

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

VEDURI TEP70 VEOKARAKTERISTIKUTE MUUTMINE

CHANGING THE TRANSPORT CHARACTERISTICS OF THE TEP70 LOCOMOTIVE

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Viktor Rjabtšikov

Üliõpilaskood: 183105AAAM

Juhendaja: Anton Rassõlkin, professor
Toomas Vaimann, vanemteadur

Tallinn, 2020

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 magistritööle esitatud nõuetele

“.....” 201.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”201... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

Autor: Viktor Rjabtšikov

Lõputöö liik: Magistritöö

Töö pealkiri: Veduri TEP70 veokarakteristikute muutmise

Kuupäev: 20.05.2020

58 lk

Ülikool: Tallinna Tehnikaülikool

Teaduskond: Inseneriteaduskond

Instituut: Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

Töö juhendaja(d): professor Anton Rassõlkin, vanemteadur Toomas Vaimann

Sisu kirjeldus:

Uurimistöö keskendub diisel-elektriliste reisirongi vedurite TEP70 moderniseerimise küsimustele. Baltikumis on mitmeid TEP70 vedureid, mida kasutatakse eesmärgipäraselt väga harva, kuid mis võivad olla kasutatavad kaubaveduritena. Uuringu peamine eesmärk on muuta veduri TEP70 veojõudu, et oleks võimalik vedada lasti Baltikumis. Tutvustatakse TEP70 tööpõhimõtete ja koormuste omadusi. Veduri analüütilise mudeli põhjal on veduri tõmbevõime suurendamiseks kujundatud ettepanek käigukast välja vahetada. Lisaks sellele on esitatud TEP70 veojõu arvutused. Sellised arvutused on liikumise kavandamisel väga olulised veduri töörežiimi ajal ülekoormamise vältimiseks.

Selle töö põhjal avaldati artikkel, mida esitleti IWED2020 konverentsil.

Märksõnad: veomootor, reduktor, veojõud, diisel-elektrivedur TEP70, koormuse karakteristik, raudtee, raudteetransport.

ABSTRACT

<i>Author:</i> Viktor Rjabtšikov	<i>Type of the work:</i> Master Thesis
<i>Title:</i> Changing the Transport Characteristics of the TEP70 Locomotive	
<i>Date:</i> 20.05.2020	58 pages
<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(s) of the thesis:</i> Professor Anton Rassõlkin, Senior Researcher Toomas Vaimann	
<i>Abstract:</i> <p>The research concentrates on the modernization issues of diesel-electric passenger locomotives TEP70. There is a number of TEP70 locomotives in Baltic region that are used very rarely for their direct application but may as well be usable as freight locomotives. The main goal of the study is to change the traction force of a TEP70 locomotive to be able to transport cargo in the Baltic region. Analysis of TEP70 working principles and load characteristics are presented. Based on the analytical model of locomotive, suggestion to replace the gearbox to increase locomotive pulling capability is proposed. Moreover, the thesis presents calculation of the traction effort of TEP70. That kind of calculations are very important for motion planning in order to avoid overloading during the working mode of the locomotive.</p> <p>Based on this work, an article was published which was presented at the IWED2020 conference.</p>	
<i>Keywords:</i> traction motor, gearbox, traction effort, diesel electric locomotive TEP 70, load characteristic, railroad, rail transportation.	

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema:	Veduri TEP70 veokarakteristikute muutmine
Lõputöö teema inglise keeles:	Changing the Transport Characteristics of the TEP70 Locomotive
Üliõpilane:	Viktor Rjabtšikov, 183105AAAM
Eriala:	Energiamuundus- ja juhtimissüsteemid
Lõputöö liik:	magistritöö
Lõputöö juhendaja:	Anton Rassõlkin
Lõputöö ülesande kehtivusaeg:	kehtivusaja annab juhendaja
Lõputöö esitamise tähtaeg:	20.05.2020

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppekava juht (allkiri)

1. Teema põhjendus

Lõputöö peaks sisaldama veduri TEP70 kohta käivate materjalidega tutvumist. Eesmärgiks on välja selgitada juhtimisloogika ning tehnilised parameetrid, mille alusel juhtimine toimub. Lisaks on eesmärgiks määrata juhtimiseks kasutatavate seadmete spetsifikatsioon ning nende reguleerimise võimalused. Vastavalt juhtimisloogikale ning tehnilisele spetsifikatsioonile koostatakse programmid, millega oleks võimalik määrata mootori juhtimiskõverad, veduri juhtimismudel ning koormuste programm. Töö tulemusel pakutakse välja vajalikud muudatused, mis on vaja veduris teha ning milliseid samme tuleb astuda et muudatused ellu viia.

2. Töö eesmärk

Töö eesmärgiks on reisirongi veduri TEP70 veo karakteristikute muutmise võimaluste uurimine läbi generaatori šuntimise, et sama tüüpi veduriga oleks võimalik vedada kaubaronge. Veokarakteristikute võrdlus teostatakse vastavalt tellijapoolsele informatsioonile.

3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

1. TEP70 veduri kirjeldus ja juhtimisseadmete tehnilised andmed
2. TEP70 veduri mudel
3. Elektrimõõtmised realsel objektil

4. Lähteandmed

Andmed sarnastel teemadel koostatud raamatutest, teadusartiklitest ja uurimustöödest.

5. Uurimismeetodid

Probleemide lahendamiseks otsitakse infot teemakohastest raamatutest, teadusartiklitest, teadustöödest. Täpsemad ja detailsemad andmed võetakse teemakohastest juhtumisuuringutest, katsetulemustest.

6. Graafiline osa

- ТЕР70 veoajami printsiipaalne skeem
- Veduri tööpõhimõtte plokk-diagramm
- Veduri veojõu karakteristikud

7. Töö struktuur

0. Sissejuhatus
1. Tehnika taseme analüüs ja kasutatav topoloogia
 - 1.1 ТЕР70 veduri kirjeldus
 - 1.2 Veduri juhtimisseadmete tehnilised andmed
2. ТЕР 70 veduri mudel
3. Elektrimõõtmised
4. Muudatused
5. Kokkuvõte

8. Kasutatud kirjanduse allikad

1. Пассажирский тепловоз ТЭП70. М., «Транспорт», 1976.232 с Авт.: В.Г.Быков, Б.Н.Морошкин, Г.Е.Серделевич, Ю.В.Хлебников, В.М.Ширяев Raamat 1, Raamat 2
2. ТЭП70 ÜD инструкция проверки электрооборудования
3. ТЭП70 ÜD схема электрическая подключения электрооборудования
4. Veomootori ЭД121АУ tehniline pass
5. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СХЕМА ТЕПЛОВОЗА ТЭП70.-М.: Желдориздат, 2005. - 277 с. Авт.: Пархомов В.Т.
6. ТЭП70 электрическая схема Э.70.00.007ЭЗ.

9. Lõputöö konsultandid

10. Töö etapid ja ajakava

Kuupäev	Töö etapid
01.10.2019	Lähteandmete kogumine
01.10.2019	Arvutuste teostamine
01.10.2019	Modelleerimise teostamine
	Teoreetilise osa kirjutamine
	Juhendajale teiseks läbilugemiseks saatmine
20.11.2019	Mõõtmiste teostamine
28.02.2020	Esimene lõputöö mustandi esitamine juhendajale
	Paranduste sisseviimine
31.03.2020	Teise lõputöö mustandi esitamine juhendajale
	Teoreetilise osa kirjutamine
10.05.2020	Viimase lõputöö mustandi esitamine juhendajale
20.05.2020	Lõputöö esitamise tähtaeg

SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE.....	3
ABSTRACT	4
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE	5
EESSÕNA.....	8
LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU	9
SISSEJUHATUS	11
1. Raudtee kasutamine Eestis	12
1.1 Eesti raudtee ajalugu	12
1.2 Raudtee kasutamine tänapäeval	12
1.3 Rail Baltic projekt	13
1.4 Raudteeveerem.....	14
1.4.1 TEP-70.....	16
2. Tehnika taseme analüüs ja kasutatav topoloogia	17
2.1 TEP70 veduri kirjeldus.....	17
2.2 Veduri juhtimisseadmete tehnilised andmed.....	20
3. TEP70 veduri arvutuslik mudel.....	24
3.1 ED-121AU veomootori karakteristikud	24
3.2 Šunttakistid ja šunteeritud karakteristikud.....	26
3.3 TEP70 koormuskarakteristik	29
4. Mõõtmised	35
4.1 TEP70 veduri mõõtepunktid ja mõõteskeem	35
4.2 Veduri TEP70 mõõtetulemused	38
4.3 Mõõtetulemuste analüüs.....	40
5. Veokarakteristikute muutmise	43
KOKKUVÕTE	46
SUMMARY	48
KASUTATUD KIRJANDUS.....	50
LISAD	52

EESSÕNA

Käesoleva magistritöö teema pakkus välja Tallinna Tehnikaülikooli elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudi elektrimasinate uurimisrühm. Antud töö on tehtud tellimuse raames, kus teoreetilise osa koostamisel oli suur koostöö lõputöö juhendajaga, kaasjuhendajaga. Mõõtmiste osas oli oluline koostöö tellijaga Ühinenud Depood AS, kes andis võimaluse viia läbi mõõtmised kasutades vedurit.

Tänu tööle õppis autor palju elektrimasinate disainist ja juhtimisest ning kõige olulisemaks võib lugeda autoril tekkinud motivatsiooni jätkata õpinguid astudes edasi doktorantuuri.

Autor soovib siinkohal tänada lõputöö juhendajat Anton Rassõlkinit, kaasjuhendajat Toomas Vaimanni ja elektrimasinate uurimisrühma juhti Ants Kallastet, kes olid alati abiks. Tänu Ühinenud Depood AS-le koostöö eest ning võimaluse eest mõõtmiste tegemiseks kasutades nende vedurit. Viimaks, kui mitte vähem olulisemana, soovib autor tänada oma perekonda ja sõpru, kes olid alati toeks.

LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

Kasutatud lühendid:

<i>a</i>	ankrumähiste paralleelharude arv
<i>A</i>	pindala
<i>BNC</i>	bajonettühendus (Bayonet Neill-Concelman)
<i>C</i>	veduri õhutakistus
<i>C_{vag}</i>	vaguni õhutakistus tegur
<i>C_{ved}</i>	veduri õhutakistus tegur
<i>E</i>	vastuelektromotoorjõud
<i>Em</i>	ergutusmähis
<i>ET (ЭТ)</i>	veomootor
<i>F</i>	jõud
<i>g</i>	raskuskiirendus
<i>h_j</i>	hobujõud
<i>I</i>	vool
<i>I_a</i>	ankruahela vool
<i>I_g</i>	sünkroongeneraatori vool
<i>ke</i>	masina elektriline konstant
<i>km</i>	masina momendi konstant
<i>KŠ (KШ)</i>	kontaktor
<i>L_p</i>	lisapoolus
<i>m</i>	mass
<i>N</i>	hammasratta hammaste arv
<i>n</i>	pöörlemissagedus
<i>Na</i>	ankrumähise aktiivjuhtmete arv
<i>NC</i>	normaalselt suletud
<i>NO</i>	normaalselt avatud
<i>p</i>	pooluspaaride arv
<i>P</i>	võimsus
<i>r</i>	ankruahela kogutakistus
<i>R1</i>	esimese astme šunttakisti takistus
<i>R2</i>	teise astme šunttakisti takistus
<i>r_a</i>	ankrutakistus

r_e	ergutusmähise takistus
r_{lp}	lisapooluse takistus
$RP (P\Pi)$	relee
$Rš (R\omega)$	šunttakisti
S	ülekanadesuhe
U	pinge
Ug	sünkroongeneraatori pinge
v	kiirus
γ	magnetvoo ja voolu sõltuvuse konstant
η	kasutegur
μ	haardetegur
μ_r	veere takistus
ρ	tihedus
σ	inertsitegur
Φ	magnetvoog
ω	nurkkiirus
Ω	oom

SISSEJUHATUS

Esimeseks töö eesmärgiks on uurida reisijate veoks mõeldud veduri ТЕР70 (ТЭП70) võimalikku ümberseadistamist nii, et seda oleks sobiv kasutada kaubaveoks. Uuritav vedur ТЕР70 omab maksimaalset sõidukiirust 160 km/h ning pidevtahtluses on veduri kiirus 48 km/h, omades veojõudu 17000 kgf. Uuringu tellija poolt, kelleks on „Ühinenud Depood AS“ on soov, et veduri ümberseadistamisel vastaks kaubaveo veduri ТЕР70BS (ТЭП70БС) karakteristikutele, mille puhul on maksimaalne kiirus 120 km/h ning pidevtahtluse kiirus 37,5 km/h, omades veojõudu 22670 kgf.

Töö käigus tutvuti veduri ТЕР70 kohta käivate materjalidega. Eesmärgiks on välja selgitada juhtimisloogika ning tehnilised parameetrid, mille alusel juhtimine toimub. Lisaks on eesmärgiks määrata juhtimiseks kasutatavate seadmete spetsifikatsioon ning nende reguleerimise võimalused.

Vastavalt juhtimisloogikale ning tehnilisele spetsifikatsioonile koostatakse karakteristikud, millega oleks võimalik määrata mootori juhtimiskõverad, veduri juhtimismudel ning koormuste karakteristikud.

Teiseks töö eesmärgiks on mõõta reisijate veoks mõeldud veduri ТЕР70-0237 elektrilisi parameetreid selleks, et veenduda eelnevalt koostatud veduri mudeli töö korrektsuses. Mudeli kontrollimiseks tuli vedurit opereerida erinevatel kontrolleri positsioonidel (0 kuni XV) ning võimalikult suurel kiirusel, mis katses tuli umbes 130 km/h, et leida, millal rakendub elektriline käiguvahetus, mida juhib veduri automaatika.

Töö sisaldab veduri ТЕР70 mõõtepunktide uurimist ja mõõteskeemi koostamist, mille alusel teostatakse veduri mõõtmised. Mõõtmistulemuste baasil võrreldakse arvutuslikke ja reaalseid tulemusi ning antakse hinnang veduri parameetrite vastavusele teoreetiliste andmetega, mis olid saadud dokumentatsioonist.

Töö tulemusel pakutakse välja vajalikud muudatused, mis on vaja veduris teha ning milliseid samme tuleb astuda et muudatused ellu viia.

1. Raudtee kasutamine Eestis

1.1 Eesti raudtee ajalugu

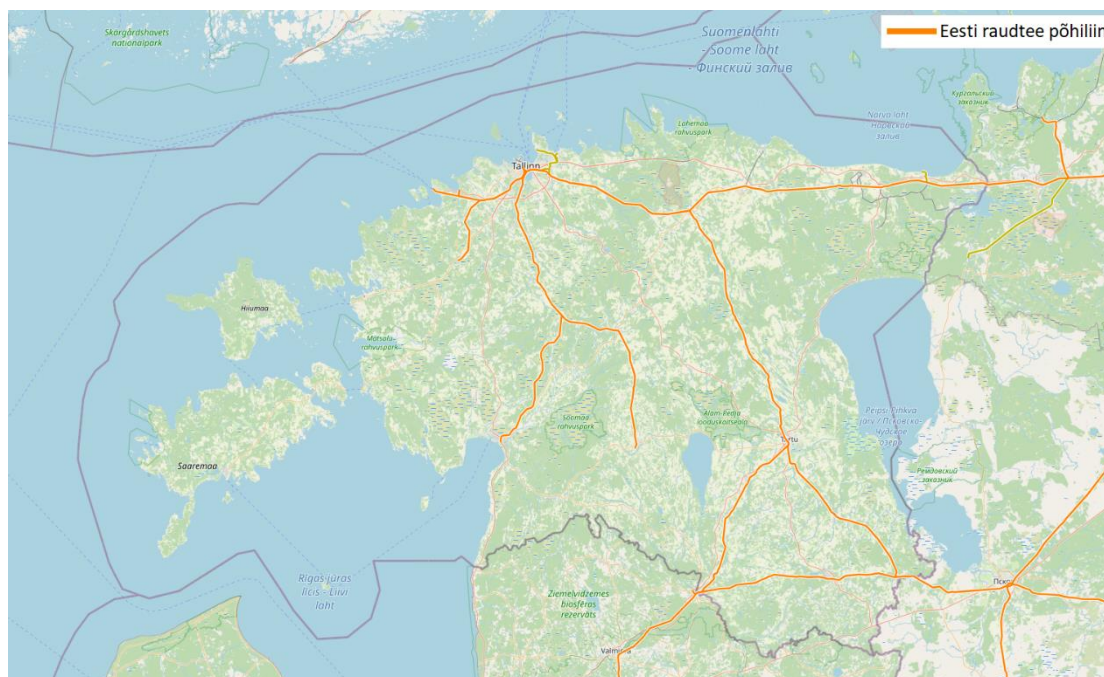
Eesti esimene raudtee avati 1870. aastal Paldiski-Tallinna-Narva-Gatšina lõigul. Antud raudteelõik andis võimaluse kaubaveoks Eesti ja Venemaa vahel. Enamus Eesti raudteid olid kitsarööpmelised ehk raudtee, kus rööbaste vahekaugus oli alla 1435 mm, mida kasutati enamasti kaevanduste ja tehaste vaheliseks liikumiseks. [1]

1950 kuni 1990 aastani perioodil, remonditi või ehitati ümber enamus Eesti raudteed, kus asendati kitsarööpmelised raudteed laiarööpmeliste teedega ja mõned puitliiprid asendati betoonliipritega. Samuti lisati raudteele suured sorteerimisjaamad ehk kohad kus toimub raudteeveeremite sorteerimine. [1]

1939. aastal oli Eestis laiarööpmeliste raudteede registreeritud pikkus 1232 km, kasutusel oli 351 reisivagunit ja 3558 kaubavagunit. [2]

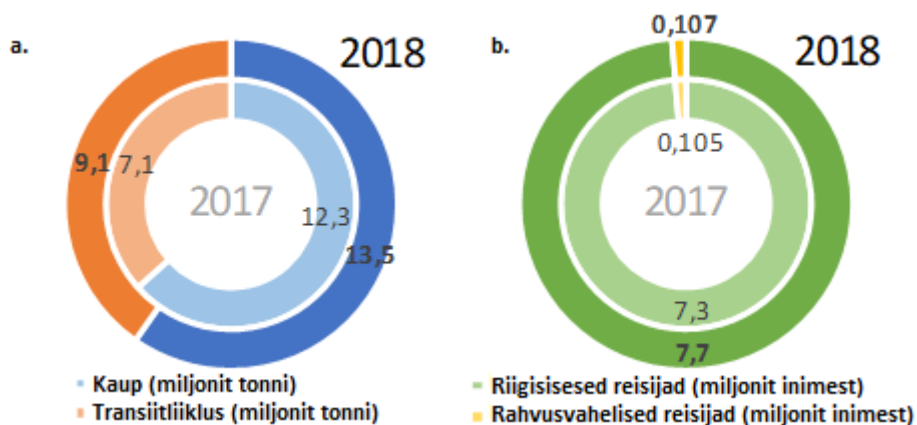
1.2 Raudtee kasutamine tänapäeval

Tänapäevaks, on raudteeliiklusregistri andmete järgi Eesti raudtee registreeritud pikkus 2144 km ja kasutatakse vene rööpmelaiuse standardit (1520 mm). [3] Eesti raudtee pealiini paiknemist võib näha Joonis 1.1.



