

Rongi sõiduaega, energiatarbimise aega ja regeeratiivpidurduse mööda ühe profiilelemendi või teelõigu konstantse kiirusega arvutatakse järgmise valemi kaudu:

$$t_{w,h,r} = \frac{1000 \cdot (x - x_0)}{60 \cdot \frac{1000 \cdot v}{3600}} = \frac{60 \cdot (x - x_0)}{v}, \quad (61)$$

kus  $t_{w,h,r}$  – vastavalt koorma sõiduaeg, energiatarbimiseaeg ja rekuperatiivpidurdamise kasutusaeg vaadelavas profiilelemendis, min

$x, x_0$  – vastavalt profiilelemendi või teelõigu konstantse kiirusega algus- ja lõpppunktide ordinaatide suuruste vahe

$v$  – rongi liikluskiirus vaadelavas profiilelemendis või konstantse kiirusega teelõigus, km/h

Koorma resulteeriva eriliiklustakistusjõudu arvutatakse valemiga:

$$w = w_o + w_i + w_c,$$

kus  $w$  – rongi resulteeriv eriliiklustakistusjõud, N/T

$w_o$  – rongi peamine eriliiklustakistusjõud, N/T

$w_i$  – rongi lisa eriliiklustakistusjõud tõustest ja kaldest, N/T

$w_c$  – rongi lisa eriliiklustakistusjõud kõveratest, N/T

Peale kõikide peamise rongiliiklusvõrrandi liikmete ülesleidmist võib teostada seda lahendust antud profiilelemendi kohta. Kuna vaadeldakse teelõigu konstantse kiirusega ja  $\Delta v/\Delta t$  osa on võrdne nulliga, vajaliku liiklusrežiimi tagava veojõudu saab arvutada järgmiselt:

$$F_T = m \cdot w \cdot 10^{-3}, \quad (62)$$

kus  $F_T$  – iseliikva veeremiga edastava veojõud, kN

$m$  – koorema mass, T

$w$  – rongi resulteeriva eriveotakistusjõud, N/T

Koormusvoolu väärtuse ühes profiilelemendis saab määrata voolu funktsionaalsõltuvusega veojõudust, mis oli saadud veeremi sisend-väljund karakteristikute lineaarse interpoleerimise teel:

$$I_d = A \cdot F_T + B, \quad (63)$$

kus  $F_T$  – iseliikva veeremiga edastava veojõud, kN

$I_d$  – elektrirongiga tarbitava koormusvoolu suurus, A

$A, B$  – sisend-väljund karakteristikute lineaarse interpoleerimise teel saadud empiirilised tegurid (vt lisa 8)

Tarbitud elektrienergia mahtu või ühes profiilelemendis võib arvutada valemiga:

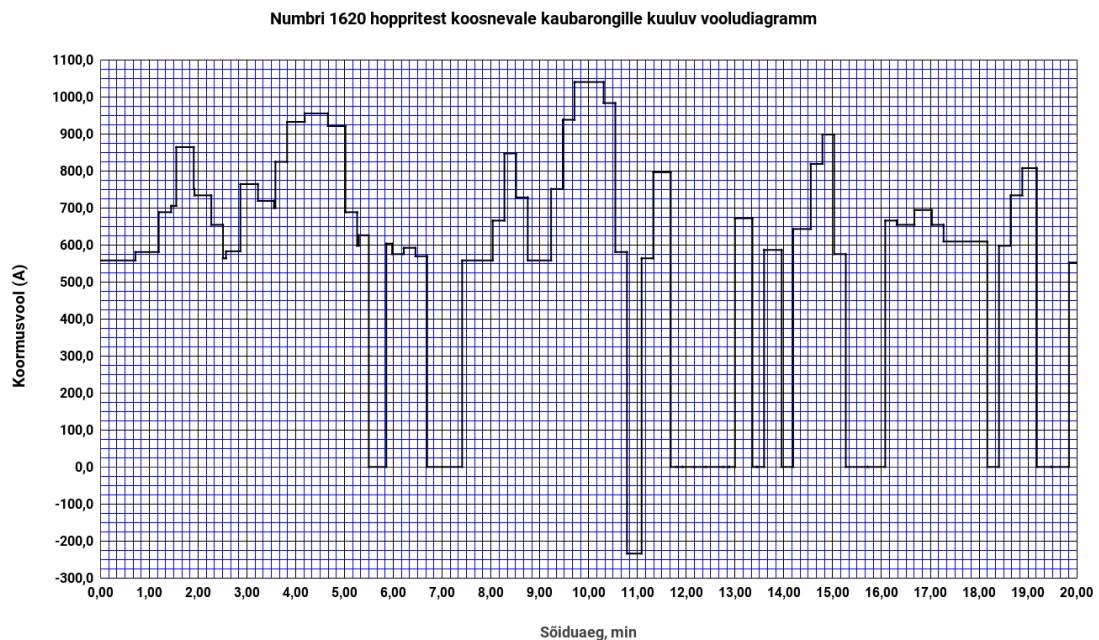
$$A_{R,W} = \frac{(t-t_0) \cdot U \cdot I_d}{60 \cdot 1000}, \quad (64)$$

kus  $I_d$  – elektrirongiga tarbitava koormusvoolu suurus, A,

$U$  – kontaktvõrgu nimipinge, V (tavaliste tingimuste korral võib kasutada väärtust 3000 V),

$A, B$  – sisend-väljund karakteristikute lineaarse interpoleerimise teel saadud empiirilised tegurid (vt lisa 8)

Joonisel 4.5 esitatakse hoppritest koosneva kaubarongi peale arvutuste sooritamist koondtabelis kujutatud vooludiagrammi.



Joonis 4.4 Hoopritest koosneva kaubarongi voolutarbimisdiagramm

### 4.3 Veovõrgu elektrilised arvutused

Koormate vooludiagrammide ja teiste avaliku raudtee normatiivses liiklusgraafikus sätestatud talitlusnäitajate põhjal kasutatakse tõenäolisusi ja determenistlikke elektritranspordi kontaktvõrgusüsteemide koormusvoolu määratlemismetoodikaid, mille raames arvutati koormusvoolu efektiiv-, keskvaartusi ja samuti selle voolu suurust lubatud ülekoormusrežiimide korral. Saadud tulemusi võrreldi teoreetiliste suuruste ja piirangutega, mis avaldas kontaktvõrgutootja antud juhtmetüübi suhtes.

### 4.3.1 Koormusvoolu suuruse eksperthinnang

Raudteeprojekterimiseeskirjas toodud empiiriliste valemite põhjal hindame [16] koormusvoolu suurust ilma veojõudude arvutuste tulemuste kasutamiseta. Keskmist eritakistusjõudu määrame rongide sõidukiiruse ja maksimaalse tõusu suuruse alusel lineaarse interpoleerimise kaudu:

$$i_{e,teg} = \frac{8,5-8,0}{8,0-10,00} \cdot (i_{(e,8\%)} - i_{(e,10\%)}) + i_{(e,8\%)} = 1,2 + 0,1 = 1,3 \%$$

$$W_{o, r\text{ng } 2214} = \frac{50 - 46,4}{50 - 40} \cdot (W_{(50\text{km/h})} - W_{(40\text{ km/h})}) + W_{(40\text{ km/h})} = 25 + 0,64 \cdot (25-28) = 26,92 \text{ N/t}$$

Teoreetiline elektrienergia tabrimissuurust arvutatakse 1 kilomeetri kaugusele edastatud 1 koorma massi ühele tonnile taandatud elektrienergia erikulu, rongi massi ja sõidukiiruse alusel:

$$a_{\text{rng } 2214} = 4 \cdot (i_{e,teg} + W_{o, r\text{ng } 2214}) = 4 \cdot (1,3 + 26,92) = 112,880 \text{ (Wt)/(km}\cdot\text{T)}$$

$$A_{\text{rng } 2214} = a_{\text{rng } 2214} \cdot L \cdot m_{\text{rng } 2214} \cdot 10^{-3} = 112,880 \cdot 17,000 \cdot 2129,40 \cdot 10^{-3} = 4086,233 \text{ kWt}$$