Joonis 1.1. Eesti raudtee pealiin 2020 aasta seisuga

Vastavalt [4] andmetele, näitab Joonis 1.2a, et 2018. aastal veeti raudteel 13,5 miljonit tonni kaupa, mis on 9% rohkem kui 2017 aastal. Transiitliiklus moodustas samal aastal 9,1 miljonit tonni, mis on 20% rohkem kui 2017. aastal. Joonis 1.2b näitab, et reisijate arv oli 2018. aastal kodumaiste sihtkohtade vahel peaaegu 7,7 miljonit reisijat, mis on 5% rohkem kui 2017. aastal, ja rahvusvahelistes sihtkohtades vastavalt 107,1 tuhat reisijat, mis moodustas 2% aastase kasvu. Alates 2014. aastast hakkasid kodumaistes sihtkohtades sõitma Stadler FLIRT reisirongid, mis kuuluvad Eesti Liinirongid AS-le ja opereerivad Elron kaubamärgi all. [4]



Joonis 1.2. Eesti raudtee kasutamine aastatel (a) 2017 ja (b) 2018 [4]

Igal riigil on olemas vanu vedureid, mis seisavad depooos ning mida enam ei kasutata, sest nad on vanad ja ei paku samu mugavusi, mis uued vedurid. Neid vedureid on võimalik moderniseerida ja uuesti kasutusele võtta ja selleks on mitmeid põhjuseid. Esiteks, nagu varem mainitud, suureneb vedurite kasutamine nii inimeste kui ka kauba veos. Teiseks, on raudteetransport üks keskkonnasõbralikum massitransport, sest vedur võimaldab transportida suuri koguseid kaupa ja inimesi korraga. Kolmandaks, on raudtee maismaatranspordi kõige ohutum vorm, millel on madalaim surma ja raskete vigastuste oht, samal ajal liikudes suurematel kiirustel kui näiteks auto. Lisaks on üheks moderniseerimise vajaduse põhjuseks uute vedurite suur maksumus. [5]

1.3 Rail Baltic projekt

Rail Baltic projekt on näide sellest, kuidas kasvab vajadus uue raudtee loomiseks. Projekti eesmärgiks on luua kiire raudtee ühendus Balti riikide ja Euroopa vahel. Rail Baltica projekti teekond on valitud marsruudil Tallinn–Pärnu–Riia–Panevežis–Kaunas–Varssavi.

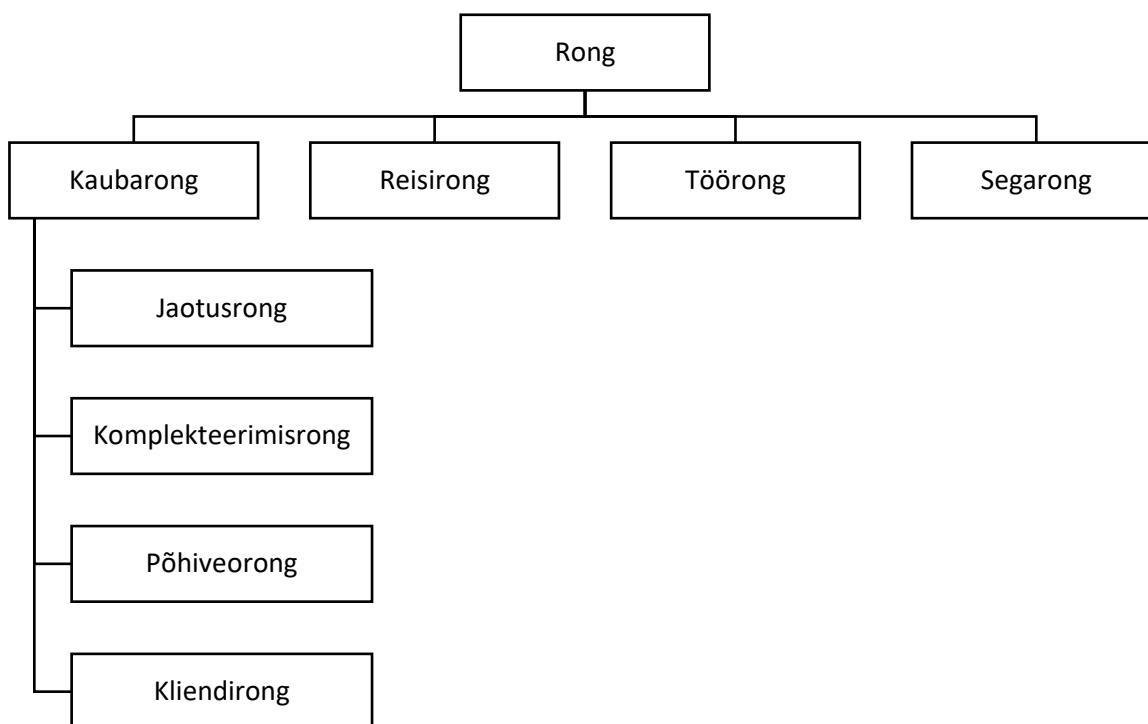
Balti riikides kasutatakse raudtee standardit rööpmelaiusega 1520 mm, mis erineb Euroopa standarditest, kus enamikus riikides kasutatakse 1435 mm rööpmelaiust. Kauba transportimisel Kesk-Euroopasse tuleb teha alusvankrite vahetust, kus ühendatakse lahti toite ühendusjuhtmed ja

andurid, mis hiljem ühendatakse tagasi uuel alusvankril. See tegevus on aega nõutav ja kulukas, mis vähendab raudteetranspordi konkurentsivõimet teiste kaubaveo võimalustega. [6] [2]

Antud projekt annab võimaluse rahvusvahelisteks reisimiseks ja kaubaveoks ka piirkondades, kus varem ehitatud raudtee on halva kvaliteediga, madala kiiruse ja teeninduse tasemega. Rail Baltic oleks turvaline, kvaliteetne ja kiire ühendus Kesk- ja Lääne-Euroopa ja Balti riikide vahel, mis mõjuks paremini riikide vahelisele koostööle, majandusele ja keskkonnale. [6]

1.4 Raudteeveerem

Raudteeveerem koosneb veduritest, vagunitest, raudteeremondimasinatest, kraanadest ja muudest raudteel liiklemiseks mõeldud veovahenditest ja masinatest. Rongi all mõeldakse vedurit, mille külge on ühendatud vagunid või lisaseadmed, mis liiguvad või seisavad raudtee peal ühe tervikuna. Rongi iseloomustab selle kaal, pikkus, ühendatud vagunite arv jne. Tihtipeale väljuva rongi koosseis erineb sihtjaama saabuva rongi koosseisust, kuna võivad vahetuda nii vedurid, kaup, kui vedurijuhid. Rongid jaotatakse nelja suuremasse gruppi, milleks on kaubarong, reisirong, töörong ja segarong, mida on ka näidatud Joonis 1.3. [2]



Joonis 1.3. Erinevad rongide tüübid

Kaubarong on mõeldud ainult kaubaveoks ja kaubarongiga on reisijate vedu keelatud. Reisirong on mõeldud reisijate veoks. Töörong on mõeldud raudtee ehitamise, hooldamise ja remontimise jaoks. Segarongid koosnevad nii reisijate kui ka kauba vagunitest, kuid Euroopas neid ei kasutata. [2]

Kaubarongid jaotuvad neljaks kategooriaks. Jaotus- ja komplekteerimisrongid liiguvad lühikesi distantse kaubajaamade ja sorteerimisjaamade vahel. Neid ronge kasutatakse põhiveorongi koostamiseks. Juhul kui kõik rongi vagunid veavad ühe kliendi kaupa või toorainet, siis võib antud vedurit on nimetada kliendiringiks. [2]

Tabel 1 on toodud välja 2020. aasta seisuga Eestis kasutatavad veeremid.

Tabel 1. Eestis regulaarselt kasutuses olevad veeremi mudelid [7]

Veeremi seeria	Kogu veeremi arv / Kasutuses oleva veeremi arv	Veeremi seeria	Kogu veeremi arv / Kasutuses oleva veeremi arv
C36-7i	53 / 31	TU6D	2 / 2
Stadler FLIRT (DMU)	20 / 19	TU7	2 / 1
ChME3	19 / 13	TU8	2 / 2
Stadler FLIRT (EMU)	18 / 14	UK25/9-18	2 / 2
TEM2, TEM2A	12 / 11	09-16 CSM	1 / 1
Tka6	11 / 11	ADM	1 / 1
2TE116	10 / 4	AGD1A	1 / 1
TEM-TMH	10 / 9	AGV	1 / 1
TEM18	8 / 8	DGS62N	1 / 1
TEM2UM	6 / 6	Duomatic 09-32 CSM	1 / 1
TEM2U	5 / 5	EDK500	1 / 1
SDP, SDPM, SDPM2	4 / 4	Kch4	1 / 1
TEP70	4 / 3	KDE253	1 / 1
TGK2, TGK2-1	4 / 2	L	1 / 0
Tka7	4 / 4	MPD2	1 / 1
C30M	3 / 3	MZS	1 / 0
MPT4	3 / 3	TBM1	1 / 1
SM2	3 / 3	TEM7	1 / 1
TGM4	3 / 2	TGM23	1 / 1
TU6A	3 / 2	TGM23B	1 / 1
UNIMAT 08-275/3S	3 / 3	TGM23BV	1 / 1
AGMu	2 / 2	TGM3	1 / 0
DF7G-E	2 / 2	TGM40	1 / 1
ESU2	2 / 1	TGM40S	1 / 1
KBR875	2 / 2	TGM40V	1 / 1
RVR DR1A	2 / 1	TU6P	1 / 1
TGM23V	2 / 2	UNIMAT COMPACT 08- 16 Strait	1 / 1
TGM4A, TGM4L	2 / 2	USP 2005SW	1 / 1
TGM4B	2 / 2	VPRS-PM	1 / 1
		TU4	2 / 2
		Kokku	257 / 205

Tabel 1 näitab, et kõige rohkem on hetkel kasutuses kaubavedureid mudeli numbriga C36-7i, ChME3 ja TEM2, TEM2A ja Stadler FLIRT seeria reisironge. Lisaks 149 reisivagunit ja 21188 kaubavagunit ehk rohkem kui 99% vagunitest on mõeldud kaubaveo jaoks. [8]

1.4.1 TEP-70

Antud lõputöös uuritakse veduri TEP70 moderniseerimise võimalusi. Antud vedur on diisellektriline reisivedur. TEP70 on alus teisele vedurile TEP70BS (ТЕП70БС), kus on muudetud suurem osa detaile nagu ventilatsiooni süsteem, diisellektriline generaator ja veduri korpus, kuid jäetud samaks veduri veomootorid ED-121AU1 (ЭД-121АУ1). Hiljem toodeti vedurit TEP70U (ТЭП70У), kus oli kasutusel palju võimsam diisलगенераатор ja tehnoloogiliselt edasi arendatud veduri kere. TEP70 on peamiselt kasutuses Ida-Euroopas, Venemaal ja samuti ka Eestis. TEP70 vedur ei sobi enam inimeste transportimiseks, kuna inimeste vajadused on läbi aegade muutunud ning veduris puuduvad vajalikud mugavused, kuid need vedurid võiksid sobida teisteks rakendusteks nagu näiteks kauba vedu. Vana veduri moderniseerimisel võib saada hakkama palju odavamalt kui on uue veduri soetusmaksumus. Selleks, et kasutada TEP70 kaubaveoks tuleb suurendada TEP70 veojõudu. [9]

Kirjanduse uuring näitab erinevaid võimalusi, kuidas teha TEP70 paremaks. Autorid [10] vihjavad diisलगенерааторите komplektide efektiivsuse parandamist 4–5%, võttes kasutusele elektrilised kiiruse ja võimsuse regulaatorid, võimalusega kontrollida kütusevarustust. TEP70 automaatse juhtimissüsteemi täiustamist on esitatud artiklis [11], nagu autorid väidavad, Leedu Raudteede statistikaosakonna andmetel vähenes ümberehitatud veduri kütusekulu 20%.

Käesolevas lõputöös tutvustatakse veduri TEP70 moderniseerimisega seotud küsimusi. Tutvustatakse TEP70 tööpõhimõtete ja koormuste omadusi. Veduri analüütilises mudelis on esitatud veojõu arvutused, mis põhinevad veosüsteemi parameetritel ja TEP70 juhtimisrežiimidel.

2. Tehnika taseme analüüs ja kasutatav topoloogia

2.1 TEP70 veduri kirjeldus

TEP70 on pikamaa reisijate diisel-elektriline vedur, mida oli toodeti Nõukogude Liidu ja tänase Venemaa Kolomna vedurite tehases aastatel 1973-2006. [9] TEP70 mootmed ja põhilised elektrilised komponendid on näha Joonis 2.1.

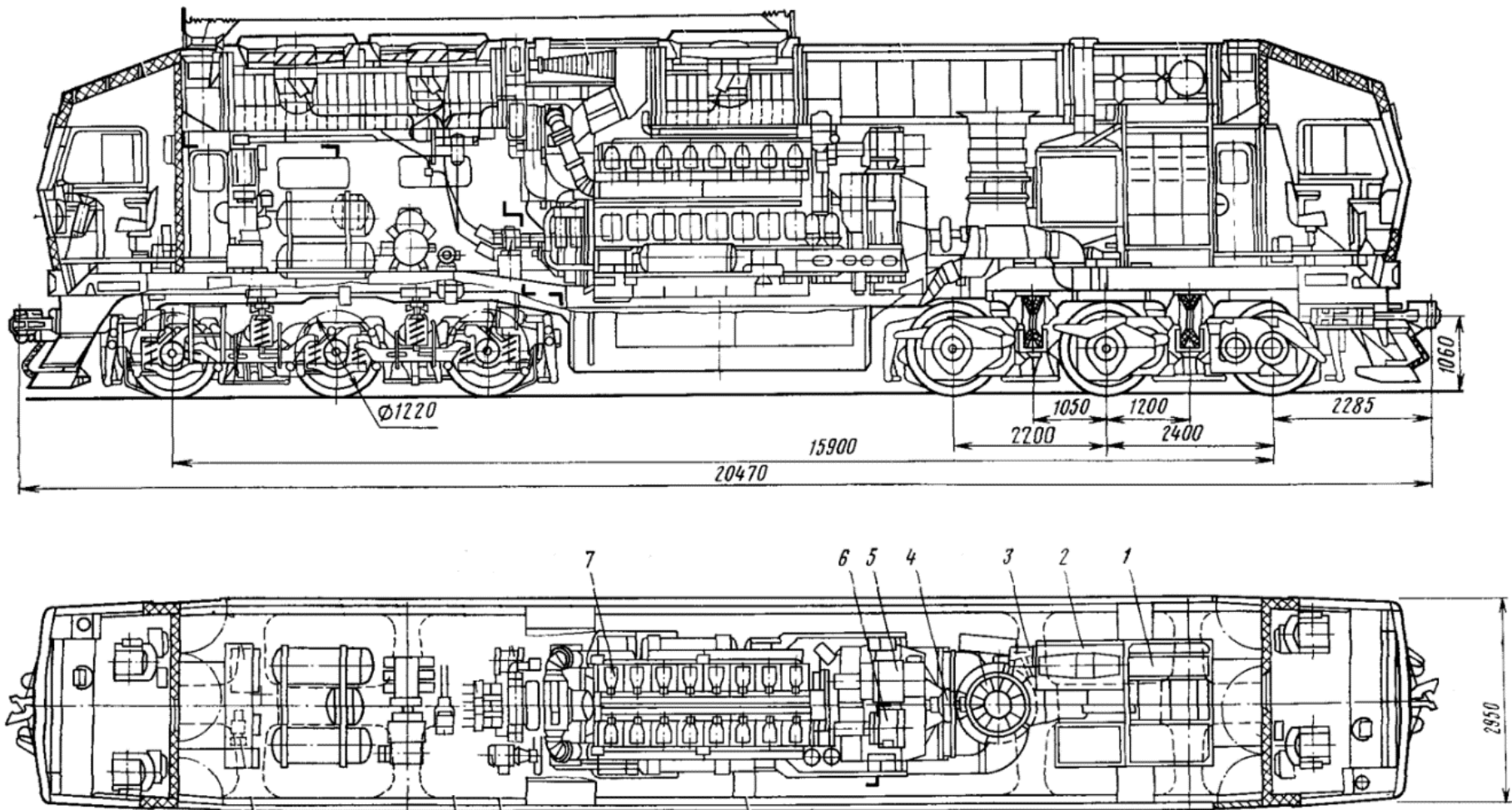
Diisel-elektriline vedur tähendab energia ülekandesüsteemi, kus diiselmootori mehaaniline energia muundatakse generaatori abil elektrienergiaks, mis toidab elektriajamat. Diiselveurisse TEP70 on paigaldatud diiseldiiselmootor 2A-9DG (2A-9ДГ), mis koosneb 2A-5D49 (2A-5Д49) tüüpi diiselmootorist ja sünkroongeneraatorist GS-504A (ГС-504А), mis on paigaldatud ühisele raamile ja ühendatud omavahel plastilise muhviga. Diiseldiiselmootori tehnilised andmed on toodud välja Tabel 2 ja sünkroongeneraatori tehnilised andmed on toodud välja Tabel 3.

Tabel 2. Diiseldiiselmootori 2A-9DG (2A-9ДГ) tehnilised andmed [9]

Parameeter	Ühik	Väärtus
Koguvõimsus	kW (hj)	2942 (4000)
Võlli pöörlemissagedus (maksimum)	p/min	1000
Diiseldiiselmootori üldmootmed (pikkus × laius × kõrgus)	mm	6740×1970×3070
Diiseldiiselmootori mass	kg	30050

Tabel 3. Sünkroongeneraatori GS-504A (ГС-504А) tehnilised andmed [9]

Parameeter	Ühik	Väärtus
Nimivõimsus	kW	2750
Maksimaalne liinipinge	V	580
Liinipinge pidevtahtluses	V	360
Liinivoolu efektiivväärtus maksimaalse pingega korral	A	2×1500
Liinivoolu efektiivväärtus pidevtahtluses	A	2×2400
Lubatud liinivoolu maksimaalne efektiivväärtus 2 minuti jooksul	A	2×3400
Nimipöörlemissagedus	p/min	1000
Pöörlemiskiiruse töövahemik	p/min	350-1000
Nimisagedus	Hz	100
Sünkroongeneraatori efektiivsus pidevtahtluses	%	94,8
Pooluste arv	tk	12
Mass	kg	6500



Joonis 2.1. Vedur TEP70 koos põhiliste elektriliste komponentidega ja mõõtmetega (mm) (1. kõrgepinge puur, 2. alaldi, 3. generaatori ergutusplokk, 4. muhv, 5. generaatori starter, 6. ergutus ja 7. diislegeneraator) [9]

Sünkroongeneraatori genereeritud vahelduvvool muudetakse alalisvooluks kasutades alaldit. Selleks, et vähendada alalisvoolu pulseerimist kasutatakse kuuefaasilist sünkroongeneraatorit, kus faasid on ühendatud kahte tähtühendusse. Iga tähtühendus on ühendatud eraldi kolmefaasilise alaldiga ja alaldid on ühendatud omavahel paralleelselt, mille tulemuseks on väiksem väljundpulsatsiooni amplituud. Alaldi väljundi parameetrite väärtused on toodud Tabel 4.

Tabel 4. Alaldatud sünkroongeneraatori elektrilised väärtused [9]

Parameeter	Ühik	Väärtus
Maksimaalne pinge	V	750
Pinge pidevtahtluses	V	435
Voolu väärtus maksimaalse pinge korral	A	3600
Vool pidevtahtluses	A	6200
Lubatud voolu maksimaalne väärtus 2 minuti jooksul	A	8700

Alalisvooluga toidetakse veduri veomootoreid. Veduris on kasutusel kuus peavoolumootorit ED-121AU1 (ЭД-121АУ1), mis on ühendatud paralleelselt. Veomootori tehnilised andmed on näidatud Tabel 5.

Tabel 5. Veomootori ED-121AU1 tehnilised andmed [12]

Parameeter	Ühik	Väärtus	
		Püsitalitus	Piirtalitus
Nimipinge	V	512	750
Nimivool	A	880	600
Pöörlemiskiirus	p/min	645	2320
Kasutegur	%	91,1	
Mass	kg	2950	

Veduri kere on valmistatud madalalt legeeritud terasest ja alumiiniumsulamitest. Ratta raam, kuhu on paigutatud veomootorid, on valmistatud TEP60 baasil kuid erinevus seisnes veduri ratta diameetris, mis on TEP60 puhul 1050 mm ja TEP70 on ratta diameeter 1220 mm. TEP70-s on paigutatud kuus rattapaari ja kuus veomootorit ehk üks veomootor igale rattapaarile.

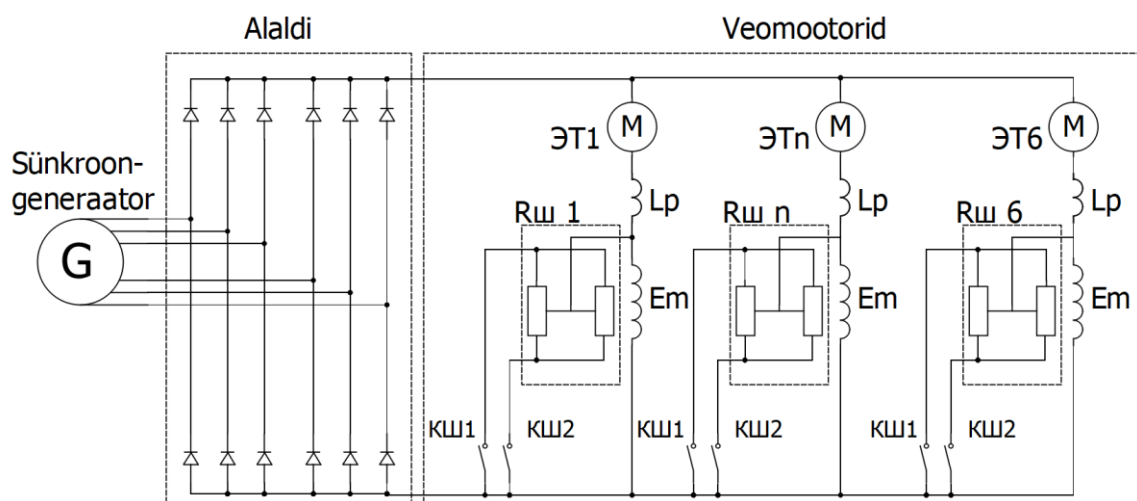
Veomootori ja ratta vahele on paigutatud reduktor, mis suurendab ratta pöördemomenti. Redukti ülekande suhte arvutus on toodud välja valemis 2.1, kus S on ülekandesuhe ja N on hammasratta hammaste arv.

$$S = \frac{N_1}{N_2} = \frac{78}{25} = 3,12 \quad (2.1)$$

TEP70 oli projekteeritud tippkiirusele 160 km/h, pidevtahtluse kiirusele 48 km/h ja omades veojõudu pidevtahtluses 17000 kgf.

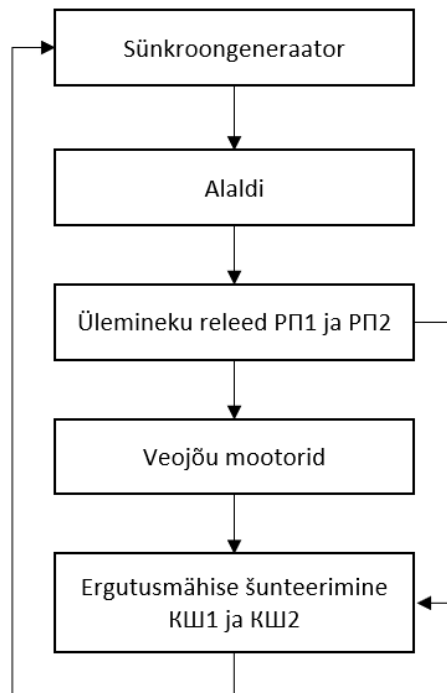
2.2 Veduri juhtimisseadmete tehnilised andmed

Veduri veoajami juhtimissüsteem koosneb sünkroongeneraatorist, alaldist ning kuuest peavoolumootorist. Veduri veoajami lihtsustatud skeem on näidatud Joonis 2.2.



Joonis 2.2. TEP70 veoajami lihtsustatud skeem, kus $R_{\text{ш}}(n)$ on šuntakisti, $K_{\text{ш}}(n)$ on kontaktor, $\text{ЭТ}(n)$ veomootor, L_p on lisa poolus ja E_m on ergutusmähis.

Veduri TEP70 kiiruse juhtimine jaguneb kahte ossa. Esiteks manuaalne kiiruse juhtimine, mis toimub veduri kontrolleri abil, mida juhib vedurijuht. Olenevalt kontrolleri positsioonist muutub sünkroongeneraatori pöörlemiskiirus, millega tõstetakse või vähendatakse väljundpinget, mis toidab veoajamit. Teiseks automatiseeritud süsteem, mis toimub veduri kiiruse tõstmisel, mis muudab peavoolumootori karakteristikut ergutusmähise šunteerimise abil. Veoajamite lihtsustatud juhtimise plokk-diagramm on näidatud Joonis 2.3.



Joonis 2.3. Veduri TEP70 veoajami juhtimise tööpõhimõtte plokki-diagramm

Sünkroongeneraatori pöörlemiskiiruse muutmisega juhitakse veduri kiirust, kus generaatori pöörlemiskiiruse kasvades suureneb veomootorite toitepinge ning selle tulemusel ka veojõud, mida rakendavad veomootorid. Sünkroongeneraatori võlli pöörlemissageduse muutmine teostatakse veduri juhi kontrolliga, mis omab positsioone 0 kuni XV. Tabel 6 näitab iga kontrolleri positsiooni ja generaatori pöörlemissageduse vahemikku.

Tabel 6. Sünkroongeneraatori pöörlemiskiirus igal kontrolleri positsioonil [9]

Kontrolleripositsioon	Ühik	0	I	II	III	IV	V	VI	VII
Pöörlemissagedus	p/min	350±20	350±20	395±20	445±20	490±20	535±20	580±20	630±20
Kontrolleripositsioon	Ühik	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV	XV
Pöörlemissagedus	p/min	675±20	720±20	770±20	815±20	860±20	910±20	955±20	1000±10

Veomootorite, milleks on alalisvoolu peavoolu mootorid, karakteristikute muutmine toimub läbi kontaktorite KŠ1 (KШ1) ja KŠ2 (KШ2), mille abil muudetakse mootorite ergutusmähise voolu. Veduri talitlemisel on võimalik kolm olekut:

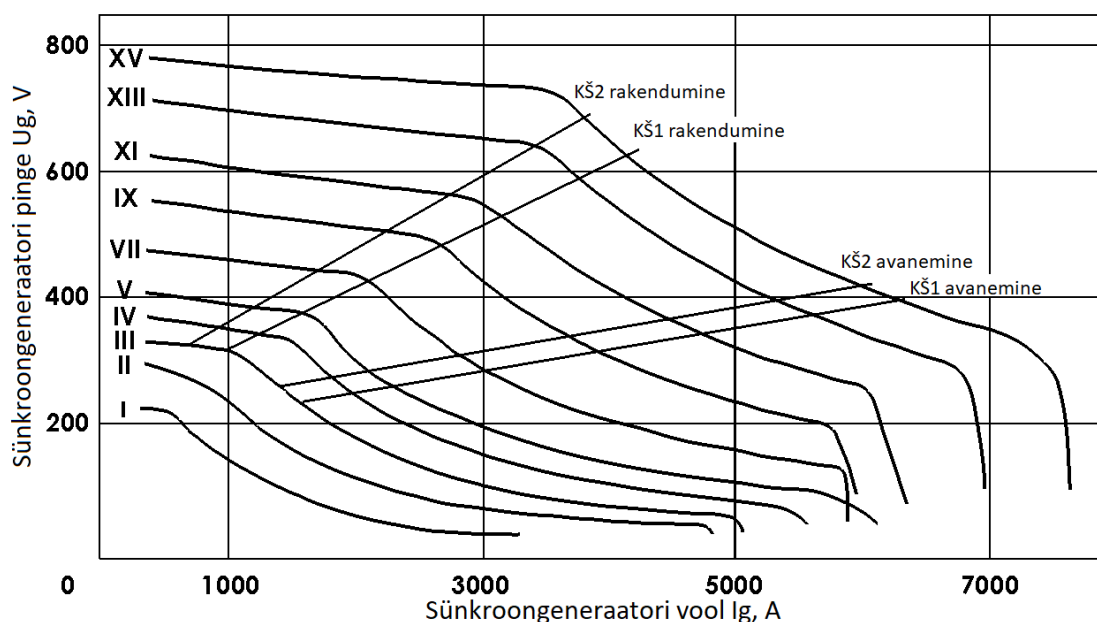
- 1) Kui kontaktorid KŠ1 ja KŠ2 on mõlemad avatud, on tegemist mootori loomuliku tunnusjoonega;
- 2) Kui kontaktor KŠ1 on suletud, läbib osa ergutusvoolust üht šunttakistit;
- 3) Kui kontaktorid KŠ1 ja KŠ2 on mõlemad suletud, läbib osa ergutusvoolust voolust mõlemat šunttakistit.

Elektropneumaatiliste kontaktorite KŠ1 ja KŠ2 andmed on toodud välja Tabel 7.

Tabel 7. Elektropneumaatiliste kontaktorite tehnilised andmed [9]

Peahela kontaktid:	Ühik	Väärtus
Nimivool	A	500
Nimipinge	V	1000
Ventiili mähise pinge	V	75, 110
Abiahelate kontaktid:		
Nimivool	A	6,3
Nimipinge	V	75,11
Kontaktide arv	-	2NO, 1NC

Kontaktorite KŠ1 ja KŠ2 juhtimine toimub vastavalt generaatori pinge-voolu tunnusoonele. Sünkroongeneraatori pinge-voolu tunnusooned vastavalt kontrolleri asendile on näidatud Joonis 2.4.



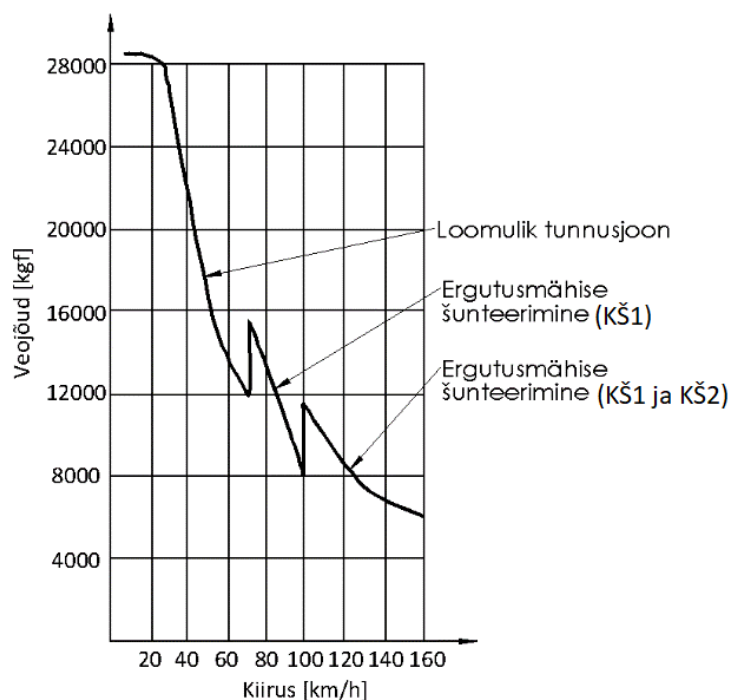
Joonis 2.4. Generaatori pinge-voolu sõltuvused erinevatel kontrolleri positsioonidel [13]

Joonis 2.5 on näitena ära toodud veduri veojõu karakteristik kontrolleri positsioonil XV. Veduri kiiruse suurenemisel kasvab sünkroongeneraatori väljundpinge ja väheneb vool, sest väheneb moment, mida veomootorid arendavad. Ülemineku releed RP1 (РП1) ja RP2 (РП2), mis omavad nii pinge kui ka voolu mähiseid, vastutavad veomootori ergutusmähise šunteerimise eest. Relee tehnilised andmed on toodud välja Tabel 8.

Tabel 8. Relee РД-3010У3 (RP1, RP2) nimiandmed

Parameeter	Ühik	Väärtus	
Kontakti nimipinge	V	110	
Kontakti nimivool	A	3	
Releeosa tüüp:		Vool	Pinge
Isolatsiooni nimipinge	V	900	900
Nimivool	A	1,5	0,2
Rakendusvool	A	0	0,075-0,085
	A	1	0,155-0,165
Väljalülitamine	A	0	0,022-0,032
	A	1,3	0,052-0,065
Keerdude arv	-	550	7000
Takistus 20°C	Ω	1,55	260

Pingemähis vastutab relee rakendumise eest ning voolumähis relee avanemise eest. Šunteerimine on kaheastmeline. Kui väljundpinge ületab RP1 relee pinge väärtuse, mille pinge väärtus on reguleeritav, siis rakendub RP1, mis tõttu rakendub ka kontaktor KŠ1. KŠ1 rakendamisel lülitatakse šunttakisti paralleelselt veojõu mootori ergutusmähisega, mistõttu suureneb veomootori pöörlemiskiirus. Antud lülitus annab võimaluse reguleerida peavoolumootori kiirust põhikiirusest ülespoole. Samal põhimõttel toimub ka teise astme lülitus, kus lisaks KŠ1-le rakendub ka KŠ2 ehk lisatakse teine takistus paralleelselt ergutusmähisega. Juhul kui veduri kiirus väheneb ehk väljundvool suureneb, siis avanevad releed RP2 ja RP1, mille tulemusel avanevad ka kontaktorid KŠ1 ja KŠ2.