Tabel 4.5 Teoreetiline rongitega tarbitud elektrienergia maht

| Rongi number              | Koorma sõidukiirus v / (km/h) | Rongi brutto mass m / t | Rongi eriveotakis tusjõud w / (N/t) | Tarbimise erimaht A / (Wt/T·km) | Koorma sõiduaeg T / min | Teoreetiline elektrienergia kulu A /kWt |
|---------------------------|-------------------------------|-------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|-------------------------|---|
| 1620                      | 50,2                          | 1449                    | 28,06                               | 16,42                           | 20,32                   | 404,57                                  |
| 2010                      | 48,2                          | 1992,4                  | 27,46                               | 16,18                           | 21,16                   | 548,17                                  |
| 2520                      | 43,2                          | 2047,8                  | 25,96                               | 15,58                           | 23,61                   | 542,52                                  |
| 2020                      | 43,2                          | 1929,4                  | 25,96                               | 15,58                           | 23,61                   | 511,15                                  |
| 2124                      | 43,2                          | 1817                    | 25,96                               | 15,58                           | 23,61                   | 481,37                                  |
| 1610                      | 43,2                          | 1449                    | 25,96                               | 15,58                           | 23,61                   | 383,88                                  |
| 3132-solvent              | 50,2                          | 1115,6                  | 28,06                               | 16,42                           | 20,32                   | 311,48                                  |
| 2128                      | 41,8                          | 1822                    | 25,54                               | 15,42                           | 24,40                   | 477,50                                  |
| 2014                      | 43,2                          | 1484                    | 25,96                               | 15,58                           | 23,61                   | 393,15                                  |
| 2514-amber                | 40,5                          | 3490                    | 25,15                               | 15,26                           | 25,19                   | 905,38                                  |
| 2016/3540                 | 40,5                          | 1454                    | 25,15                               | 15,26                           | 25,19                   | 377,20                                  |
| 3010                      | 40,5                          | 1186,1                  | 25,15                               | 15,26                           | 25,19                   | 307,70                                  |
| 2212                      | 40,5                          | 2044                    | 25,15                               | 15,26                           | 25,19                   | 530,25                                  |
| 3444                      | 41,8                          | 1312                    | 25,54                               | 15,42                           | 24,40                   | 343,84                                  |
| 3012                      | 39,2                          | 1375,5                  | 25,00                               | 15,20                           | 26,02                   | 355,43                                  |
| 2282                      | 46,4                          | 1992,4                  | 26,92                               | 15,97                           | 21,98                   | 540,85                                  |
| 2122                      | 40,5                          | 2044                    | 25,15                               | 15,26                           | 25,19                   | 530,25                                  |
| 2214-pikk                 | 46,4                          | 2129,4                  | 26,92                               | 15,97                           | 21,98                   | 578,04                                  |
| 2018                      | 48,2                          | 2044                    | 27,46                               | 16,18                           | 21,16                   | 562,36                                  |
| 2522                      | 43,2                          | 1992,4                  | 25,96                               | 15,58                           | 23,61                   | 527,84                                  |
| <b>Kogu rongide jaoks</b> |                               |                         |                                     |                                 | <b>469,348</b>          | <b>9612,935</b>                         |

Hindame koormusvoolu suurust teoreetilise rongitega tarbitava elektrienergia alusel:

$$I = \frac{A \cdot 60 \cdot 10^3}{U \cdot T} = \frac{9612,935 \cdot 10^3 \cdot 60}{3000,00 \cdot 469,348} \approx 409,63 \text{ (A)}$$

Koormusvoolu väärtuse hinnangu alusel saab eelnevalt valida kontaktvõrgu juhtme tüübi ja sellele vastava ristlõikepindalat. Maksimaalse koormusvoolu piirangu tuleb valida mõistliku varustusteguriga, sest rongitega tarbitavat voolu kesmist suurust hinnati empiirilistes valemities põhineva ebatäpse meetodika raames. Peale seda soojuslikku toimet kujundava koormusvoolu efektiivväärtus on tavaliselt suurem kui eksperthinnangu kaudu saadud selle voolu keskvaartus. Tabelis 4.6 on esitatud maksimaalse koormusvoolu piirangud erinevate kontaktvõrgujuhtmete markide ja ristlõikepindalate kohta.

| Juhtme mark | Suureim lubatud vool amprites suvise talitlusrežiimil voolu kestuse korral, min |           |          |
|-------------|---|-----------|----------|
|             | 20 minutit ja rohkem  | 3 minutit | 1 minut  |
| MΦ-85       | 540   | 740       | 1380     |
| MΦ-100      | 600   | 800       | 1500     |
| M-93        | 600   | 800       | 1500     |
| M-120       | 650   | 860       | 1600     |
| ПБСМ-70     | 350/310   | 450/380   | 940/740  |
| ПБСМ-95     | 410/335   | 500/420   | 1040/800 |
| A-150       | 500   | 650       | 1200     |
| A-185       | 590   | 800       | 1500     |
| AC-150      | 500   | 650       | 1200     |
| AC-185      | 590   | 800       | 1500     |
| C-70        | 85  | 85        | 85       |

Aegviidu-Tapa jaamavahe veomahtu analüüsi ja kiirmeetodiga tehtud koormusvoolu suuruse eksperthinnangu alusel võib oletada, et selle kontaktvõrgu rajamise raames selle raudteelõigu elektrifikatsiooni raames sobiks suurendatud voolu väljavõtmispindalaga tüübi MF-85 vasest valmistatud kontaktjuht, mille ristlõikepindala saavutab 85 mm<sup>2</sup>. Erinevate kontaktvõrgujuhtmete pikkeritakistused alalisvoolule normaaltingimustel on esitatud tabelis 4.7.

Tabel 4.7 Erinevate kontaktvõrgujuhtmete pikkeritakistused.

| Kontaktjuhtme mark | Kontaktjuhtme pikkeritakistus R <sub>0</sub> / (Ω/km) |
|--------------------|---|
| MΦ-65              | 0,275   |
| НЛФ-65             | 0,285   |
| MΦ-85              | 0,208   |
| НЛФ-85             | 0,218   |
| БрФ-85             | 0,229   |

|                             |       |
|-----------------------------|-------|
| МФ-100 (МФО-100)            | 0,176 |
| НЛФ-100 (НЛФО-100)          | 0,185 |
| БрФ-100 (БрФО-100)          | 0,205 |
| МФ-120 (МФО-120)            | 0,148 |
| НЛФ-120 (НЛФО-120)          | 0,154 |
| Terasvask CM-85             | 0,530 |
| Terasvask CM-100            | 0,450 |
| Terasalumiinium ПККА 80/180 | 0,190 |

Väljavalitud kontaktvõrgu juhtmete ristlõikepindala tuleb kontrollida täpsemate tõenäosusliku ja determenisliku veovõrgu arvutusmeetmete raames.

### 4.3.2 Ühtlaselt hajutatud koormuse meetod

Pikkerikoormuse väärtuse määramise jaoks on vaja arvutada mööda käsitleva jaamavahe läbisõitvate koormate summaarset sõiduaega ja kõikide koormatega tarbitud elektrienergia mahtu. Algandmed pikkierikoormuse suuruse üldistatud analüütilise meetodi raames on eitatud tabelis 4.8.

Tabel 4.8 Mööda käsitleva raudteelõigu rongide sõiduaeg ja tarbitud elektrienergia maht

| Rongi number | Tarbitud elektrienergia maht,<br>A / kW/h | Elektrienergia tarbimiseaeg,<br>T / min |
|--------------|---|---|
| 1620,00      | 540,733                                   | 20,32                                   |
| 2010,00      | 606,690                                   | 21,16                                   |
| 2520,00      | 258,958                                   | 23,61                                   |
| 2020,00      | 231,117                                   | 23,61                                   |
| 2124,00      | 227,055                                   | 23,61                                   |
| 1610,00      | 187,559                                   | 23,61                                   |
| 3132-solvent | 260,353                                   | 20,32                                   |
| 2128,00      | 261,356                                   | 24,40                                   |
| 2014,00      | 150,181                                   | 23,61                                   |
| 2514-amber   | 368,351                                   | 25,19                                   |
| 2016/3540    | 145,201                                   | 25,19                                   |
| 3010,00      | 75,102                                    | 25,19                                   |
| 2212,00      | 266,638                                   | 25,19                                   |
| 3444,00      | 172,811                                   | 24,40                                   |
| 3012,00      | 287,278                                   | 26,02                                   |
| 2282,00      | 611,287                                   | 21,98                                   |
| 2122,00      | 266,638                                   | 25,19                                   |

|                           |                 |                |
|---------------------------|-----------------|----------------|
| 2214-pikk                 | 647,199         | 21,98          |
| 2018,00                   | 616,096         | 21,16          |
| 2522,00                   | 272,717         | 23,61          |
| <b>Kogu rongide jaoks</b> | <b>6453,317</b> | <b>469,348</b> |

Valemi 1 alusel määrame pikkerivoolu väärtust:

$$j = \frac{6453,317 \cdot 10^3 \cdot 60}{3000,000 \cdot 469,348 \cdot 17,000} \approx 16,18 \text{ (A/km)}$$

Ühe toidefiidri keskmine koormusvool kahe-suunalise toide korral võib üles leida valemiga 2:

$$I_F = \frac{16,180 \cdot 17,000}{2} \approx 137,53 \text{ (A)}$$

Kahest sarnastest voolukomponentides sümmeetrilise toidesüsteemi korral ühe veokoormusega tarbitava voolu keskvärtus võrdub kahekordistatud toidefiidri keskmise koormusvooluga – 275,06 (A).

### 4.3.3 Ühtlaselt hajutatud koormuse meetod

Valemite 5-7 kaudu rongide vooludiagrammide alusel arvutati koormusvoolu keskmist-, efektiivväärtusi ja avaldise 9 põhjal nende koormussvoolu mõõtesuuruste suhet. Valemi 10 kaudu veotöö mahtu alusel taandati erinevate koormate liiklustihedus ühele arvutuslikule tunnile. Nende väärtuste arvutustulemused koormate vooludiagrammide põhjal on esitatud tabelis 4.9

$$I_{K-1620} = \frac{10814,657}{20,32} \approx 532,217 \text{ (A)} \quad I_{ef-1620} = \sqrt{\frac{1}{20,32} \cdot 7998870,257} \approx 627,411 \text{ (A)}$$

$$K_{E-1620} = \frac{I_{ef-1620}}{I_{K-1620}} = \frac{627,411}{532,217} \approx 1,179$$

$$n_{1620} = \frac{2 \cdot 1,17}{24 \cdot 50,2} \approx 0,0282 \text{ (rongipaari tunnis)}$$

Tabel 4.9 Rongitega tarbitava voodue efektiiv- ja keskvärtused

| Rongi number | Koorma sõidukiirus (km/h) | Koorma sõiduaeg (min) | Liiklustihedus (rongipaar/h) | I <sub>kesk</sub> (A) | I <sub>efektiiv</sub> (A) | K <sub>e</sub> |
|--------------|---------------------------|-----------------------|------------------------------|-----------------------|---------------------------|----------------|
| 1620         | 50,2                      | 20,32                 | 0,0282                       | 532,251               | 627,431                   | 1,179          |
| 2010         | 48,2                      | 21,16                 | 0,0294                       | 573,381               | 685,898                   | 1,196          |
| 2520         | 43,2                      | 23,61                 | 0,0328                       | 219,352               | 366,598                   | 1,671          |
| 2020         | 43,2                      | 23,61                 | 0,0328                       | 195,769               | 342,718                   | 1,751          |
| 2124         | 43,2                      | 23,61                 | 0,0328                       | 192,329               | 333,546                   | 1,734          |
| 1610         | 43,2                      | 23,61                 | 0,0328                       | 158,874               | 289,553                   | 1,823          |
| 3132-solvent | 50,2                      | 20,32                 | 0,0282                       | 256,269               | 310,435                   | 1,211          |
| 2128         | 41,8                      | 24,40                 | 0,0339                       | 214,209               | 349,062                   | 1,630          |
| 2014         | 43,2                      | 23,61                 | 0,0328                       | 126,880               | 258,365                   | 2,036          |
| 2514-amber   | 40,5                      | 25,19                 | 0,0350                       | 292,514               | 478,055                   | 1,634          |



|           |      |       |        |         |         |       |
|-----------|------|-------|--------|---------|---------|-------|
| 2016/3540 | 40,5 | 25,19 | 0,0350 | 115,306 | 242,081 | 2,099 |
| 3010      | 40,5 | 25,19 | 0,0350 | 59,639  | 172,167 | 2,887 |
| 2212      | 40,5 | 25,19 | 0,0350 | 211,742 | 363,340 | 1,716 |
| 3444      | 41,8 | 24,40 | 0,0339 | 141,637 | 233,842 | 1,651 |
| 3012      | 39,2 | 26,02 | 0,0361 | 220,810 | 375,951 | 1,703 |
| 2282      | 46,4 | 21,98 | 0,0305 | 556,151 | 675,975 | 1,215 |
| 2122      | 40,5 | 25,19 | 0,0350 | 211,742 | 363,340 | 1,716 |
| 2214-pikk | 46,4 | 21,98 | 0,0305 | 588,824 | 706,702 | 1,200 |
| 2018      | 48,2 | 21,16 | 0,0294 | 582,271 | 697,029 | 1,197 |
| 2522      | 43,2 | 23,61 | 0,0328 | 231,007 | 374,361 | 1,621 |

Veojõudude arvutuste põhjal määrame valemite 11-13 kaudu arvutuste teostamise jaoks vajalikke arvsummasid moodustavate liikmete väärtusi.

Tabel 4.10 Arvsummasid moodustavate liikmete väärtusi

| Rongi number              | $(i_j \cdot n_j)^2, A^2$ | $(i^2 \cdot n_j) \cdot (1.33 \cdot K_E^2 - 1), A^2$ | $(i^2 \cdot n_j) \cdot (2.00 \cdot K_E^2 - 1), A^2$ |
|---------------------------|--------------------------|---|---|
| 1620                      | 15,020                   | 6781,095  | 14224,488   |
| 2010                      | 16,852                   | 8727,525  | 17991,875   |
| 2520                      | 7,193                    | 4283,721  | 7236,547  |
| 2020                      | 6,420                    | 3866,009  | 6446,684  |
| 2124                      | 6,307                    | 3639,261  | 6083,652  |
| 1610                      | 5,210                    | 2828,995  | 4671,103  |
| 3132-solvent              | 7,232                    | 1763,718  | 3585,849  |
| 2128                      | 7,260                    | 3937,078  | 6703,831  |
| 2014                      | 4,161                    | 2383,477  | 3850,120  |
| 2514-amber                | 10,232                   | 7639,119  | 12995,146   |
| 2016/3540                 | 4,033                    | 2261,302  | 3634,738  |
| 3010                      | 2,086                    | 1254,583  | 1949,267  |
| 2212                      | 7,407                    | 4573,453  | 7667,411  |
| 3444                      | 4,800                    | 1784,924  | 3026,603  |
| 3012                      | 7,980                    | 5031,489  | 8453,797  |
| 2282                      | 16,980                   | 9111,541  | 18458,843   |
| 2122                      | 7,407                    | 4573,453  | 7667,411  |
| 2214-pikk                 | 17,978                   | 9694,533  | 19910,910   |
| 2018                      | 17,114                   | 9027,282  | 18594,754   |
| 2522                      | 7,575                    | 4362,477  | 7441,686  |
| <b>Kogu rongide jaoks</b> | <b>179,248</b>           | <b>97525,035</b>                                    | <b>180594,716</b>                                   |

Pandes saadud arvusummade väärtusi valemitesse 11-13, võib määrata kontavõrgu talitlusnäitajaid üldistatud analüütilise meetodi raames:

$$I_{F,K} = \frac{1}{2} \cdot 179,248 \approx 89,624 \text{ (A)}$$

$$I_{F,ef} = \sqrt{\left(\frac{1}{2} \cdot \sum_1^n (i_j \cdot n_j)\right)^2 + \frac{1}{4} \left(\sum_1^n (i^2 \cdot n_j) \cdot (1.33 \cdot K_E^2 - 1)\right)} =$$

$$= \sqrt{\left(\frac{1}{2} \cdot 179,248\right)^2 + \frac{1}{4} \cdot 972525,035} \approx 180 \text{ (A)}$$

Sarnastest voolukomponentides sümmeetrilise toidesüsteemi korral ühe veokoormusega tarbitava voolu kesk- ja efektiivväärtus on võrsed kahekordistatud toidefiidri keskmise ja efektiivse koormusvooluga – vastavalt 179,25 ja 360,00 (A).

#### 4.3.4 Tõenäosuslik meetod

Enne koormusvoolu juhusliku suuruse jaotusdiagrammi koostamist tuleb üles leida selle voolu maksimaalseid ja minimaalseid väärtusi iga korma jaoks Excel'i arvutustabelistes koostatud vooludiagrammides käskude MIN() JA MAX() kaudu. Koormusvoolu suureimad ja väikseimad suurused iga mööda vaadeldavat jaamavahet läbisõitvate rongide kohta on esitatud tabelis 1.