Joonis 2.5. Veduri veojõu karakteristik (XV kontrolleri positsioon) [13]

3. TEP70 veduri arvutuslik mudel

3.1 ED-121AU veomootori karakteristikud

Veduris TEP70 kasutatakse kuute ED-121AU jadaergutusega alalisvoolumootorit, veomootori tehnilise passi andmed on esitatud Tabel 9.

Tabel 9. ED-121AU jadaergutusega alalisvoolumootori tehnilise passi andmed [12]

Parameeter	Ühik	Tähis	Väärtus
Pinge	V	U	512
Vool	A	I	880
Pöörlemissagedus	p/min	n	645
Kasutegur	%	η_{mot}	91,1
Ankrutakistus	Ω	r_a	0,0108
Ergutusmähise takistus	Ω	r_e	0,009
Lisapooluse takistus	Ω	r_{lp}	0,0078
Pooluspaaride arv	tk	p	2
Ankrumähise aktiivjuhtmete arv	tk	Na	58
Ankrumähiste paralleelharude arv	tk	a	4

Mudeli loomine aitab saada ülevaate veduri tööst, kuid selleks, et luua veomootori karakteristik, tuleb leida peavoolu mootori elektromehhaanilised omadused. Arvutamisel lähtutakse alalisvoolu mootori põhivõrranditest, mis on toodud välja valemities 3.1, 3.2 ja 3.3.

$$U = E + I_a \cdot r, \quad (3.1)$$

$$E = k_E \cdot \phi \cdot n, \quad (3.2)$$

$$M = k_M \cdot \phi \cdot I_a, \quad (3.3)$$

kus U on toitepinge, E on ankrumähises indutseeritud vastuelektromotoorjõud, I_a on ankruahela vool, n on pöörlemiskiirus, M on mootori elektromagnetiline moment, ϕ on magnetvoog pooluse kohta, k_E on masina elektriline konstant, k_M on masina momendi konstant ja r on ankruahela kogutakistus, mis arvutatakse valemiga 3.4.

$$r = r_a + r_e + r_{lp} \quad (3.4)$$

Karakteristikute arvutamiseks on puudu masina elektriline konstant k_E , masina momendi konstant k_M ja magnetvoog pooluse kohta ϕ .

Masina elektriline konstant ja momendi konstant sõltuvad masina ehitusest, need on võimalik leida valemitega 3.5 ja 3.6.

$$k_E = \frac{p \cdot Na}{60 \cdot a} = \frac{2 \cdot 58}{60 \cdot 4} = 0,4833 \quad (3.5)$$

$$k_M = \frac{p \cdot N}{2 \cdot \pi \cdot a} = \frac{2 \cdot 58}{2 \cdot \pi \cdot 4} = 4,6155 \quad (3.6)$$

Selleks, et leida magnetvoog ϕ , tuleb asendada ankrumähises indutseeritud vastuelektromotoorjõud E valemisse 3.1.

$$U = k_E \cdot \phi \cdot n + I_a \cdot r \quad (3.7)$$

Kasutades valemit 3.7 avaldame ϕ .

$$\phi = \frac{U - I_a \cdot r}{k_E \cdot n} = \frac{512 - 880 \cdot 0,0276}{0,4833 \cdot 645} = 1,5644 \text{ Wb} \quad (3.8)$$

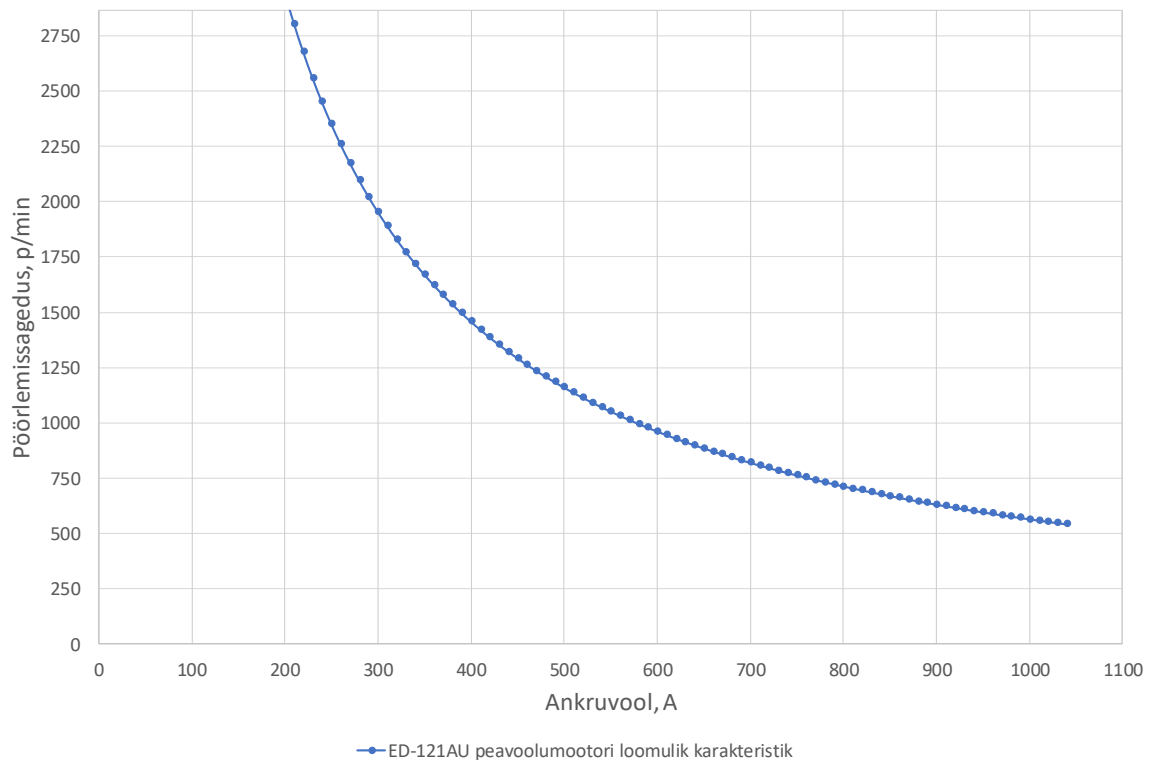
Karakteristiku loomisel on vaja teada magnetvoo sõltuvust voolust:

$$\phi = \gamma \cdot I_a \quad (3.9)$$

Millest avaldame konstandi γ .

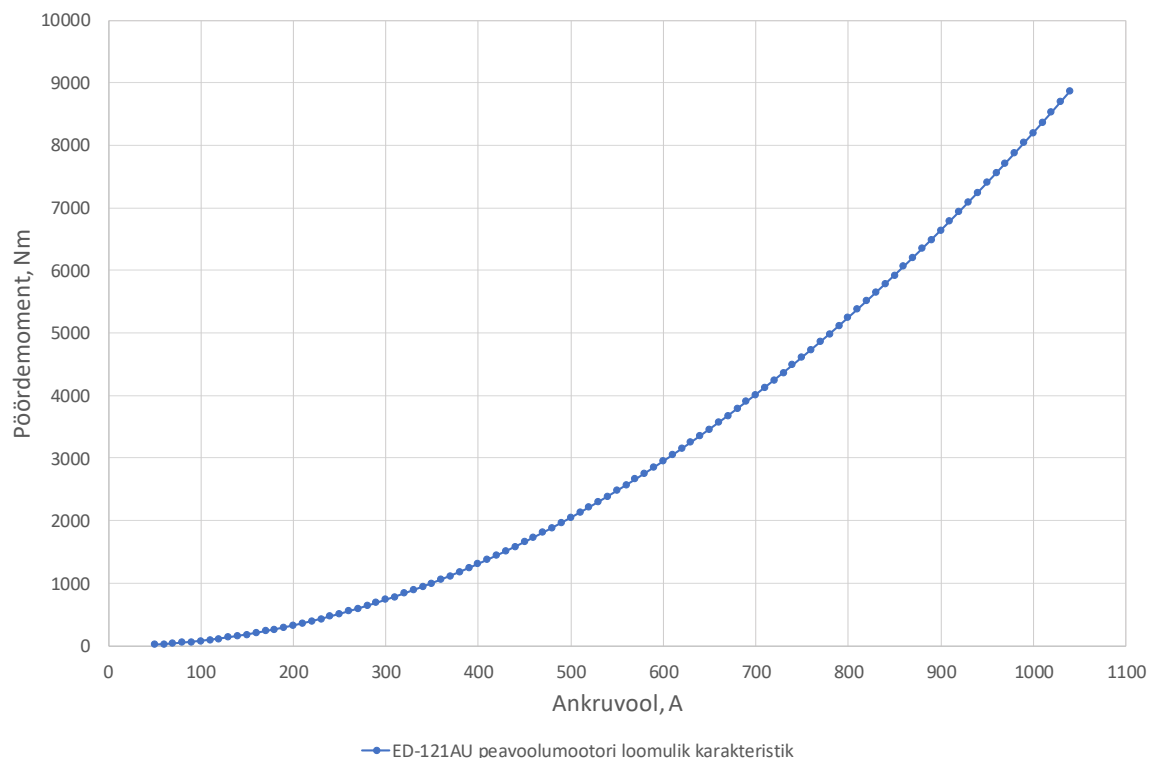
$$\gamma = \frac{\phi}{I_a} = \frac{1,5644}{880} = 0,0018 \quad (3.10)$$

Kasutades valemit 3.7 ja teades kõiki parameetreid, on võimalik koostada veomootori karakteristik, mis on välja toodud Joonis 3.1.



Joonis 3.1. ED-121AU peavoolumootori pöörlemisageduse ja ankruvoolu omavaheline sõltuvus

Kasutades valemit 3.3 koostame pöördemomendi ja voolu sõltuvuse graafiku, mida on võimalik näha Joonis 3.2.



Joonis 3.2. ЭД-121АУ peavoolumootori pöördemomendi ja ankruvoolu omavaheline sõltuvus

3.2 Šunttakistid ja šunteeritud karakteristikud

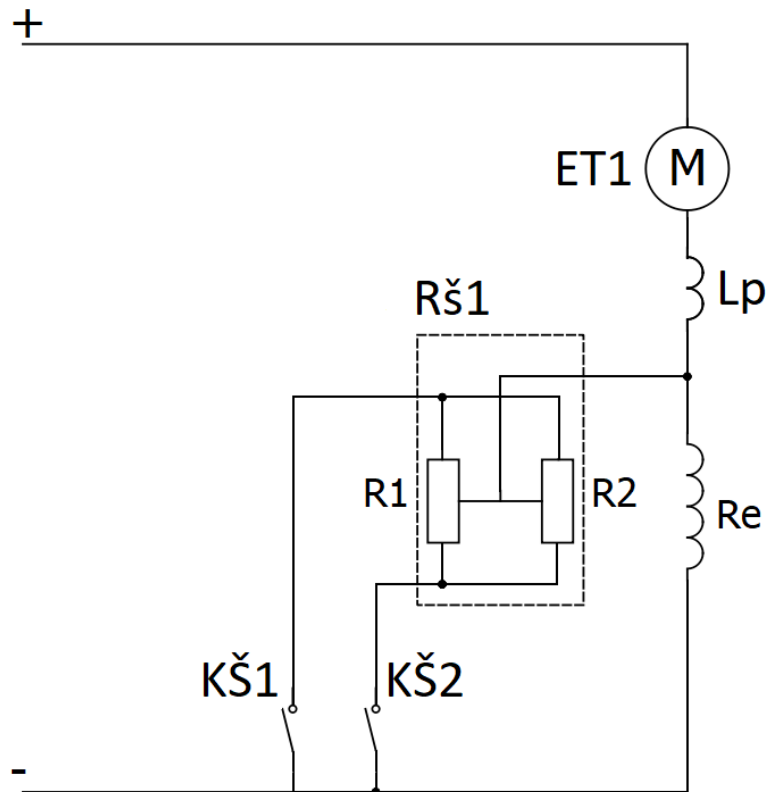
Veomootori ED-121AU kiiruse reguleerimiseks kasutatakse šunttakisteid LR-9230 (ЛР-9230) ja LR-9231 (ЛР-9231), mille nimiparameetrid on esitatud Tabel 10.

Tabel 10. Šunttakistite LR-9230 (RŠ1 - RŠ3) ja LR-9231 (RŠ4 - RŠ6) nimiandmed [9]

Parameeter	Ühik	Väärtus	
Šunttakisti tähis	-	RŠ1 - RŠ3	RŠ4 - RŠ6
Toote number	-	ЛР-9230	ЛР-9231
Pinge	V	1000	1000
Vool	A	425	425
Takistus 20°C	Ω	R1=0,0114; R2=0,0066	R1=0,0132; R2=0,0066
Kaal	kg	11	11

Peavoolumootori ergutusmähise šunteerimine annab võimaluse vähendada ergutusvoolu ja sellega suurendada mootori pöörlemissagedust vähendades pöördemomenti. Veduri puhul on see mõistlik, kuna suurim pöördemoment on vajalik alguses kui vedur alustab sõitu ja kiiruse

suurenemisel pöördemomendi vajadus langeb. Joonis 3.3 näitab veomootori ET1 (ЭТ1) ergutusmähise šunteerimist koos šunttakistitega.



Joonis 3.3. Ergutusmähise šunteerimise lihtsustatud skeem

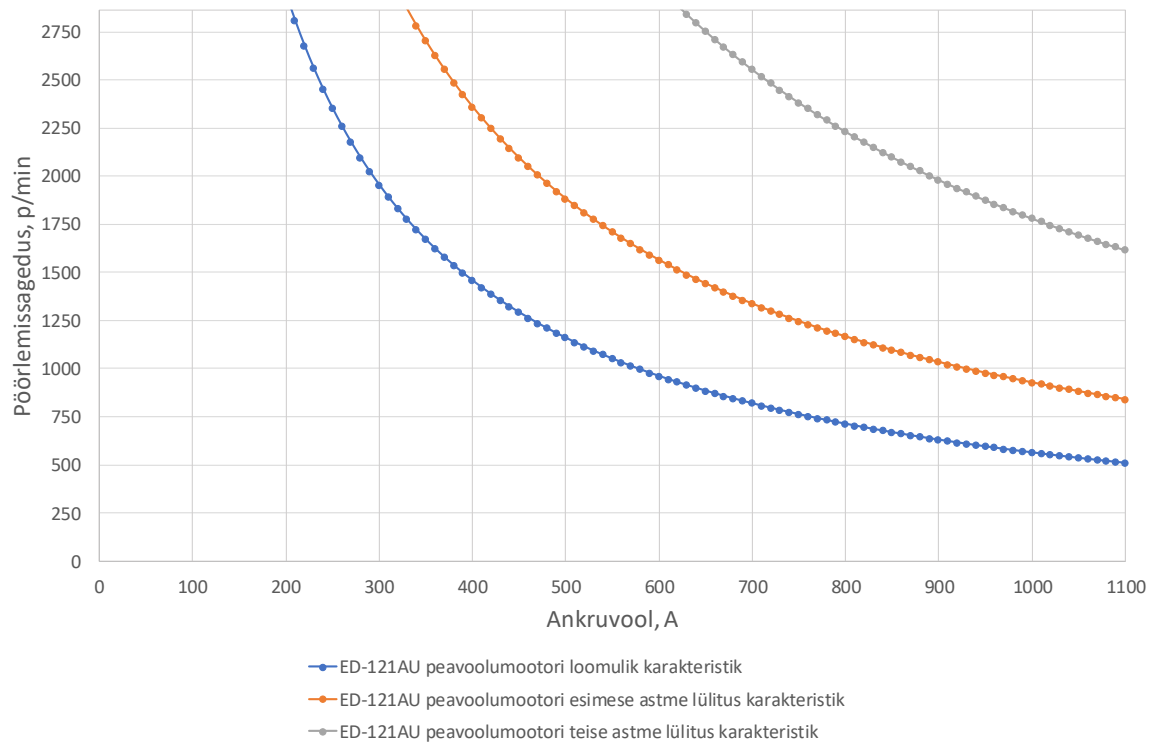
Kasutades Tabel 10 andmeid leiame šunteeritud ergutusmähise karakteristikud. Ergutusmähise esimese astme šunteerimisel rakendub Kš1 ja ergutusmähisele lülitatakse lisaks üks paralleeltakisti R1, mille takistuse väärtus on 0,0114 Ω. Arvutame summaarse takistuse.

$$R_{\text{kokku}} = \frac{R_e \cdot R_1}{R_e + R_1} = \frac{0,009 \cdot 0,0144}{0,009 + 0,0144} \approx 0,00558 \Omega \quad (3.11)$$