Tabel 4.11 Rongide vooludiagrammides esindavad suureimad ja väikseimad koormusvoolu väärtusi

| Rongi number | Maksimaalne koormusvool, (A) | Minimaalne koormusvool, (A) |
|--------------|------------------------------|-----------------------------|
| 1620         | 1040,2                       | -234,3                      |
| 2010         | 1219,9                       | -367,3                      |
| 2520         | 851,7                        | -395,6                      |
| 2020         | 807,9                        | -373,5                      |
| 2124         | 780,2                        | -341,9                      |
| 1610         | 677,8                        | -247,3                      |
| 3132-solvent | 640,9                        | -170,0                      |
| 2128         | 796,3                        | -354,4                      |
| 2014         | 643,5                        | -291,7                      |
| 2514-amber   | 1194,8                       | 0,0                         |
| 2016/3540    | 616,6                        | -238,5                      |
| 3010         | 503,3                        | 224,7                       |
| 2212         | 846,1                        | -350,2                      |
| 3444         | 565,5                        | -241,5                      |
| 3012         | 875,5                        | -331,4                      |
| 2282         | 1214,2                       | -372,2                      |
| 2122         | 846,1                        | -350,2                      |

|                             |               |               |
|-----------------------------|---------------|---------------|
| 2214-pikk                   | 1272,8        | -396,4        |
| 2018                        | 1243,8        | -375,0        |
| 2522                        | 853,4         | -367,3        |
| <b>Kogu koormate hulgas</b> | <b>1272,8</b> | <b>-396,4</b> |

Päringud näitavad, et kõigetes vaatluse all olevates rongide vooludiagrammides minimaalne ja maksimaalne koormusvoolu suurused saavutavad vastavalt 1272,8 ja -396,4 A. Kuna arvutusliku ööpäevase töövahetuse jooksul läbisõitvate rongide kogus on võrdne 37, ruutjuur millest asub 6 ja 7 vahel, siis valemi 14 kaudu ühe vooluintervalli pikkust jaotusdiagrammi jaoks määratakse järgmiselt:

$$I_Q = \frac{I_{MAX} - I_{MIN}}{\sqrt{n}} = \frac{1272,8 - (-396,4)}{\sqrt{37}} \approx \frac{1669,2}{6} \approx 278,2 \text{ A}$$

Koormusvoolu intervallide piirid on ülesotsitavad järgmise avaldise abiga:

$$I_{Q(I-II)} = I_{MAX} - (1 \cdot I_Q) = 1278,2 - 1 \cdot 278,2 = 994,6 \text{ (A)}$$

$$I_{Q(II-III)} = I_{MAX} - (2 \cdot I_Q) = 1278,2 - 2 \cdot 278,2 = 716,4 \text{ (A)}$$

$$I_{Q(III-IV)} = I_{MAX} - (3 \cdot I_Q) = 1278,2 - 3 \cdot 278,2 = 438,2 \text{ (A)}$$

$$I_{Q(IV-V)} = I_{MAX} - (4 \cdot I_Q) = 1278,2 - 4 \cdot 278,2 = 160,0 \text{ (A)}$$

$$I_{Q(V-VI)} = I_{MAX} - (5 \cdot I_Q) = 1278,2 - 5 \cdot 278,2 = -118,2 \text{ (A)}$$

Käsitleva vooludiagrammi vahemikkude keskmised esindajad arutatakse valemiga 16:

$$I_{Q(I/2)} = I_{Q(I-II)} + \frac{I_Q}{2} = 994,6 + \frac{278,2}{2} = 1133,7 \text{ (A)}$$

$$I_{Q(II/2)} = I_{Q(II-III)} + \frac{I_Q}{2} = 716,4 + \frac{278,2}{2} = 855,5 \text{ (A)}$$

$$I_{Q(III/2)} = I_{Q(III-IV)} + \frac{I_Q}{2} = 438,2 + \frac{278,2}{2} = 577,3 \text{ (A)}$$

$$I_{Q(IV/2)} = I_{Q(IV-V)} + \frac{I_Q}{2} = 160,0 + \frac{278,2}{2} = 299,1 \text{ (A)}$$

$$I_{Q(V/2)} = I_{Q(V-VI)} + \frac{I_Q}{2} = -118,2 + \frac{278,2}{2} = 20,9 \text{ (A)}$$

$$I_{Q(VI/2)} = I_{MIN} + \frac{I_Q}{2} = -396,4 + \frac{278,2}{2} = -230,3 \text{ (A)}$$

Loogikaoperaatori If rakendamisega vooludiagrammide põhjal määrame summarseid ajavahemikkude kestusi, millal koormaga tarbitava voolu suurus sattus iga jaotusdiagrammi intervalli.

Vooludiagrammide uuringu põhjal koostati tabelit 4.12, mis näitab vooluvahemikkude kestmisjaotus.

Tabel 4.12 Jaotusdiagrammi vooluvahemikkude ajaline kestmisjaotus

| Intervalli number            |               | I   | II     | III     | IV      | V        | VI       |
|------------------------------|---------------|---|--------|---------|---------|----------|----------|
| Intervali ülemine piir / (A) |               | 1272,8  | 994,6  | 716,4   | 438,2   | 160,0    | (-118,0) |
| Intervali alumine piir / (A) |               | 994,6   | 716,4  | 438,2   | 160,0   | (-118,0) | (-396,4) |
| Rongi number                 | Sõiduaeg, min | Koormusvoolu väärtuse kestus antud intervallis, min |        |         |         |          |          |
| 1620                         | 20,32         | 0,598   | 5,408  | 9,442   | 0,0000  | 4,571    | 0,299    |
| 2010                         | 21,16         | 2,614   | 4,668  | 8,932   | 0,0000  | 4,637    | 0,311    |
| 2520                         | 23,61         | 0,000   | 1,528  | 4,792   | 3,7500  | 12,917   | 0,625    |
| 2020                         | 23,61         | 0,000   | 0,972  | 4,669   | 3,4556  | 13,889   | 0,625    |
| 2124                         | 23,61         | 0,000   | 0,694  | 4,653   | 3,7500  | 14,167   | 0,347    |
| 1610                         | 23,61         | 0,000   | 0,000  | 4,931   | 2,9167  | 15,417   | 0,347    |
| 3132-solvent                 | 20,32         | 0,000   | 0,000  | 3,108   | 13,0578 | 3,708    | 0,446    |
| 2128                         | 24,40         | 0,000   | 1,005  | 4,826   | 5,0067  | 12,919   | 0,646    |
| 2014                         | 23,61         | 0,000   | 0,000  | 3,611   | 2,9861  | 16,667   | 0,347    |
| 2514-amber                   | 25,19         | 1,630   | 2,815  | 4,222   | 2,0741  | 14,444   | 0,000    |
| 2016/3540                    | 25,19         | 0,000   | 0,000  | 3,852   | 2,5926  | 18,370   | 0,370    |
| 3010                         | 25,19         | 0,000   | 0,000  | 1,630   | 2,2222  | 20,963   | 0,370    |
| 2212                         | 25,19         | 0,000   | 1,630  | 5,407   | 3,1111  | 14,484   | 0,553    |
| 3444                         | 24,40         | 0,000   | 0,000  | 2,727   | 8,3541  | 12,962   | 0,359    |
| 3012                         | 26,02         | 0,000   | 2,908  | 4,918   | 2,3526  | 15,459   | 0,383    |
| 2282                         | 21,98         | 2,716   | 4,849  | 8,761   | 0,0000  | 5,334    | 0,323    |
| 2122                         | 25,19         | 0,000   | 1,630  | 5,407   | 3,1111  | 14,484   | 0,553    |
| 2214-pikk                    | 21,98         | 3,103   | 5,366  | 8,373   | 0,0000  | 4,817    | 0,323    |
| 2018                         | 21,16         | 2,614   | 5,041  | 8,558   | 0,0000  | 4,637    | 0,311    |
| 2522                         | 23,61         | 0,000   | 1,806  | 4,792   | 3,8889  | 12,607   | 0,518    |
| <b>Kogu koormate hulgas</b>  | 469,348       | 13,275  | 40,320 | 107,610 | 62,6294 | 237,452  | 8,057    |

Koormusvoolu vaadeldavasse intervallisse sattumistõenäolisus määratakse valemiga 15:

$$P(Q I) = \frac{13,275}{469,348} \approx 0,0283$$

$$P(Q II) = \frac{40,320}{469,348} \approx 0,0859$$

$$P(Q III) = \frac{107,610}{469,348} \approx 0,2293$$

$$P(Q IV) = \frac{62,629}{469,348} \approx 0,1334$$

$$p(QV) = \frac{237,452}{469,348} \approx 0,5059$$

$$p(QVI) = \frac{8,057}{469,348} \approx 0,0172$$

Uuritava suuruse statistilist keskmist ja teist algmomemdi arvutatakse vastavalt valemite 17 ja 18 kaudu:

$$m_X^* = \sum_1^{\sqrt{n}} (I_{Q(i/2)} \cdot p_{iQ}) = 1133,7 \cdot 0,0283 + 855,5 \cdot 0,0859 + 577,3 \cdot 0,2293 + 299,1 \cdot 0,1334 + 20,9 \cdot 0,5059 + (-257,2) \cdot 0,0172 = 283,99 \text{ (A)}$$

$$a_2^* = \sum_1^{\sqrt{n}} ((I_{Q(i/2)})^2 \cdot p_{iQ}) = 1133,7^2 \cdot 0,0283 + 855,5^2 \cdot 0,0859 + 577,3^2 \cdot 0,2293 + 299,1^2 \cdot 0,1334 + 20,9^2 \cdot 0,5059 + (-257,2)^2 \cdot 0,0172 = 188\,954,71 \text{ (A}^2\text{)}$$