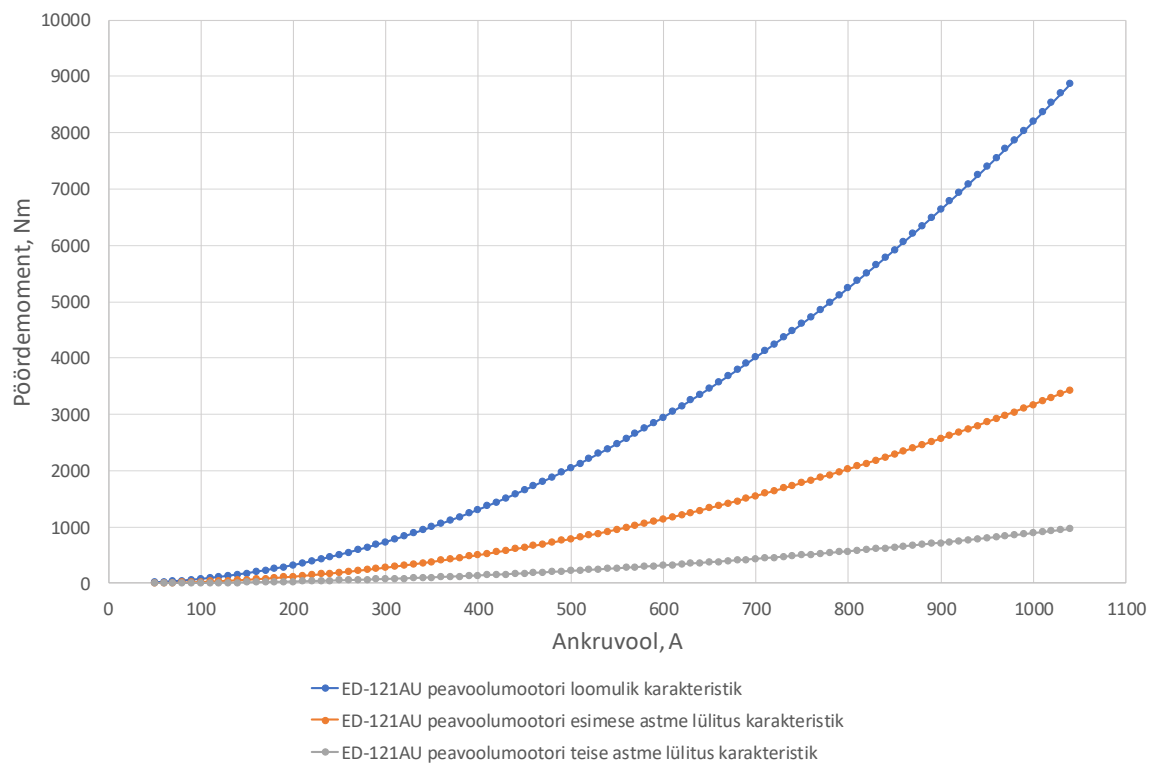
Arvutame kui palju voolu liigub läbi šunttakisti veomootori nimivoolu näitel.

$$I_{\text{šuntR1}} = I \cdot \frac{R_{\text{kokku}}}{R_1} = 880 \cdot \frac{0,00558}{0,0144} = 388,46 \text{ A} \quad (3.12)$$

Ehk ergutusmähise voolu vähenemine on umbes 38%. Kš2 kontaktori rakendumisel lülitatakse lisaks šunttakisti R2, ja tekib kaks ergutusmähisega paralleelset takistit. Arvutades ekvivalentse takistuse väärtuse ja leides voolu kasutades valemit 3.12 saame teise astme ergutusmähise vooluvähendamiseks ≈67%. Ergutusmähise šunteerimise karakteristikud on toodud Joonis 3.4 ja Joonis 3.5.



Joonis 3.4. ED-121AU peavoolumootori loomulik, esimese- ja teise astme lülituse pöörlemisageduse ja ankruvoolu omavaheline sõltuvus



Joonis 3.5. ED-121AU peavoolumootori loomulik, esimese- ja teise astme lülituse pöörlemisageduse ja ankruvoolu omavaheline sõltuvus

Ergutusmähise šunteerimine annab laialdase võimaluse reguleerida veduri veokarakteristikut. Kuna ergutusmähise ja šuntide takistused on väikesed, siis on kadu samuti väike, mis teeb antud reguleerimismeetodi ka ökonoomseks.

3.3 TEP70 koormuskarakteristik

Veduri veojõud on veomootorite poolt saavutatav jõud, mis paneb veduri liikuma. Veojõu arvutamine on veduri opereerimise kavandamisel väga oluline, kuna sellega saab vältida veduri ülekoormamist veduri opereerimisel. Veojõudu saab leida kahel viisil: Esiteks teoreetiline, kus veojõud arvutatakse veduri tehniliste andmete põhjal ja võetakse arvesse veduri mehaanilised ja elektrilised parameetrid. Teiseks on katse-eksituse meetod, mis põhineb katsetele ja mõõtmistele. Allpool on toodud teoreetilised arvutused, mis põhinevad [14] arvutustele.

Veduri koormuse karakteristik sõltub mitmetest parameetritest. Vagunite mass, mis antud konkreetse juhtumi jaoks on 90 tonni, rongi kiirusest, raudtee omadustest, kus võetakse arvesse kalle ja kõverusraadius. Lisaks ilmastikutingimused, mis mõjuvad rongi rataste ja raudtee tee omavahelisele hõõrdejõule.

Samuti, mis tahes süsteemis on olemas kaod, mida tuleb arvestada. Veojõu arvutamisel tuleb arvestada kõige suurmate kadudega. Veojõu efektiivsuse (η_{tot}) arvutamisel võeti arvesse veomootorite efektiivsust ($\eta_{mot} = 91,1\%$), veomootorite generaatori efektiivsust ($\eta_{gen} = 94,8\%$) ja reduktori efektiivsust ($\eta_{mec} = 98,0\%$), mida arvutati valemiga 3.13.

$$\eta_{tot} = \eta_{mot} \cdot \eta_{gen} \cdot \eta_{mec} \quad (3.13)$$

Kogu takistusjõu ($F_{koormus}$) saab arvutada 3.14 abil, kus F_{shj} on staatiline hõõrdejõud, F_{tee} on veeretakistusjõud ja $F_{\delta hk}$ on õhutakistusjõud.

$$F_{koormus} = F_{shj} + F_{tee} + F_{\delta hk} \quad (3.14)$$

Staatilist hõõrdejõudu on võimalik arvutada Valem 3.15 abil, kus m_{ved} on veduri mass, m_{vag} on vaguni mass, n on vagunite arv ja g on raskuskiirendus.

$$F_{shj} = 7.5 \cdot 10^{-3} \cdot (m_{ved} + n \cdot m_{vag}) \cdot g \quad (3.15)$$

Veeretakistusjõud võtab arvesse raudtee kõveruse raadiust, rööpa ja ratta vahelist hõõrdumist ning vaguni massi, mida saab arvutada valemi 3.16 abil, kus i on tee kalle, σ on inertsitegur ja μ_r veeretakistus.

$$F_{tee} = \sigma \cdot (m_{ved} + n \cdot m_{vag}) \cdot \left(\mu_r + \frac{i}{1000} \right) \cdot g \quad (3.16)$$

Õhutakistusjõud sõltub õhu liikumiskiirusest, vagunite arvust ja A_{hj} veduri esiosa pindalast, C on veduri ja vaguni õhutakistus tegur ning selle saab arvutada valemi 3.17 abil, kus v on veduri kiirus.

$$F_{\text{õhk}} = \frac{1}{2} \cdot \rho_{\text{õhk}} \cdot (C_{ved} + n \cdot C_{vag}) \cdot A_{hj} \cdot v^2 \quad (3.17)$$

Ülekantava veojõu jaoks tuleb arvutada kaks erinevat liivatatud rööpa haardetegurit (Curtius-Kniffler). Esimene hõlmab kuiva pinda (valem 3.18) ja teine on mõeldud märjale pinnale (valem 3.19), kus v on veduri kiirus km/h.

$$\mu_{kuiv} = \frac{7.5}{v + 44} + 0.161 \quad (3.18)$$

$$\mu_{m\text{ärg}} = \frac{7.5}{v + 44} + 0.13 \quad (3.19)$$

Erinevate ilmastikutingimuste arvesse võtmiseks tuleb maksimaalne veojõud arvutada, kasutades valemid 3.20 ja 3.21.

$$F_{\text{koormus, kuiv}} = \mu_{kuiv} \cdot m_{ved} \cdot g \quad (3.20)$$

$$F_{\text{koormus, märg}} = \mu_{m\text{ärg}} \cdot m_{ved} \cdot g \quad (3.21)$$

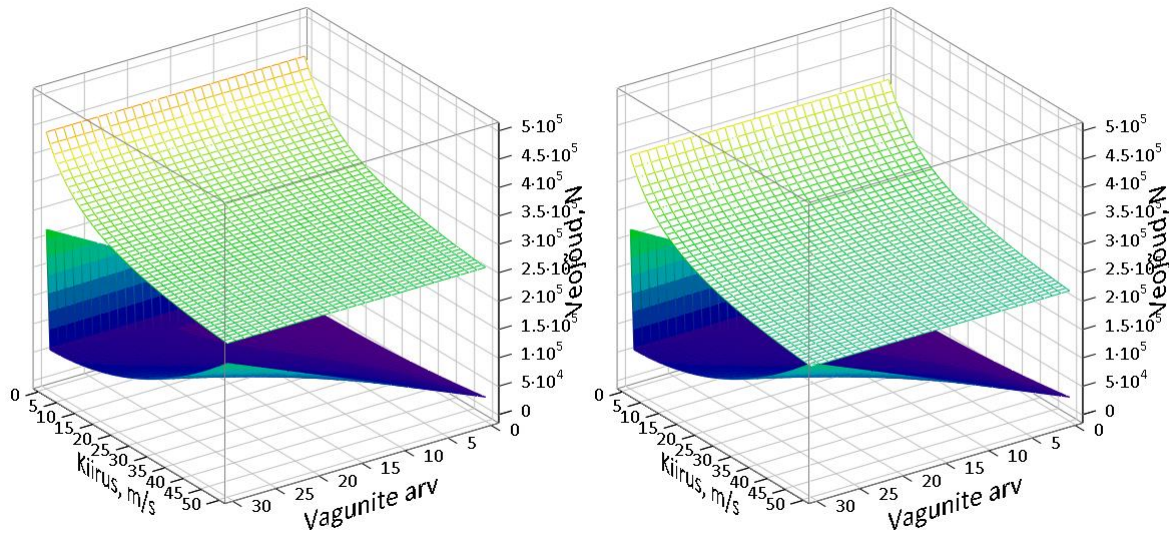
Mida märjem on raudtee rööpa ja veduri ratta vaheline pind, seda vähem hõõret tekib nende pindade vahel. Seda tuleks maksimaalse veojõu arvutamisel arvestada, kuna maksimaalne veojõud peab olema suurem kui vastandjõudude kombinatsioon Valem 3.22.

$$F_{\text{koormus, märg}} > F_{\text{koormus}} \quad (3.22)$$

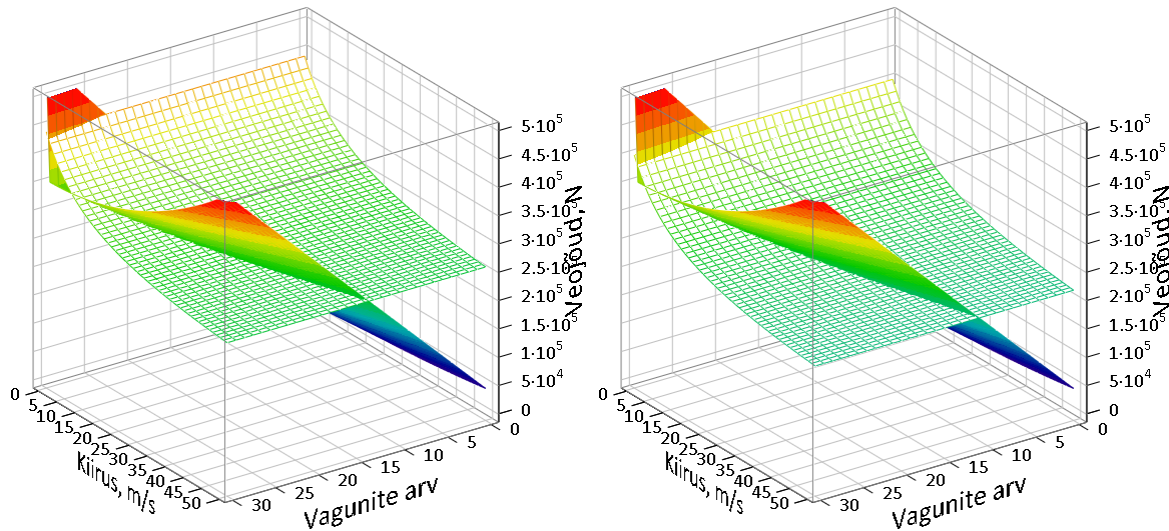
Joonis 3.6 ja Joonis 3.7 on näidatud, kuidas muutub veojõud juhul kui raudtee tee on kuivas ja märjas keskkonnas 0‰ ja 10‰ kallakul. Antud parameetrid muutuvad kõige sagedamini ja nende võrdlus annab üldise pildi, kuidas saab vedur hakkama erinevates oludes. Teljel x on toodud välja veduri kiirus, teljel y on toodud välja vagunite arv ja teljel z on toodud välja veojõud. Joonis 3.6, kus kallakuga 0‰ ja kuiva raudtee puhul on veojõud alati üleval pool vahemikus 0 - 162 km/h (0 – 45 m/s), mis on veduri maksimaalne kiirus. Antud juhul veduri ülekoormust ei esine ja veduri tööd see ei mõjuta. Sama kallakuga, kuid märja raudtee puhul tõuseb koormusköver 180 km/h (50 m/s) kiiruse juures, kuid ei oma suurt tähtsust, kuna veduri maksimaalne kiirus on disaini poolest piiratud 162 km/h (45 m/s). Joonis 3.7, kus kallakuga 10‰ ja kuiva raudtee puhul esineb liikuma hakkamisel ülekoormus, kus vedur on võimeline vedama 23 vagunit ja maksimaalse kiirusega 72 km/h (20 m/s).

Joonis 3.7, kus kallakuga 10‰ ja märja raudtee puhul on koormusköver veel suurem ja piirab veduri maksimum kiirust 54 km/h (15 m/s) ja jõudlust 21 vaguniga.

Erinevate raudtee nõlvade ja ilmastikutingimuste uurimisel järeldub, et väga oluline on arvestada antud parameetreid veduri õige kasutamise jaoks, kuna nii tee kallak kui ka ilmastikutingimused avaldavad suurt mõju veduri käivitamisel, võimaliku vagunite arvu veole ja maksimum kiirusele.



Joonis 3.6. TEP70 veojõud 0‰ kallakul kuiva (vasakul) ja märja (paremal) raudtee puhul



Joonis 3.7. TEP70 veojõud 10‰ kallakul kuiva (vasakul) ja märja (paremal) raudtee puhul

Lisaks veojõule, mängib suurt rolli veduri töös ka veojõugeneraatori toodetud võimsus. Vajalik võimsus P_{diesel} sõltub veomootorite koormusest $F_{koormus}$, efektiivsuse tegurist η_{tot} , veduri kiirusest v ja võimsusest, mis on vajalik abiseadmete toitek P_{abi} .

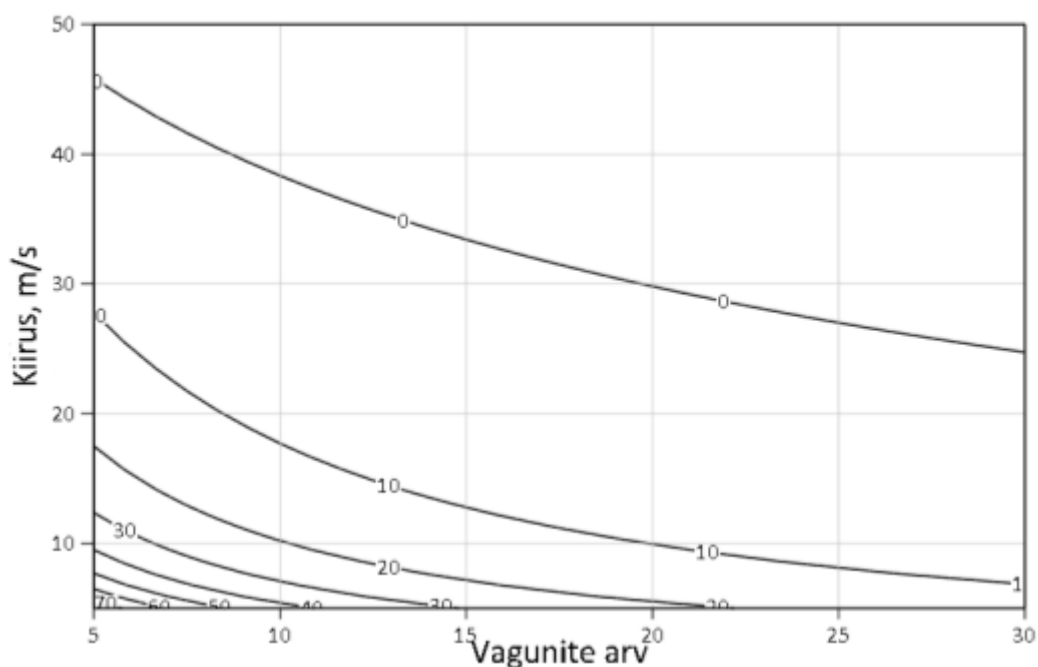
$$P_{diesel} = F_{koormus} \cdot v \cdot \frac{1}{\eta_{tot}} + P_{abi} \quad (3.23)$$

Nagu eelmiselgi juhul, peavad antud arvutustes olema arvesse võetud ilmastikutingimused, kuiva raudtee tee puhul valemis 3.24 ja märja raudtee tee puhul valemis 3.25 .

$$P_{diesel,kuiv} = F_{koormus,kuiv} \cdot v \cdot \frac{1}{\eta_{tot}} + P_{abi} \quad (3.24)$$

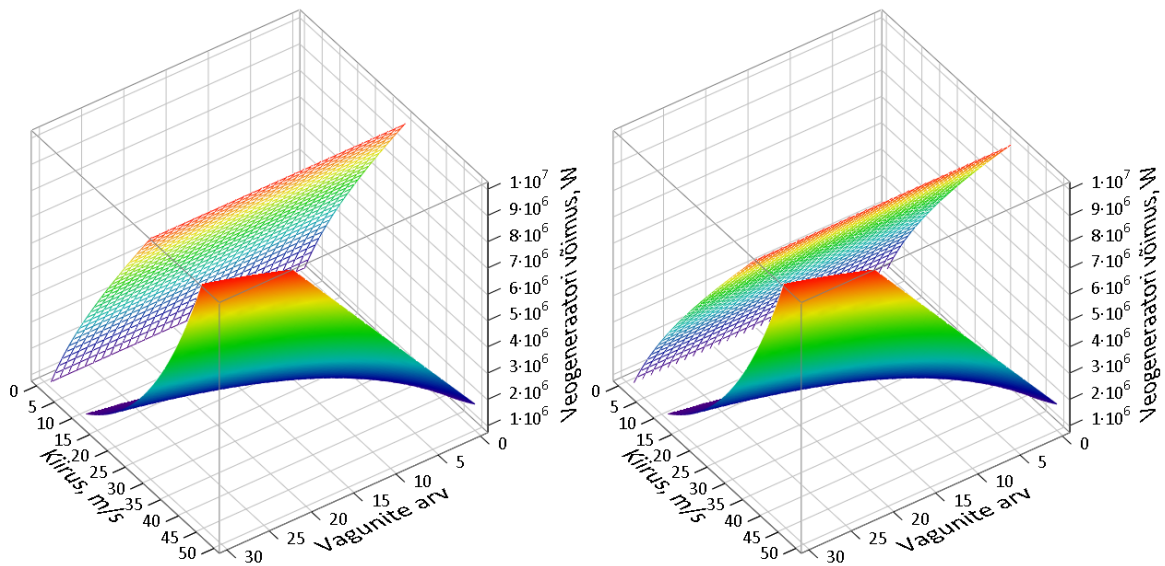
$$P_{diesel,märg} = F_{koormus,märg} \cdot v \cdot \frac{1}{\eta_{tot}} + P_{abi} \quad (3.25)$$

Joonis 3.8 on esitatud veduri kiiruse ja vagunite arvu sõltuvus. Joonis näitab kuidas kiiruse muutused tekivad erineva raudtee kallakuga veogeneraatori arvatud võimsuse korral. Raudtee kallakul on suur mõju veduri tööle, sealhulgas maksimaalsele kiirusele ja koormusele.

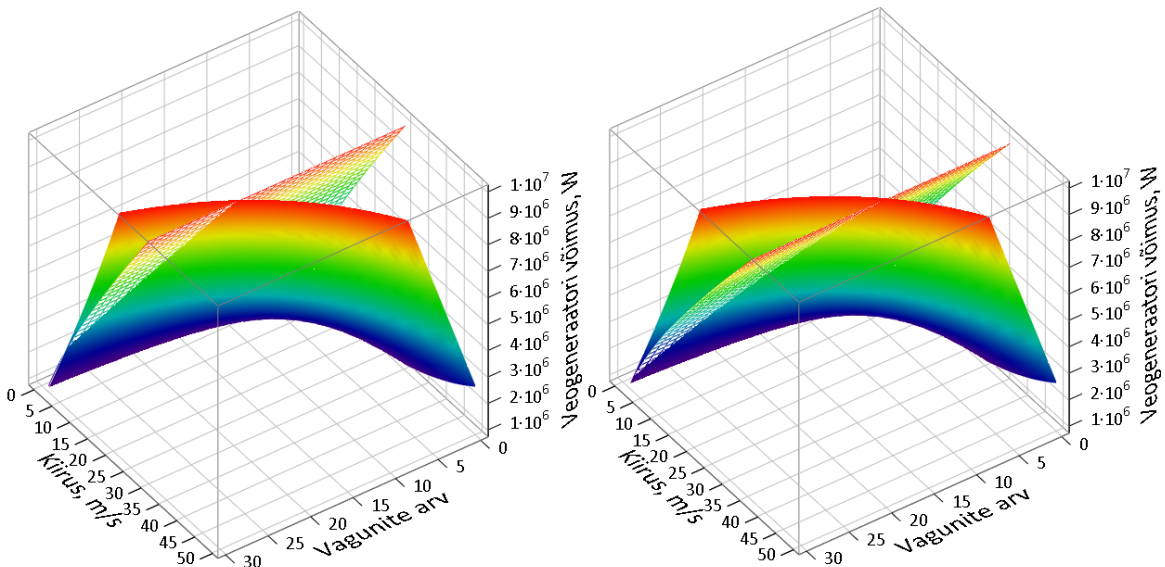


Joonis 3.8. Kiiruse ja vagunite arvu sõltuvus suurimast võimalikust kallakust määratud läbi generaatori võimsuse

Joonis 3.9 ja Joonis 3.10 on näidatud, kuidas muutub veojõu generaatori võimsus kuivas ja märjas keskkonnas 0‰ ja 10‰ kallakul. Joonis 3.9 selgub, et kallakuga 0‰ on piisavalt veogeneraatori võimsust nii kuivas kui ka märjas keskkonnas, et saada hakkama antud koormusega. Joonis 3.10, kus kallakuga 10‰ kuivas keskkonnas ei esine liikuma hakkamisel ülekoormust, kuid veduri töö on piiratud 20 vagunini ja kiiruseni 108 km/h (30 m/s). 30 vaguniga vedur on võimeline saavutama kiirust 25 km/h (7 m/s). Juhul kui raudtee tee on märg, siis 108 km/h (30 m/s) kiirus on võimalik saavutada 15 vaguniga ja 30 vaguniga oleks veduri kiiruseks 7 km/h (2 m/s).



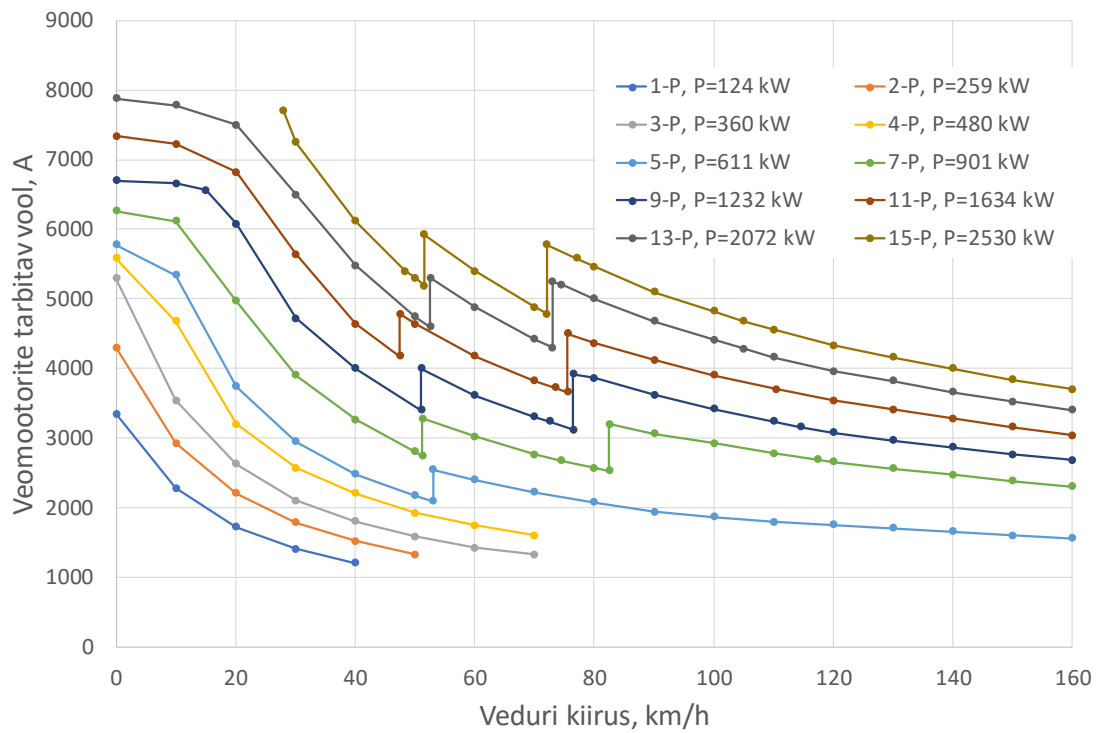
Joonis 3.9. TEP70 veojõu generaatori võimsus 0% kallakul kuiva (vasakul) ja märja (paremal) raudtee puhul



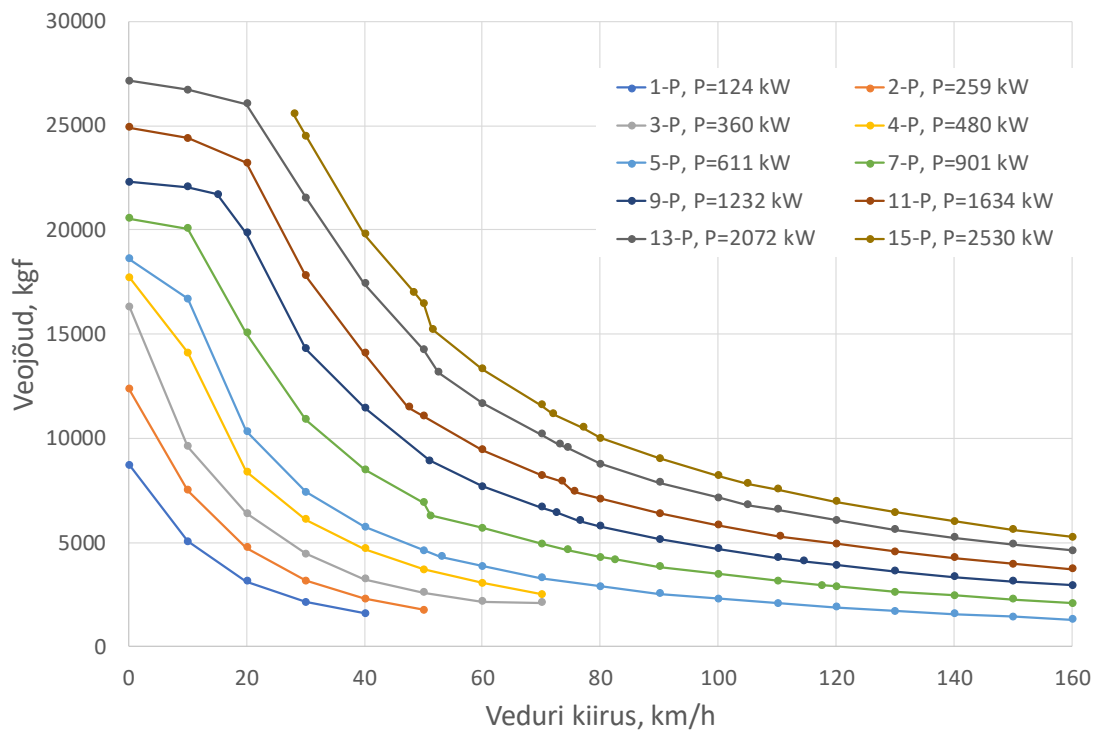
Joonis 3.10. TEP70 veojõu generaatori võimsus 10% kallakul kuiva (vasakul) ja märja (paremal) raudtee puhul

Arvestades eelnevalt arvatud veomootori ja TEP70 karakteristikuid, on võimalik koostada veduri voolu ja kiiruse graafikud erinevatel juhtimisastmetel. Iga kontrolleri positsioon on määratud kindla veogeneraatori võimsusega. Joonis 3.11 on näidatud veduri voolu ja kiiruse sõltuvus erinevatel kontrolleri positsioonidel. Positsioon I kuni IV ei oma elektrilist käiguvahetust, mis tehakse läbi ergutusmähise šunteerimise. Alates viiendast kontrolleri positsioonist toimub üks elektriline käiguvahetus, seitsmendast positsioonist edasi toimub neid kaks. Graafikute järgi näeb, et esimene šunteerimine toimub kiiruse juures 50 km/h ja teine 75-80 km/h. Reaalses olukorras on kiiruse muut palju sujuvam kui see on nähtub teoreetilistes arvutustes.

Joonis 3.12 on näidatud veduri veojõu ja kiiruse graafik, mis küll sarnaneb Joonis 3.11 kuid ümberlülitamise astmed ei ole nii märgatavad.



Joonis 3.11. Veduri TEP70 voolu ja kiiruse graafik erinevatel kontrolleri positsioonidel



Joonis 3.12. Veduri TEP70 veojõu ja kiiruse graafik erinevatel kontrolleri positsioonidel

4. Mõõtmised

Mõõtmised olid teostatud detsembri alguses 2019. aastal, ning need tehti veduril TEP70-0237. Mõõtmised olid teostatud selleks, et kontrollida teoreetiliste karakteristikute korrektsust. Mudeli kontrollimiseks tuli mõõta veomootorite vool, sünkroongeneraatori väljundpinge peale alaldit ja veduri kiirus. Vedurit tuli opereerida erinevatel kontrollieripositsioonidel ning kiirus pidi ületama teise astme elektrilist käiguvahetust, mis oli orienteeruvalt üle 80 km/h.

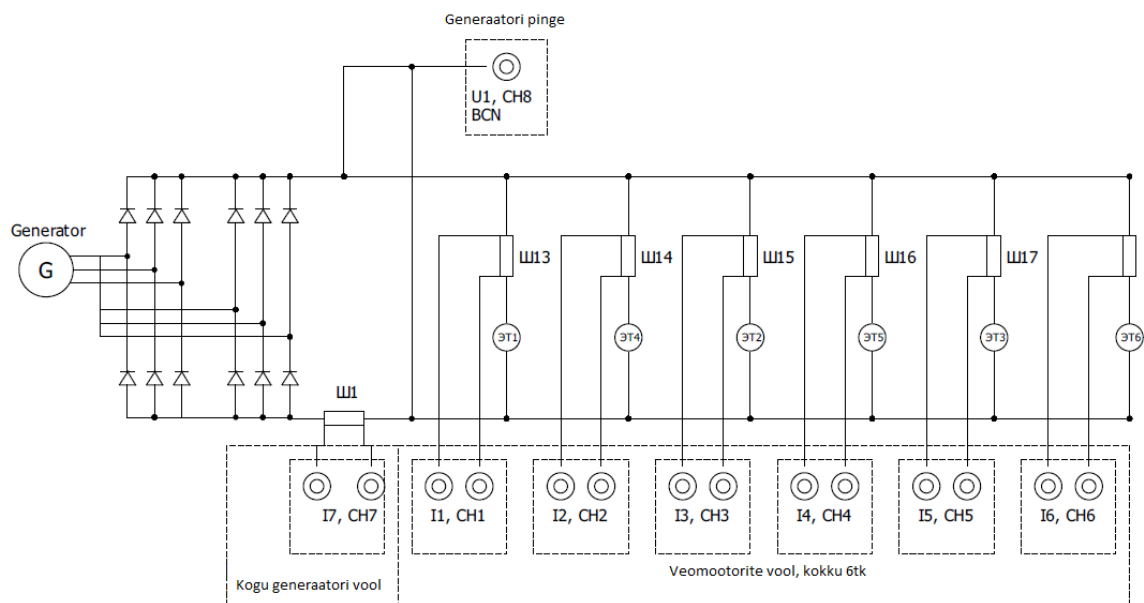
4.1 TEP70 veduri mõõtepunktid ja mõõteskeem

Teoreetiliste karakteristikute kontrollimiseks tuli koostada mõõteskeem järgmiste parameetrite mõõtmiseks:

1. Sünkroongeneraatori väljundpinge peale alaldit ehk pinget, mis toidab veomootoreid ja veduri abiseadmeid
2. Sünkroongeneraatori väljundvool ehk vool, mis toidab veomootoreid ja veduri abiseadmeid
3. Iga veomootori vool, selleks et veenduda veomootorite sümmeetrilisuses ja saada teada kui palju voolu tegelikult läheb läbi veomootorite ja kui palju abiseadmetele
4. Veduri kiirus

Dokumentatsiooni põhjal koostati mõõteskeem (Joonis 4.1), mille järgi ühendati mõõteseadmed. Sünkroongeneraatori väljundpinget mõõdeti diferentsiaal-mõõteprooviku *CT2593-1* abil, mille puhul alaldi ühendamispunktid on näidatud Joonis 4.1. Kogu veduri automaatika jaoks olid vedurisse paigutatud erinevad mõõtesundid. Kogu veogeneraatori voolu mõõtmiseks kasutati mõõtesünti Š1 (Ш1) ja iga veomootori jaoks oli eraldi mõõtesunte Š13-Š18 (Ш13-Ш18), mis olid paigutatud jadamisi. Mõõdetud seadmete tehnilised andmed on näha Tabel 11. Kuna veduri seadmed asuvad suletud ruumis, siis mõõteseadmete ühendamiseks kasutati varjestatud kaableid, selleks et minimeerida häiringuid. Kiiruse mõõtmiseks kasutati seadet *Garmin GPS 18x*, mis oli kinnitatud veduri kere peale väljaspool kabiini. Mõõtetulemuste salvestamiseks kasutati *Dewetron* mõõtekompleksi, mis võimaldas kõik üleval toodud parameetrid salvestada ajaga sünkroonselt.