Koormusvoolu dispersioon määratakse avaldise 19 kaudu:

$$D_X^* = a_2^* - (m_X^*)^2 = 188\,954,71 - 283,99^2 = 108\,304,39 \text{ (A}^2\text{)}$$

Käsiltevat juhuslikku suurust kirjeldav jaotusseadus tingimuste 20 ja 21 põhjal:

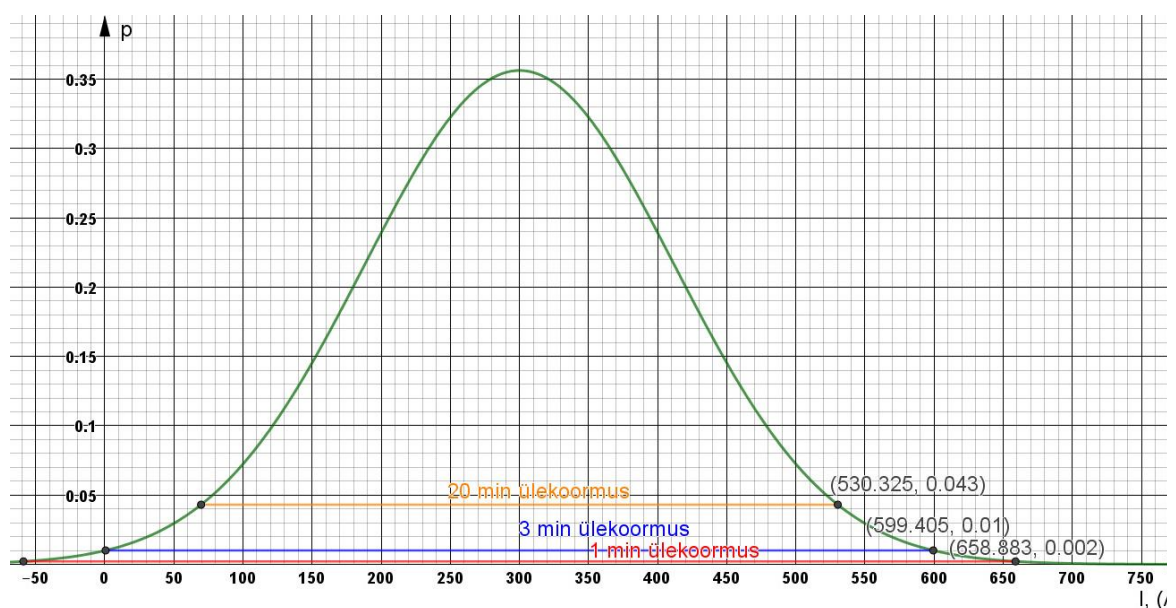
$$m = m_X^* = 283,99 \text{ (A)}$$

$$\sigma = \sqrt{D_X^*} = \sqrt{108\,304,39} \approx 329,10 \text{ (A)}$$

Koormusvoolu juhusliku suuruse matemaatiline representatsioon valemi 22 alusel:

$$F(x) = \frac{1}{329,1 \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-283,99)^2}{2 \cdot 108\,304,39}}$$

Saadud jaotusfunktsiooni dispersiooni väärtus ületab aritmeetilise keskmise suurust, mis näitab koormusvoolu suurt hajuvust. Kuna koormusvoolu ekstreemalsete väärtuste esinemissagedus äärmistes intervallides ei ületa 5%, võib oletada, et nende kujundamist põhjustasid arvutusvead vooludiagrammide koostamise korral, seega saab piirata koormusvoolu määramispiirkonna ja ümberarvutada jaotusseaduse parameetreid äärmiseid voolupiirkondi mitte arvestades.



Joonis 4.5 Koormusvoolu piiratud jaotusfunktsioon: p – esinemistõenäolisus, I – koormusvoolu väärtus

Joonis 4.5 kajastab Geogebra tarkvaras koostatud koormusvoolu juhuslikku suurust kirjeldav tõenäolisuskarakteristik peale voolu määramispiirkonna piiramist. On tarvis hinnata 1-, 3- ja 20-minutiliste ülekoormusrežiimide maksimaalse koormusvoolu väärtust piiratud ja esialgse jaotusseaduste põhjal. Enne ülekoormusvoolu suuruse määramist on vaja valemi 15 kaudu üles leida nende režiimide esinemistõenäolisust vaadeldaval raudteesüsteemi talitusperioodi kestel:

$$P(1 \text{ min}) = \frac{1.000}{469.348} \approx 0,0021$$

$$P(3 \text{ min}) = \frac{3.000}{469.348} \approx 0,0064$$

$$P(20 \text{ min}) = \frac{20.000}{469.348} \approx 0,0426$$

Maksimaalse ülekoormusvoolu suuruse hindamiseks korral esialgse jaotusfunktsiooni põhjal kasutame käsku NORMINV() Exceli arvutustabelites. Voolu väärtuse erinevate ülekoormusrežiimide korral määramise jaoks piiratud jaotusfunktsiooni alusel Geogebra tarkvaras võib ülesleida tõenäolisuskarakteristiku ja abijoonel lõikepunkti, mille ordinaat võrdub vaadeldava ülekoormusrežiimi esinemistõenäolisuse väärtusega.

Tabelis võrreldatakse esialgse ja piiratud jaotusfunktsiooni alusel määratud maksimaalse koormusvoolu suurust erinevate ülekoormusrežiimide korral.

Tabel 4.13 Maksimaalne ülekoormusvoolu suurus erinevate jaotusfunktsioonide korral.

| <b>Ülekoormusrežiim</b> | <b>Maksimaalse voolu väärtus piiratud jaotusfunktsiooni alusel, A</b> | <b>Maksimaalse voolu väärtus esialgse jaotusseaduse alusel, A</b> |
|-------------------------|---|---|
| 1 min                   | 658,9   | 656,3   |
| 3 min                   | 599,4   | 535,1   |
| 20 min                  | 530,3   | 282,3   |

Erinevate jaotusfunktsioonide põhjal saadud koormusvoolu suuruste omavaheline võrdlemine näitab, et voolu juhusliku suuruse määramispiirkonna piiramine põhjustas olematu üheminutilise ülekoormuse väärtuse muutmist ohutu piirkonnas, kolmeminutilise ülekoormusvoolu suuruse nihkumist suurendamist suunas ja olulise 20-minutilise ülekoormusvoolu väärtuse suurendamist

### 4.3.5 Erinevate meetmete kaudu saadud tulemuste omavaheline võrdlemine

Peale erinevate kontakvõrgu dimensioneerimismeetmete rakendamist koostati koonddtabelit 4.14, kus erinevate meetmete raames saadud tulemusi võrreldatakse omavahel, teoreetiliste suuruste ja piirangutega, mis avaldas kontakvõrgutootja valitud juhtmetüübi suhtes.

Tabel 4.14 Maksimaalne ülekoormusvoolu suurus erinevate jaotusfunktsioonide korral.

|  | Koormusvoolu keskvärtus / A | Koormusvoolu efektiivvärtus / A | 20 min I max/ A | 3 min I max/ A | 1 min I max / A |
|--|-----------------------------|---------------------------------|-----------------|----------------|-----------------|
| <b>Teoreetiline eksperthinnang</b>         | 409,6                       | -                               | -               | -              | -               |
| <b>Lubatud valitud kontaktjuhtme jaoks</b> | 575,0                       | 415,0                           | 540,0           | 740,0          | 1380,0          |
| <b>Ühtlaselt hajutatud koormuse meetod</b> | 275,1                       | -                               | -               | -              | -               |
| <b>Üldistatud analüütiline meetod</b>      | 179,3                       | 360,0                           | -               | -              | -               |
| <b>Tõenäolislik meetod</b>                 | 284,0                       | 415,0                           | 282,3           | 535,1          | 656,3           |
| <b>Tõenäolislik meetod piirangutega</b>    | 300                         | -                               | 530,3           | 599,4          | 658,9           |

Teostades eksperthinnangu koormusvoolu suuruse teiste meetmete raames saadud tulemustega võrdlemist võib märgata, et teoreetiline koormusvoolu väärtus sai ülehinnatuks. Sellist teoreetilise koormusvoolu väärtuse käitumist võisid põhjustada rekuperatiivpidurdamise kasutamise mitte arvestamine ja ebahühtlane koormusvoolu tarbimine.

Võrreldes ühtlaselt hajutatud koormuse meetodi raames saadud koormusvoolu väärtuse teoreetilise voolu suuruse ja teiste meetmete raames saadud tulemustega, ühtlaselt hajutatud koormuse viisiga saadud koormusvoolu väärtust ei peeta allahinnatuks, mis ei kinnita elektrifitseeritud raudtee projekteerimisele pühendatud teaduslikes allikates esitatud hüpoteesi sellest, ühtlaselt hajutatud kontakvõrgu arvutusmeetod on kasutuskõlbatu raudteesüsteemides eriti ebahühtlase rongiliiklusega.

Võrreldes üldistatud analüütilise meetodi raames arvutatud koormusvoolu väärtuse teoreetilise voolu suuruse ja teiste meetodite kaudu saadud tulemustega, ühtlaselt hajutatud koormuse viisiga saadud koormusvoolu väärtust sai allahinnatuks, mis näitas antud meetodika tundlikkust koormate liiklustiheduse kõikumisele.

Teostades mõlemate jaotusseaduste alusel arvatud koormusvoolu suuruse teoreetilise voolu väärtuse ning teiste meetodikate kaudu saadud tulemustega võrdlemist, saadud koormusvoolu suurused asuvad teoreetilise ja mõnede teiste meetmete vahel ning ei peeta ülehinnatud ega allahinnatud, sest tõenäolisliku meetod täpselt arvestab koormate liiklustiheduse kõikumist ja regeneratiivpidurdamise kasutamist. Võrreldes deterministlikute kontaktvõrgu dimensioneerimisviisidega, tõenäolisliku meetodika rakendamine kaasnes arvutusoperatsioonide vähendamisega, kuigi selle meetodika kasutusala laiendamise jaoks tuli piirata juhusliku suuruse kirjeldava funktsiooni määramispiirkonna.

Peale tõenäolislikkude ja deterministlikkude kontaktvõrgu dimensioneerimismeetodite rakendamist saab väita, et koormusvoolu keskvärtus projekteeritud elektriraudtee lõigul kogu arvutusliku raudtee talitusperioodi ulatuses asub vahemikus 179,3 – 300,0 A.

Pärast deterministlikkude kontaktvõrgu arvutusmeetodikate ära kasutamist saab oletada, et koormusvoolu efektiivvärtus dimensioneeritud elektriraudtee lõigul kogu raudtee arvutusliku talitusperioodi sattub vahemikku 360,0 – 414,9 (A).

Kuna mõlemate jaotusfunktsioonide kaudu hinnatud maksimaalse koormusvoolu suurus 1-, 3- ja 20-minutiliste ülekoormusrežiimide korral ei ületa lubatud suurusi valitud kontaktjuhmte jaoks, võib oletada, et kontaktvõrgujuhmte ristlõikepindala dimensioneerimisülesanne oli lahendatud korrektselt.



## KOKKUVÕTE

Käesoleva diplomitöö peamiseks eesmärgiks peetakse elektrifitseeritud transpordi kontaktvõrgu parameetrite dimesioneerimismeetmete rakendatavuse analüüsi tõeliselt eksisteeriva avaliku raudteelõigu veovõrgu parameetrite määratlemise näidel. Enne selle lõputöö praktilise osa teostamist käsitleti asjakohasid teabealiikaid, mida uurivad kontaktvõrgusüsteemide koormusvoolu määratlemise meetmete puudusi, eelisi ja rekomendeerivat kasutusala. Peale seda selles dimpolmitöö osas käsitleti rongi dünaamikale mõjuvad jõusid ja nende suuruste arvutusettekirjutusi. Antud diplomitöö teoreetilise oli pühendatud raudteesüsteemide klassifikatsioonile elektrilise koormusmodeli iseärasuste järgi. Samuti kujutati tööstuslikke, avalikke ja linnalähedasi raudteesüsteeme toitvate veoalajaamade koormuse suuruse aastaajalisi, nädalapäevasi ja ööpäevalisi sõltuvusgraafikke. Kogutud materjali põhjal koostati kontaktvõrgu projekteerimisülesanne lahendamise jaoks vajalikkude algandmete loetelu, analüüsi metoodikate rakendamiseks piisavate lähteandmete mahtu ning nende mõju metoodikate täpsusele.

Antud lõputöö praktilise osa raames lahendati kontavõrgujuhtme ristlõikepindala dimensiooneermisülesannet tõesti ekstisteeriva avaliku raudteelõigu jaoks. Enne veovõrgu arvutusülesanne sooritamist toimetati lähteandete ettevalmistust, nimelt: normatiivse liiklusgraafiku alusel määrati koormate sõidukiirusi, massi, koormatust, vagunikoosseisu ja teisi vajalikke parameetreid ning jaamavahe pikiprofiili koguti tõuste, kaldete ja kõverate dimensioone kirjeldavaid suurusi. Sellele lisaks iseliiguva veeremi sisend-väljund karakteristikke aruvtuslikkude sõidukiiruste korral lineaarse interpoleerimise kaudu taandati tegelikkude koormate liikumiskiirusele.

Ettevalmistatud lähteandmetes tuginedes, iga rongi jaoks teostati veojõudude arvutusi, mille raames rakendati rongiliikluse peamist võrrandit, lahendati pidurdusülesannet, arvestati peamist liiklustakistusjõudu ning samuti kõverate ja lavastikutega põhjustatud liiklustakistusjõudu. Veoarvutuste tulemuste ja veotöö mahtu kehtestavate dokumentide alusel kujutati rongide vooludiagramme ning eelnevalt valiti kontaktvõrgujuhmtte ristlõikepindalat. Koormate vooludiagrammide ja teiste avaliku raudtee normatiivses liiklusgraafikus sätestatud talitlusnäitajate põhjal kasutati tõenäolisusi ja determenistlikke elektritranspordi kontaktvõrgusüsteemide koormusvoolu määratlemismetoodikaid, mille raames arvutati koormusvoolu efektiiv-, keskvaärtusi ja samuti selle voolu suurust lubatud ülekoormusrežiimide korral. Saadud tulemusi võrreldi teoreetiliste suuruste ja piirangutega, mis avaldas kontaktvõrgutootja antud juhtmetüübi suhtes.

Käesoleva diplomitöö praktilise osa tulemused näitasid seda, et teoreetilise koormusvoolu eksperthinnang tuli ülehinnatuks, teiste meetmete raames saadud tulemustega võrreldes. Sellist

teoreetilise koormusvoolu suuruse käitumist võib seletada rekuperatiivpidurdamise kasutamise mitte arvestamine ja ebaühtlase koormusvoolu tarbimisega.

Kuna ühtlaselt hajutatud koormuse kasutamisega antud koormusvoolu arvutusülesanne sooritamise raames ei kaasnenud allahinnatute tulemuste kujundamisega, elektrifitseeritud raudtee projekteerimisele pühendatud teaduslike allikate põhjal esitatud hüpoteesi sellest, et ühtlaselt hajutatud kontaktvõrgu arvutusmeetod on kasutuskõlbatu raudteesüsteemides eriti ebaühtlase rongiliiklusega.

Üldistatud analüütilise meetodi raames arvutatud koormusvoolu väärtus teoreetilise voolu suuruse ja teiste meetodite kaudu saadud tulemustega suhtes sai allahinnatuks, mis näitas antud meetodika tundlikkust koormate liiklustiheduse kõikumisele.

Teostades mõlemate jaotusseaduste alusel arvutatud koormusvoolu suuruse teoreetilise voolu väärtuse ning teiste meetodite kaudu saadud tulemustega võrdlemist, võib väita, et saadud koormusvoolu suurusi ei peeta ülehinnatuks ega allahinnatuks, seega tõenäolisliku meetod täpselt arvestab koormate liiklustiheduse kõikumist ja regeneratiivpidurdamise kasutamist. Juhusliku funktsiooni määramispiirkonna piirang tõenäolisliku meetodi kasutusala laiendamiseks põhjustas mingil määral dimensioneerivate väärtuse suurendamist ohutu suunas.

Kuna determenistlikkude ja tõenäolislikkude meetmete kaudu hinnatud maksimaalse koormusvoolu suurus 1-, 3- ja 20-minutiliste ülekoormusrežiimide korral ei ületa lubatud suurusi valitud MF-85 kontaktjuhtme jaoks, võib oletada, et veovõrgu elektroenergeetilised arvutused oli lahendatud korrektelt, kuigi saadud tulemuste praktilise kasutamise jaoks tuleb neid täiendavalt kooskõlastada naabritavate fiidertsoonide projektide ja kontaktvõrgu mehaanilise taluvuse dimensioneerimisega.