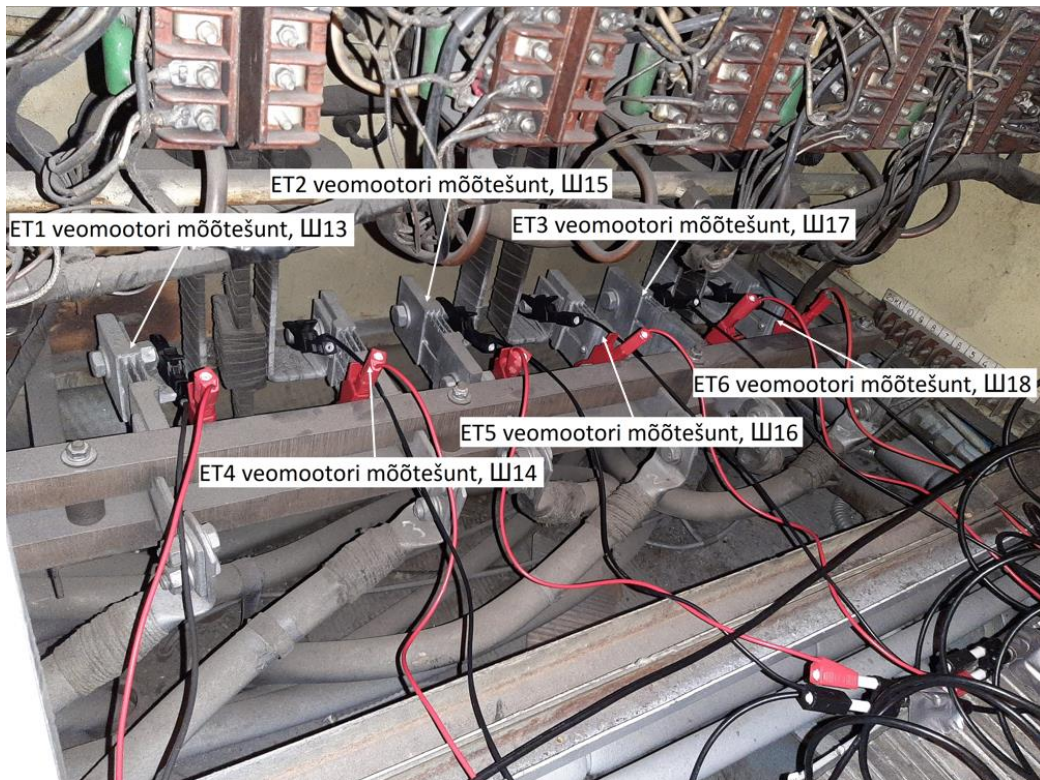
Joonis 4.2, Joonis 4.3 ja Joonis 4.4 näitavad reaalsed TEP70-0237 ühenduskohad elektriliste parameetrite mõõtmiseks. Seadmetega ühendamiseks kasutati krokodill mõõteotsikud, mida pikendati lühikese juhtmega, mis seejärel ühendati *BNC* otsaga. Kõik seadmed ühendati mõõtekompleksi külge kasutades *BNC* ühendust.



Joonis 4.1. Lihtsustatud TEP70-0237 mõõteskeem

Tabel 11. Mõõdetud seadmete tehnilised andmed

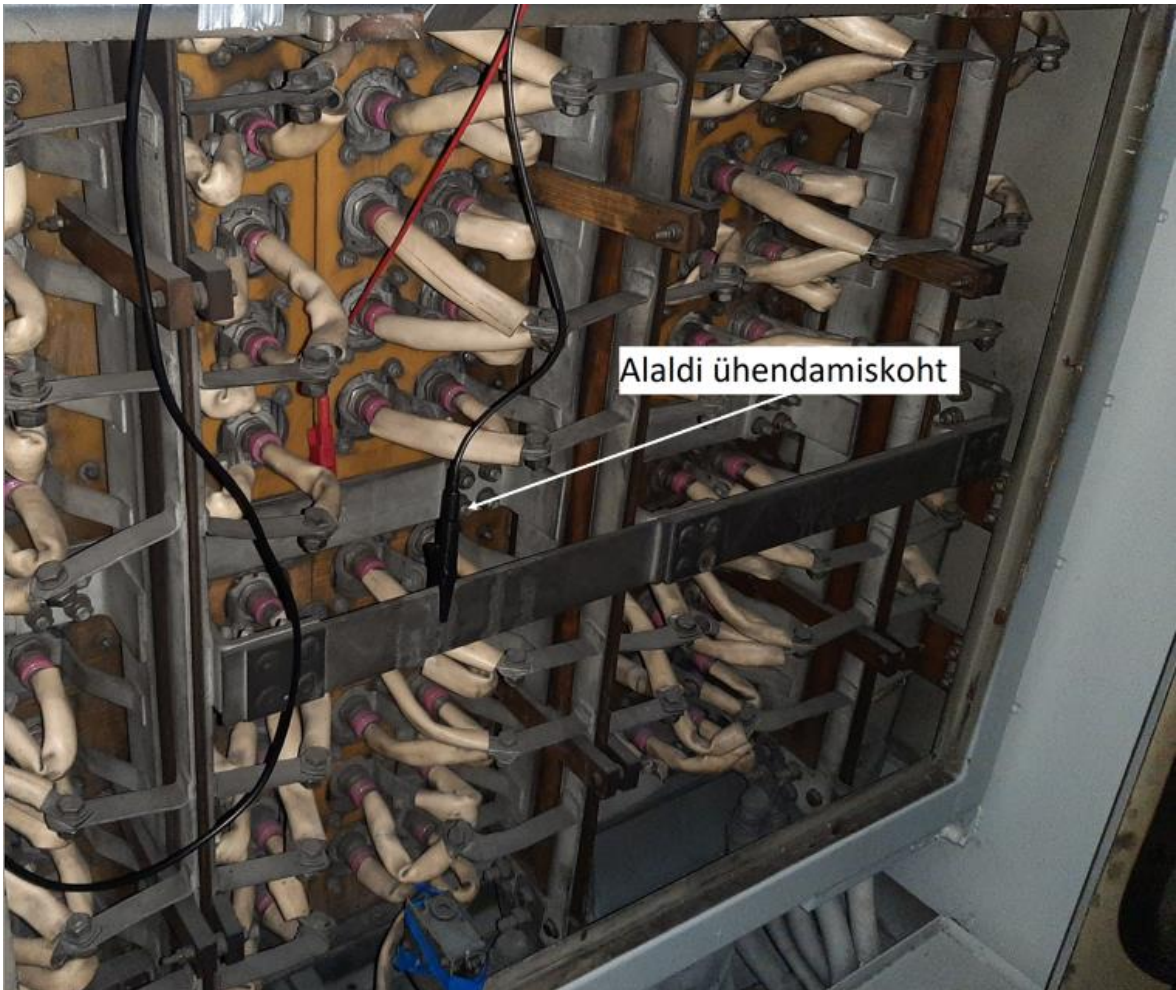
Mõõteala	Asukoht skeemil	Šundi nimivool, A	Šundi väärtus, Ω	Pinge mõõtevahemik, V
ET1 veomootori vool	Щ13	1000	0.000075	0 – 0,075
ET4 veomootori vool	Щ14	1000	0.000075	0 – 0,075
ET2 veomootori vool	Щ15	1000	0.000075	0 – 0,075
ET5 veomootori vool	Щ16	1000	0.000075	0 – 0,075
ET3 veomootori vool	Щ17	1000	0.000075	0 – 0,075
ET6 veomootori vool	Щ18	1000	0.000075	0 – 0,075
Generaatori vool	Щ1	7500	0.000010	0 – 0,075
Generaatori pinge	Alaldi	-	-	0 – 1000



Joonis 4.2. TEP70-0237 veomootorite mõõtesüntide ühendamiskoht



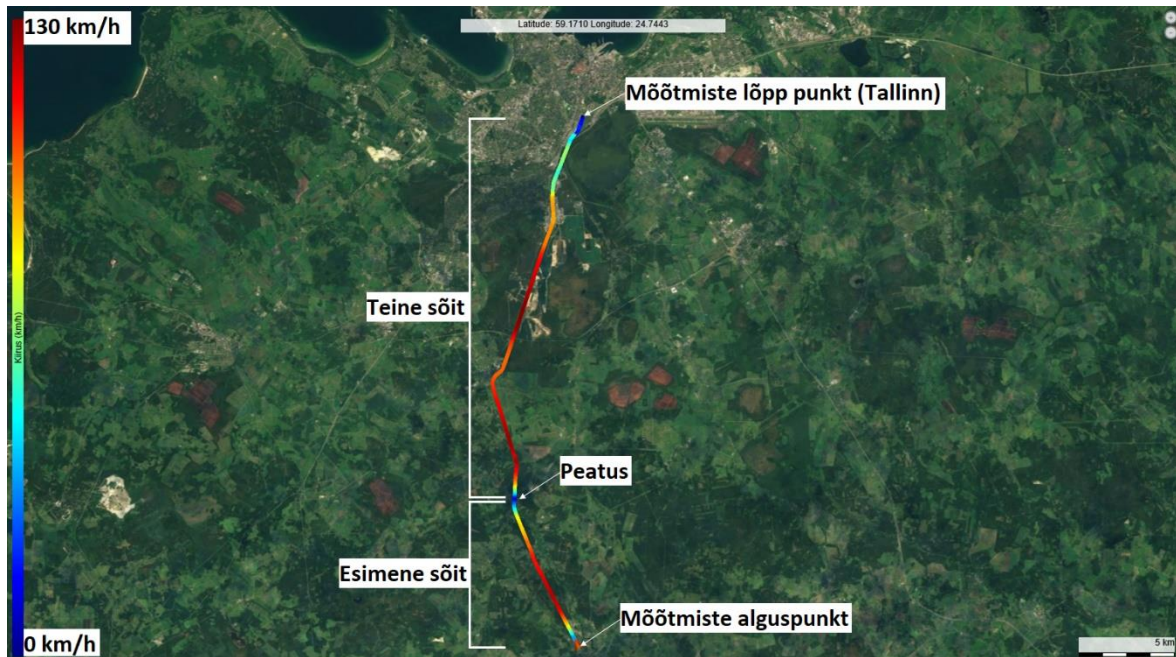
Joonis 4.3. TEP70-0237 sünkroongeneraatori mõõtesundi ühendamiskoht



Joonis 4.4. TEP70-0237 alaldi ühendamiskoht

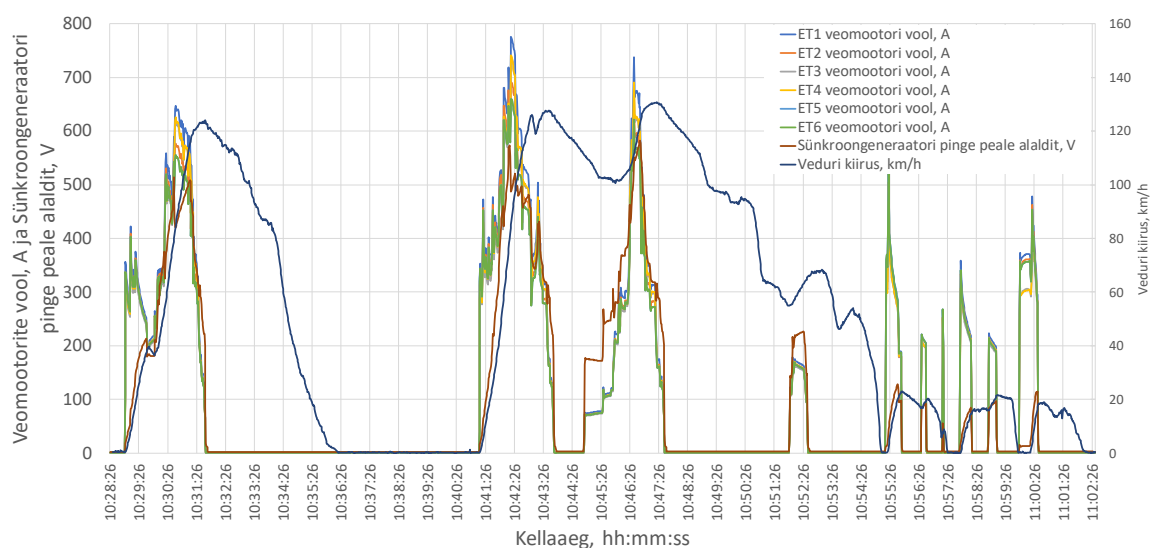
4.2 Veduri TEP70 mõõtetulemused

Mõõtmine toimus 05.12.2019 hommikul. Seadmed olid ühendatud vastavalt mõõteskeemile ja esimene katse tehti Tallinn-Kohila suunas, kus tehti proovikatsed selleks, et veenduda katseseadmete töö korrektsuses. Põhimõõtmine algas Kohila-Tallinn lõigul, kus 10:28 alustasime liikumist Tallinna poole. Kogu teekonda on võimalik näha Joonis 4.5. Kogu mõõtmiskatse on jagatud kahte ossa. Esimene sõit kestis 8 minutit, millele järgnes 5 minutiline peatus. Teine sõit kestis 21 minutit ja lõppes Tallinna depoo. Kogu mõõtmine kestis 34 minutit, mille jooksul läbiti 30,2 km, kus vedur saavutas maksimaalse kiiruse 130 km/h. Mõlema sõidu ajal saavutati nii esimene kui ka teine ergutusmähise šunteerimine.



Joonis 4.5. Kohila-Tallinn mõõtmiste ajal läbitud teekond

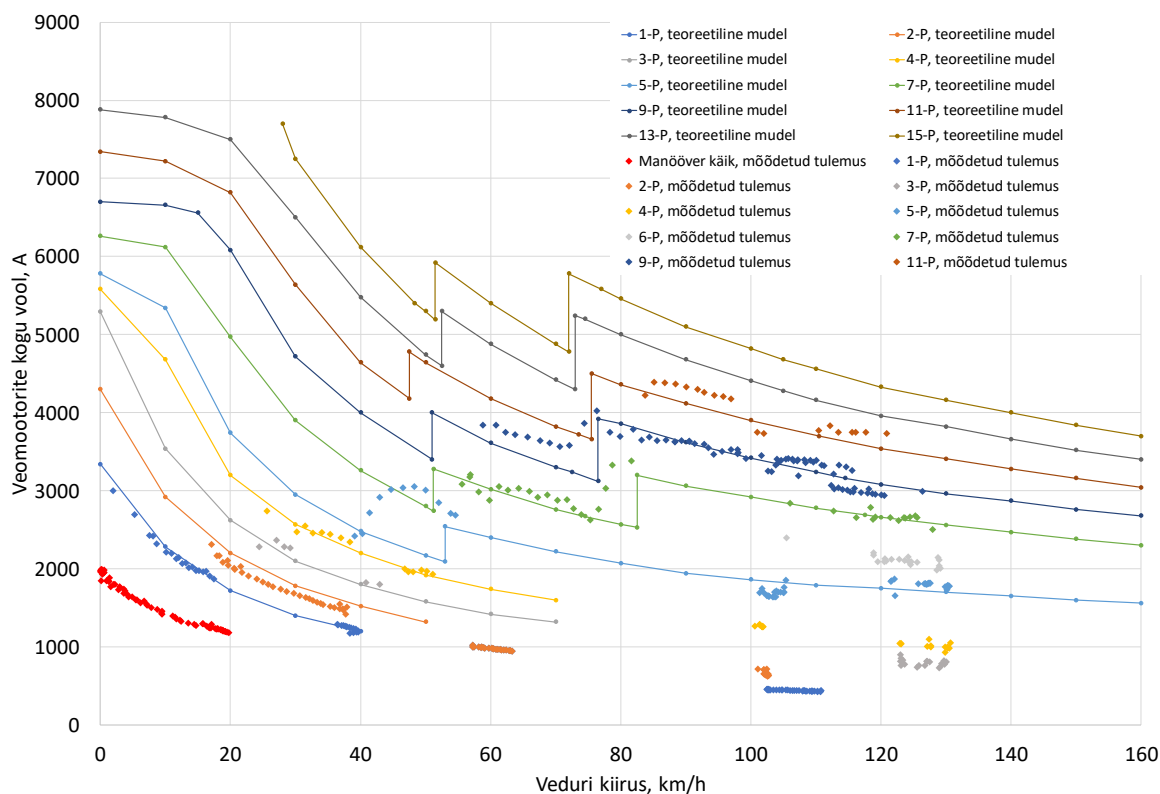
Mõõtmistulemused on toodud välja Joonis 4.6, kus on näidatud kogu mõõteperiood koos sõidu ja peatustega. Joonis 4.6 on näha, et veomootorite vool on sümmeetriline väiksemal võimsusel, kuid ebasümmeetrilisel tekib suurematel võimsustel nagu katse minutitel 3, 14 ja 19. See võib olla tingitud sellest, et šunteerimistakistid on reguleeritavad ja seadistamisel on tekkinud ebatäpsused. Samuti sinna juurde võib lisada mõõtešuntide mõõtemääramatuse, mis antud šuntide puhul on 0,5%. Veduri kiiruse pealt võib näha, et veduri liikumise ajal ei ole veomootorid alati töös. Kui vedur saavutab vedurijuhi poolt soovitud kiiruse, siis veomootorid lülitakse välja ning edaspidine liikumine toimub inertsil abil.