## SUMMARY

The main purpose of this research was to study the implementation of load current calculation methods at the electrical transport. The chosen methods were validated based on actual existing public railway system, where trains with variable technical parameters are operated. At the beginning of this diploma work the relevant literature about advantages and disadvantages of each load calculating method was studied. The features of the power loading model at the public, industrial and suburban railway systems were studied. The routine traction substation load dependence on season, weekday and part of day for each mentioned railway type were presented. Given by railway operator primary data related to train traffic and documentation describing the features of railway infrastructure were validated and prepared for the calculation of the train dynamics affecting forces. According to the analysis of the train dynamics the trainset load current diagrams were described.

Having studied load current diagrams and related train traffic documentation the most suitable catenary wire with cross-section of  $85 \text{ mm}^2$  was selected. Implementing the stochastic and deterministic calculating methods the average, effective and overloading current values were investigated. In terms of each methodics calculated values were compared with theoretical ones and also with the catenary manufacturer limitations. The calculated values have not exceeded the limitations for chosen catenary wire, hence the results highlighted that it is possible to solve the question about electric transport supply system calculations in terms of having such data amount related to train traffic information and railway infrastructure. The results of research also indicated that probability methodics implementation in similar tasks is possible only in case of limitation the determination area of probability function.

## KASUTATUD KIRJANDUS

1. Östlund, S., Electric Railway Traction. Stockholm: KTH Royal Institute of Technology, 2012. [raamat paberandjal]
2. Vuchic, V. R., Urban Transit Systems and Technology, Wiley, 2007. [raamat paberandjal]
3. Kiessling, F., Puschmann, R., Schmieder, A., Contact Lines for Electric Railways, Planning, design and implementation, Publicis, Siemens, 2001. [raamat paberandjal]
4. Марквардт, К.Г., Электроснабжение электрических железных дорог, Транспорт, Москва, 1965 [raamat paberandjal]
5. Геронимус, Б.Е., Гурвич, В.Г., Устройство монтаж и эксплуатация тяговых подстанций, Высшая школа, Москва, 1983 [raamat paberandjal]
6. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию, Том 2, Электрооборудование / Под ред. А.А. Федорова, Энергоатомиздат, Москва, 1987. [raamat paberandjal]
7. Вентцель, Е.С., Теория вероятностей, Наука, Москва, 1969. [raamat paberandjal]
8. Химмельблау, Д., Анализ процессов статистическими методами, Мир, Москва, 1973. Himmelblau, David M., Process analysis by statistical methods, John Wiley and sons, 1970. [tõlgitud raamat paberandjal]
9. Правила тяговых расчётов для поездной работы/Утверждены заместителем министра путей сообщения Ф.И. Шулешко, Транспорт, Москва: Министерство путей сообщения, 1985. [raamat paberandjal]
10. Анисимов, В.А., Анисимов, В.В., “Теория тяги поездов и тяговые расчеты”, Дальневосточный институт путей сообщения, Хабаровск, 2013. [Online] <https://sites.google.com/site/tagapoezd/home>
11. Руднев, В.С., Тяговые расчёты для магистральных железных дорог, Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ), Москва: Министерство путей сообщения РФ, 2002. [metoodiline juhend paberandjal]
12. Трофимов, М.Н., “Тяговые расчёты”, Уральский государственный институт путей сообщения, Екатеринбург: Министерство путей сообщения РФ, 2001. [metoodiline juhend paberandjal]
13. Шлеина, Е.А., “Вероятностная методика расчета расхода электроэнергии на заданный объем перевозочной работы дорог постоянного тока”, Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ), Москва: Министерство путей сообщения РФ, 1995. [teaduslik publikatsioon paberandjal]

14. Справочник по проектированию электрических сетей и электрооборудования/ Под редакцией Ю.Г. Бабыкина, Энергоатомиздат, Москва, 1991. [raamat paberkaandjal]
15. Строительные нормы и правила, часть II, раздел Д, глава 2, Железные дороги колеи 1524 мм промышленных предприятий, нормы проектирования, Государственное издательство литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, Москва: Государственный комитет по делам строительства СССР, 1963. [standardite kogumik paberkaandjal]
16. Изыскание и проектирование железных дорог/ Под редакцией И.В. Турбина, Транспорт, Москва, 1989.
17. Л. В. Балон, В. А. Браташ, М. Л. Бичуч и др, Электроподвижной состав промышленного транспорта/ Под ред. Л. В. Балона, Транспорт, 1987.
18. Илья Кузнецов, Проецирование сил, Движение по наклонной плоскости [Online] [https://ik-study.ru/ege\\_po\\_fizikie/inclined\\_plane](https://ik-study.ru/ege_po_fizikie/inclined_plane)
19. Eesti Raudtee Ida Suunda normatiivne liiklusgraafik [Online] <http://www.evr.ee/files/Liiklusgraafik-2017-18-alates--10-12-2017--Tallinn-Tapa-Narva.pdf>
20. Методическое пособие “Актуализация правил тяговых расчетов на промышленном железнодорожном транспорте”, Федеральное автономное учреждение “Федеральный центр нормирования, стандартизации и оценки соответствия в строительстве”, Министерство и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации, Москва 2016 [Online] [https://www.faufcc.ru/upload/methodical\\_materials/mp09.pdf\\_](https://www.faufcc.ru/upload/methodical_materials/mp09.pdf_)

## **LISAD**

**Lisa 1 Peamise eritakistusjõudu määramisvalemite esinevate tegurite väärtused  
erineva iseliiguga veeremi jaoks**

| Tegurid peamise eriliikustakistusjõudu määravate valemite jaoks |                                  |           |                      |           |
|---|----------------------------------|-----------|----------------------|-----------|
| Valemite esinevate tegurite väärtused                           | Sidelapidega ühendatud rööbastee |           | Keevitatud rööbastee |           |
|   | Ratasteljede arv veeremil        |           |                      |           |
|   | 4                                | 8         | 4                    | 8         |
| A   | 0,7/0,7                          | --/0,7    | 0,7/0,7              | --/0,7    |
| B   | 8/3                              | --/6      | 8/3                  | --/6      |
| C   | 0,1/0,1                          | --/0,038  | 0,08/0,09            | --/0,026  |
| D   | 0,0025/0,0025                    | --/0,0025 | 0,0020/0,0020        | --/0,0017 |

## Lisa 2 Kaubarongide numeratsioon



**Lisa 3 Aastate 2018-2019 Eesti Raudtee Ida suuna kaubarongide formeerimiskava**

## Lisa 4 Eesti Raudtee kaubarongide numeratsioon

## Lisa 5 Aegviidu-Tapa jaamavahe pikiprofil

## Lisa 6 Aegviidu-Tapa lavastiku maatriks

## Lisa 7 Series 10 iseliiguva veeremi sisend-väljund karakteristikud

| V, км/ч | I <sub>g</sub> , A |       |       |       |       |       |        |        |        |        |      |       |       |       |       |
|---------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|------|-------|-------|-------|-------|
|         | С-ПП               | С-ОП1 | С-ОП2 | С-ОП3 | С-ОП4 | СП-ПП | СП-ОП1 | СП-ОП2 | СП-ОП3 | СП-ОП4 | П-ПП | П-ОП1 | П-ОП2 | П-ОП3 | П-ОП4 |
| 9.0     | 770                | -     | -     | -     | -     | -     | -      | -      | -      | -      | -    | -     | -     | -     | -     |
| 9.9     | 595                | -     | -     | -     | -     | -     | -      | -      | -      | -      | -    | -     | -     | -     | -     |
| 10.0    | 583                | 831   | -     | -     | -     | -     | -      | -      | -      | -      | -    | -     | -     | -     | -     |
| 11.0    | 465                | 647   | 881   | -     | -     | -     | -      | -      | -      | -      | -    | -     | -     | -     | -     |
| 12.5    | 345                | 480   | 633   | 777   | -     | -     | -      | -      | -      | -      | -    | -     | -     | -     | -     |
| 13.7    | 293                | 395   | 525   | 672   | 800   | -     | -      | -      | -      | -      | -    | -     | -     | -     | -     |
| 14.0    | 280                | 374   | 498   | 646   | 770   | -     | -      | -      | -      | -      | -    | -     | -     | -     | -     |
| 15.0    | 251                | 334   | 445   | 581   | 687   | -     | -      | -      | -      | -      | -    | -     | -     | -     | -     |
| 17.5    | 200                | 270   | 361   | 470   | 555   | -     | -      | -      | -      | -      | -    | -     | -     | -     | -     |
| 20.0    | 152                | 216   | 304   | 397   | 469   | -     | -      | -      | -      | -      | -    | -     | -     | -     | -     |
| 22.0    | 144                | 196   | 277   | 355   | 415   | -     | -      | -      | -      | -      | -    | -     | -     | -     | -     |
| 22.5    | -                  | -     | -     | -     | -     | 1139  | -      | -      | -      | -      | -    | -     | -     | -     | -     |
| 23.0    | -                  | -     | -     | -     | -     | 1084  | 1442   | -      | -      | -      | -    | -     | -     | -     | -     |
| 25.0    | -                  | -     | -     | -     | -     | 865   | 1147   | 1579   | -      | -      | -    | -     | -     | -     | -     |
| 27.5    | -                  | -     | -     | -     | -     | 683   | 897    | 1211   | 1546   | -      | -    | -     | -     | -     | -     |
| 29.0    | -                  | -     | -     | -     | -     | 612   | 801    | 1084   | 1382   | 1652   | -    | -     | -     | -     | -     |
| 30.0    | -                  | -     | -     | -     | -     | 565   | 738    | 1000   | 1274   | 1527   | -    | -     | -     | -     | -     |
| 35.0    | -                  | -     | -     | -     | -     | 408   | 559    | 748    | 954    | 1125   | -    | -     | -     | -     | -     |
| 40.0    | -                  | -     | -     | -     | -     | 340   | 460    | 631    | 794    | 946    | -    | -     | -     | -     | -     |
| 45.0    | -                  | -     | -     | -     | -     | 290   | 400    | 550    | 703    | 830    | -    | -     | -     | -     | -     |
| 46.9    | -                  | -     | -     | -     | -     | -     | -      | -      | -      | -      | 2143 | -     | -     | -     | -     |
| 50.0    | -                  | -     | -     | -     | -     | -     | -      | -      | -      | -      | 1781 | 2296  | 3042  | -     | -     |
| 55.0    | -                  | -     | -     | -     | -     | -     | -      | -      | -      | -      | 1391 | 1805  | 2362  | 2912  | -     |
| 60.0    | -                  | -     | -     | -     | -     | -     | -      | -      | -      | -      | 1133 | 1487  | 1949  | 2422  | -     |
| 61.4    | -                  | -     | -     | -     | -     | -     | -      | -      | -      | -      | 1082 | 1426  | 1877  | 2328  | 2722  |
| 65.0    | -                  | -     | -     | -     | -     | -     | -      | -      | -      | -      | 952  | 1272  | 1695  | 2089  | 2424  |
| 70.0    | -                  | -     | -     | -     | -     | -     | -      | -      | -      | -      | 829  | 1125  | 1523  | 1861  | 2157  |
| 75.0    | -                  | -     | -     | -     | -     | -     | -      | -      | -      | -      | 751  | 1025  | 1389  | 1701  | 1970  |
| 80.0    | -                  | -     | -     | -     | -     | -     | -      | -      | -      | -      | 695  | 950   | 1271  | 1577  | 1813  |
| 90.0    | -                  | -     | -     | -     | -     | -     | -      | -      | -      | -      | 590  | 810   | 1071  | 1361  | 1596  |
| 100.0   | -                  | -     | -     | -     | -     | -     | -      | -      | -      | -      | 530  | 720   | 962   | 1210  | 1400  |

| V, км/ч | F <sub>к</sub> , кН |       |       |       |       |       |        |        |        |        |       |       |       |       |       |
|---------|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
|         | С-ПП                | С-ОП1 | С-ОП2 | С-ОП3 | С-ОП4 | СП-ПП | СП-ОП1 | СП-ОП2 | СП-ОП3 | СП-ОП4 | П-ПП  | П-ОП1 | П-ОП2 | П-ОП3 | П-ОП4 |
| 9.0     | 704.8               | -     | -     | -     | -     | -     | -      | -      | -      | -      | -     | -     | -     | -     | -     |
| 9.9     | 523.5               | -     | -     | -     | -     | -     | -      | -      | -      | -      | -     | -     | -     | -     | -     |
| 10.0    | 510.2               | 732.2 | -     | -     | -     | -     | -      | -      | -      | -      | -     | -     | -     | -     | -     |
| 11.0    | 376.8               | 536.1 | 721.1 | -     | -     | -     | -      | -      | -      | -      | -     | -     | -     | -     | -     |
| 12.5    | 256.7               | 359.2 | 468.7 | 564.7 | -     | -     | -      | -      | -      | -      | -     | -     | -     | -     | -     |
| 13.7    | 199.9               | 270.9 | 360.1 | 462.4 | 541.6 | -     | -      | -      | -      | -      | -     | -     | -     | -     | -     |
| 14.0    | 185.7               | 248.8 | 332.9 | 436.8 | 514.0 | -     | -      | -      | -      | -      | -     | -     | -     | -     | -     |
| 15.0    | 153.5               | 208.6 | 279.6 | 374.7 | 438.2 | -     | -      | -      | -      | -      | -     | -     | -     | -     | -     |
| 17.5    | 110.4               | 145.9 | 198.6 | 268.7 | 319.9 | -     | -      | -      | -      | -      | -     | -     | -     | -     | -     |
| 20.0    | 82.8                | 109.1 | 144.8 | 199.6 | 242.1 | -     | -      | -      | -      | -      | -     | -     | -     | -     | -     |
| 22.0    | 65.3                | 88.0  | 117.0 | 160.4 | 198.0 | -     | -      | -      | -      | -      | -     | -     | -     | -     | -     |
| 22.5    | -                   | -     | -     | -     | -     | 486.5 | -      | -      | -      | -      | -     | -     | -     | -     | -     |
| 23.0    | -                   | -     | -     | -     | -     | 459.2 | 615.1  | -      | -      | -      | -     | -     | -     | -     | -     |
| 25.0    | -                   | -     | -     | -     | -     | 350.1 | 457.9  | 627.6  | -      | -      | -     | -     | -     | -     | -     |
| 27.5    | -                   | -     | -     | -     | -     | 260.0 | 326.1  | 440.8  | 592.2  | -      | -     | -     | -     | -     | -     |
| 29.0    | -                   | -     | -     | -     | -     | 216.0 | 276.5  | 377.1  | 493.9  | 565.3  | -     | -     | -     | -     | -     |
| 30.0    | -                   | -     | -     | -     | -     | 186.7 | 243.5  | 334.6  | 428.4  | 508.4  | -     | -     | -     | -     | -     |
| 35.0    | -                   | -     | -     | -     | -     | 114.8 | 154.7  | 210.8  | 274.9  | 326.3  | -     | -     | -     | -     | -     |
| 40.0    | -                   | -     | -     | -     | -     | 80.6  | 110.3  | 154.0  | 199.9  | 245.8  | -     | -     | -     | -     | -     |
| 45.0    | -                   | -     | -     | -     | -     | 63.2  | 83.8   | 118.2  | 157.3  | 198.6  | -     | -     | -     | -     | -     |
| 46.9    | -                   | -     | -     | -     | -     | -     | -      | -      | -      | -      | 451.5 | -     | -     | -     | -     |
| 50.0    | -                   | -     | -     | -     | -     | -     | -      | -      | -      | -      | 355.6 | 460.0 | 598.5 | -     | -     |
| 55.0    | -                   | -     | -     | -     | -     | -     | -      | -      | -      | -      | 255.1 | 325.6 | 425.6 | 516.2 | -     |
| 60.0    | -                   | -     | -     | -     | -     | -     | -      | -      | -      | -      | 191.2 | 244.3 | 321.8 | 398.0 | -     |
| 61.4    | -                   | -     | -     | -     | -     | -     | -      | -      | -      | -      | 178.6 | 230.4 | 304.2 | 375.6 | 432.6 |
| 65.0    | -                   | -     | -     | -     | -     | -     | -      | -      | -      | -      | 146.3 | 194.5 | 258.8 | 318.0 | 365.5 |
| 70.0    | -                   | -     | -     | -     | -     | -     | -      | -      | -      | -      | 116.5 | 160.9 | 217.3 | 263.9 | 305.5 |
| 75.0    | -                   | -     | -     | -     | -     | -     | -      | -      | -      | -      | 97.2  | 133.7 | 185.6 | 226.0 | 263.3 |
| 80.0    | -                   | -     | -     | -     | -     | -     | -      | -      | -      | -      | 83.2  | 109.3 | 158.0 | 197.0 | 227.5 |
| 90.0    | -                   | -     | -     | -     | -     | -     | -      | -      | -      | -      | 62.5  | 84.6  | 112.6 | 148.5 | 180.2 |
| 100.0   | -                   | -     | -     | -     | -     | -     | -      | -      | -      | -      | 47.3  | 62.5  | 83.9  | 112.5 | 138.8 |

## Lisa 8 Series 10 elektriveduri karakteristiku lineaarse interpoleerimise väljavõte

## Lisa 9 Väljavõte peamise veotakistusjõudu arvutavast abirakendusest

**Lisa 10 Väljavõte kõveratega põhjustava lisaveotakistusjõudu arvatavast  
abirakendusest**



## Lisa 11 Kaubarongi veoarvutuste koondtabel

## Lisa 12 Veovõrgu elektrilise arvutuse koondtabel