Joonis 4.6. TEP70 mõõtetulemused lõigul Kohila-Tallinn

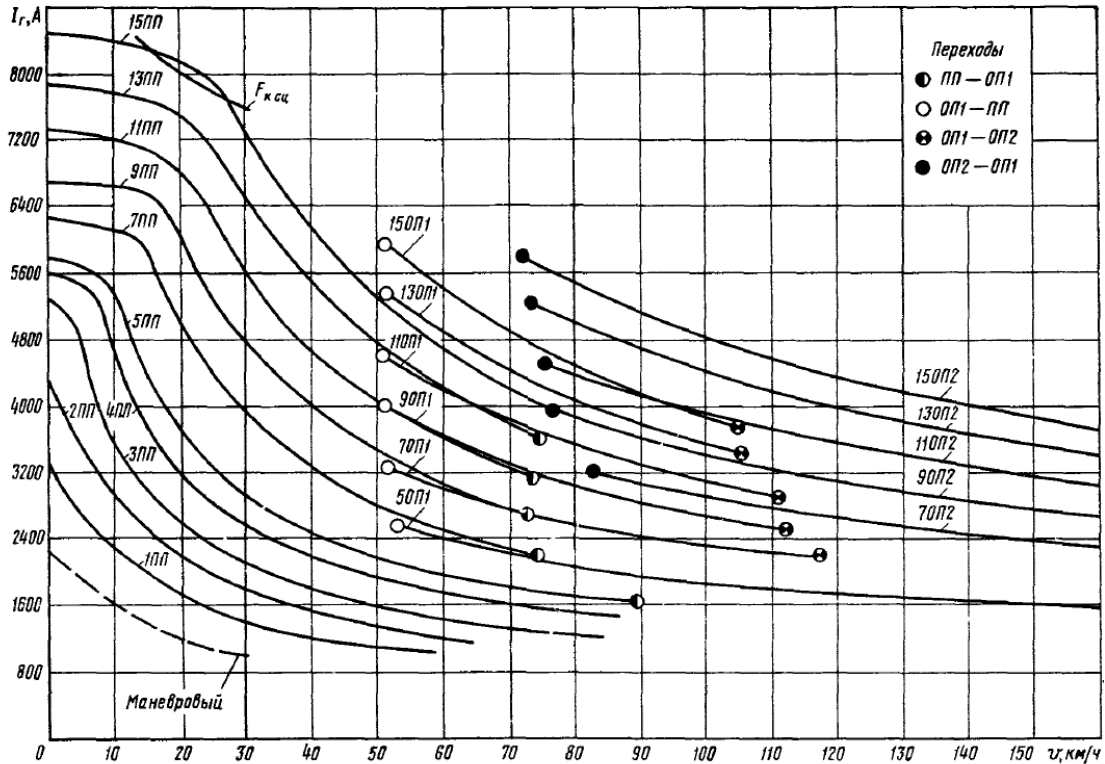
4.3 Mõõtetulemuste analüüs

Saadud andmete põhjal teostati mõõtetulemuste analüüs, et kontrollida teoreetiliselt saadud karakteristikud. Iga veomootori, sünkroongeneraatori pinge ja koguvoolu jaoks oli eraldi mõõtekanal, mis salvestas 1000 mõõtepunkti sekundis ehk 34 minuti jooksul tekkis üle 16 miljoni mõõtepunkti. Samas, GPS seade suutis salvestada üks kord sekundi jooksul. Veduri elektriliste parameetrite mõõtepunktid keskmistati ühe sekundini kasutades *Matlab* programmi. Mõõtetulemused kanti teoreetiliste karakteristikute graafikule, mida on võimalik näha Joonis 4.7.



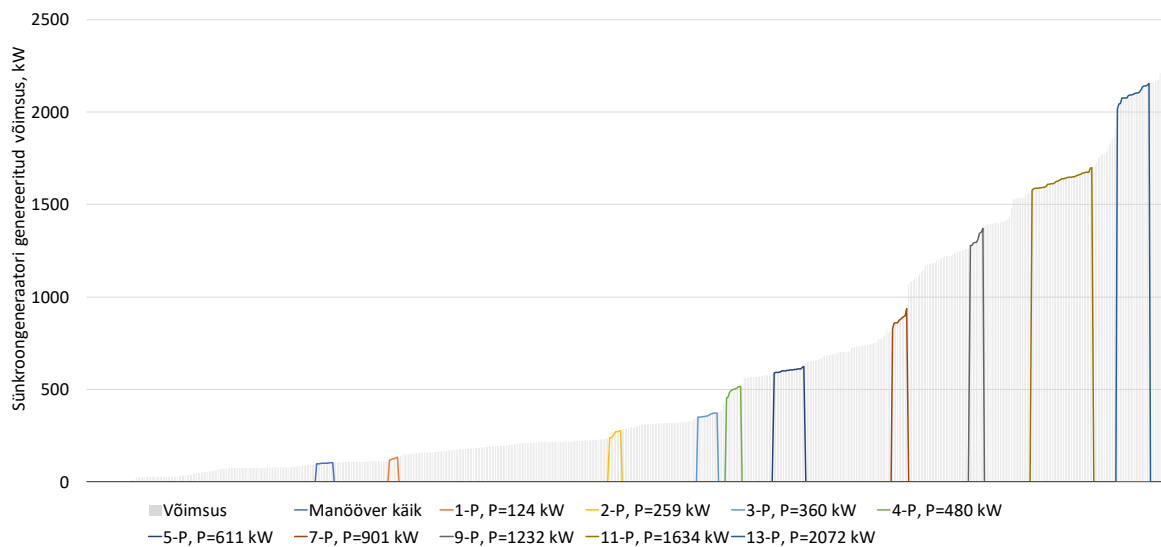
Joonis 4.7. Veduri TEP70-0237 teoreetiline ja mõõdetud veojõu ja kiiruse graafik erinevatel kontrolleri positsioonidel

Mõõdetud tulemused asuvad teoreetiliste karakteristikute ümber. Lisaks kontrolleri positsioonidele I-XV kasutati ka manööverkäiku, mis on toodud välja Joonis 4.7 punase punktiirina. Joon vastab tõele kuna see langeb kokku Joonis 4.8 näidatud tulemusega, mis oli võetud veojõu teoreetiliste arvutuste käsiraamatust. [9] Enamasti kasutati sõidu ajal manööverkäiku ja veduri kontrolleri positsiooni nr 1, 2, 3, 9 ja 11.



Joonis 4.8. Veduri TEP70 käsiraamatu veokarakteristikud [15]

Joonis 4.7 järgi toimub ergutusmähise šunteerimine 50 – 60 km/h vahel ja teine 75 – 80 km/h vahel. Teoreetiline mudel näitab reeglina ideaalset olukorda. Reaalselt võtab ümberlülitamine rohkem aega ja voolu kasv on sujuvam. Mõõdetulemuste erinevus matemaatilise mudeliga on tingitud veomootorite ebasümmeetrilisusest, kus samal ajahetkel veomootorite tarbitav vool on erinev.



Joonis 4.9. Sünkroongeneraatori võimsus kogu sõidu jooksul ja veduri kontrolleri positsioonidele vastavad võimsused

Joonis 4.9 on näidatud sünkroongeneraatori genereeritud võimsus kogu sõidu jooksul, sorteerituna kasvavas järjekorras, kus on lisatud iga kontrolleri positsiooni määrav võimsus. Värvidega on näidatud ümberlülituse kohad vastavalt arvutusmodelile. Joonis 4.9 lähtuvalt on näha, et arvutuslikud ja mõõdetud ümberlülitused langevad kokku, tekitades astmelist võimsuse kasvu. Antud joonise alusel saab hiljem, pärast reduktori vahetust, viia läbi katsetulemuste võrdlused, tagamaks korrektsed ümberlülitused ümberehitatud veduril.

5. Veokarakteristikute muutmine

Tellija poolne soov, kelleks oli Ühinenud Depood AS, oli muuta TEP70 veokarakteristikuid nii, et see vastaks järgmistele nõuetele:

- 1) Veduri maksimaalne kiirus ei ületaks 120 km/h
- 2) Pidevvalituse kiirus ei ületaks 37,5 km/h
- 3) Veojõud 22670 kgf

Antud veojõu suurendamise mõtte on kasutada TEP70 vedur kaubavedurina ning kiiruse langetamine on tingitud sellest, et Eestis on piiratud kaubaveduri kiirus 120 km/h.

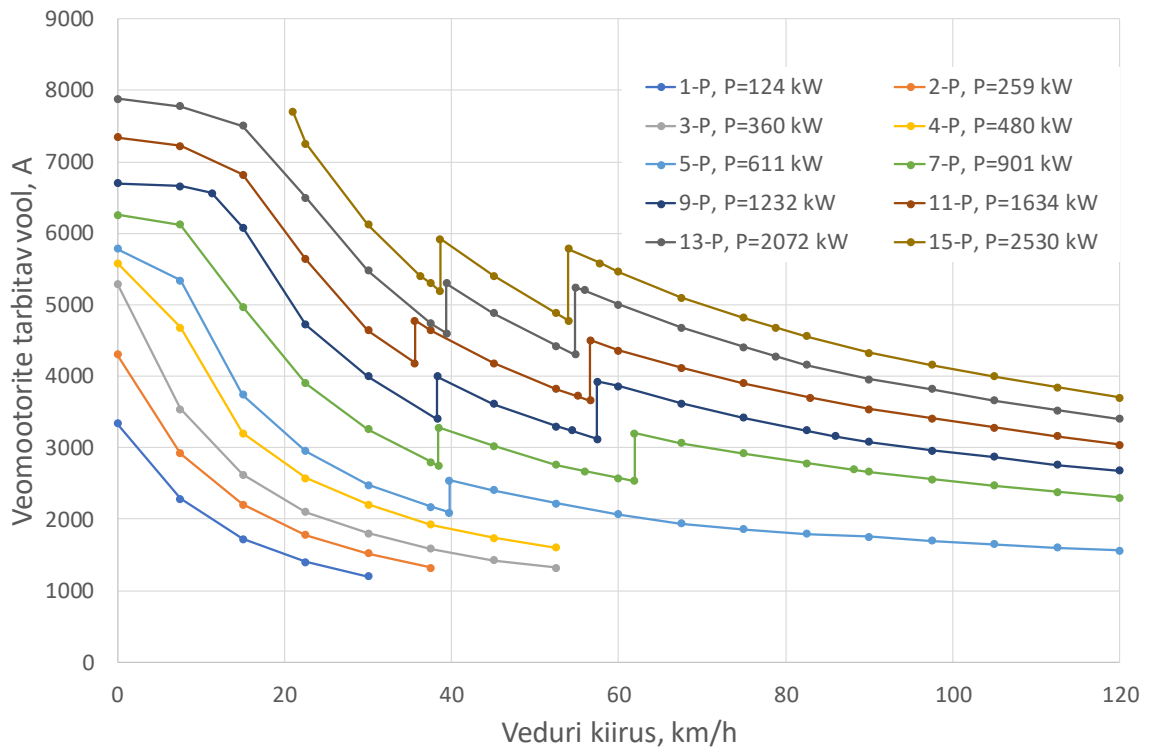
Veduri veojõudu on võimalik muuta mitmel viisil, kuid veduri seadmete vahetamine pidi olema minimaalne, sest sellest sõltub ka muudatuse elluviimise hind.

Veduri reduktori muutmisel on võimalik vähendada kiirust ja suurendada veojõudu. Samuti on antud meetod võrdlemise odav, kus tuleb vahetada välja ainult üks osa vedurist ja ei ole vajadust osta uusi veomootoreid ja sünkroongeneraatorit. Generaatori ja veomootori vahetuse puhul lisanduksid kulud automaatika süsteemide ümberehituseks, mis tähendaks kogu veduri moderniseerimist. TEP70 veduri olemasolev reduktor on ülekandesuhtega 3,12. Joonis 5.1 ja Joonis 5.2 on toodud välja teoreetilised karakteristikud lähtudes, et veduril TEP70 on väljavahetatud reduktor uue ülekandesuhtega 4,15 ning muid muudatusi süsteemis ei ole tehtud.

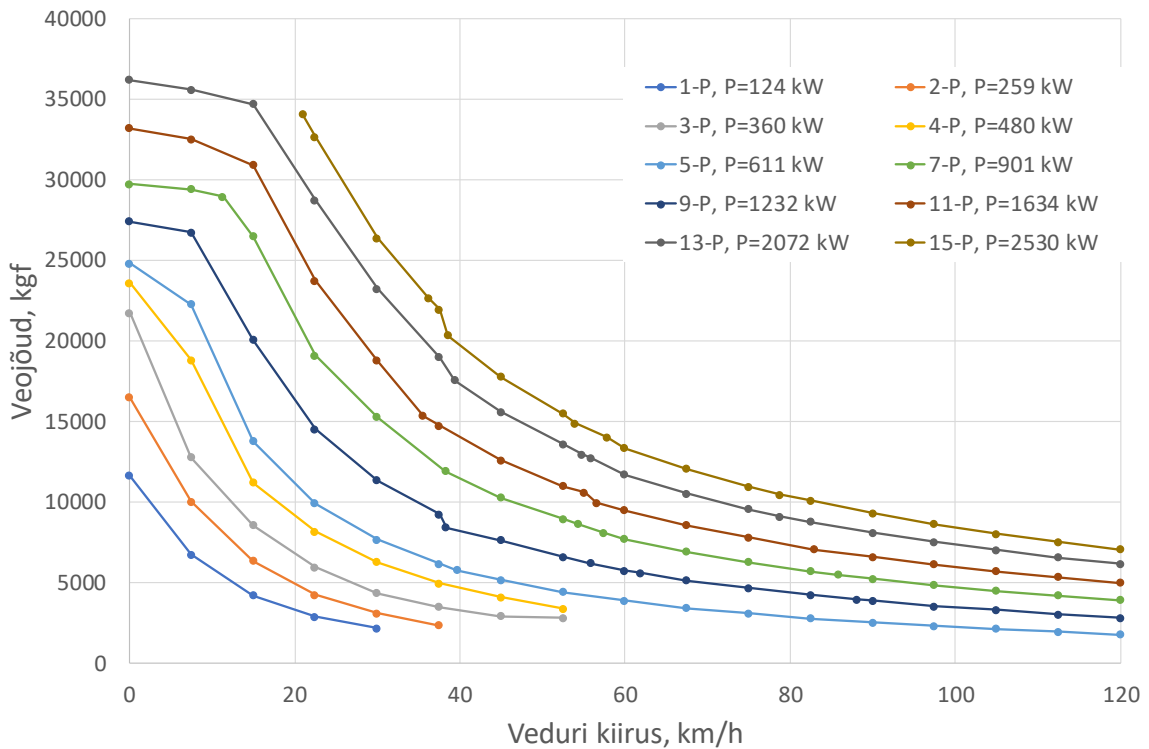
Joonis 5.1 on ära toodud voolu sõltuvus veduri kiirusest erinevatel kontrolleri positsioonidel väljavahetatud reduktoriga. Võrreldes originaalreduktori karakteristikutega on ergutusmähise šunteerimine nihutatud ja astmete lülitused toimuvad väiksematel kiirustel. Esimene astmelülitus toimub veduri kiirusel 37 – 40 km/h, mis on umbes 5 km/h algselt. Teise astme lülitus toimub veduri kiirusel 55 – 62 km/h.

Joonis 5.2 on toodud veojõu sõltuvus veduri kiirusest erinevatel kontrolleri positsioonidel väljavahetatud reduktoriga. Väljavahetatud reduktoriga suurenes veojõud 25% kogu karakteristiku ulatuses.

Vastavalt tellija poolt antud nõuetele, oli veduri pidevvalituse kiirus langetatud 48 km/h pealt 37,5 km/h peale ja veduri veojõud suurendatud 17000 kgf pealt 22670 kgf peale.



Joonis 5.1. Veduri TEP70 voolu ja kiiruse graafik erinevatel kontrolleri positsioonidel väljavahetatud reduktoriga



Joonis 5.2. Veduri TEP70 moderniseeritud voolu ja kiiruse graafik erinevatel kontrolleri positsioonidel väljavahetatud reduktoriga

Antud veojõu karakteristikud näitavad, et vastavalt tellija soovile on võimalik veduri karakteristikuid muuta reduktori vahetusega. TEP70 puhul sobib uus reduktori ülekandesuhe 4,15 veduri kiiruse langetamiseks ja veojõu suurendamiseks. Soovituslikult tuleks pärast reduktori vahetust korrata mõõtmisseeriat samal trassil ning kõrvutada saadud tulemusi nii arvutusliku mudeliga kui ka enne ümberehitust tehtud katsetustega. Võrdluse alusel saab teha vajadusel seadmete häälestust, tagamaks korrektne käikude ümberlülitus.

KOKKUVÕTE

Eesti on kasutanud raudteed alates 19. sajandist. Selle ajajooksul on tekkinud nii uusi vedureid kui ka uued raudtee liinid, mida kasutatakse inimese ja kauba transportimiseks. Antud valdkond on aktuaalne, sest statistika põhjal on näha, et raudtee kasutamine suureneb inimeste transportimisel ja kaubaveos. Uue liinide loomised nagu näiteks Rail Baltic projekt, kus on võimalus ühendada Balti riigid kogu Euroopaga, annab võimaluse uuele koostööle ja majanduskasvule. Euroopa visioon näeb ette keskkonnasõbralikuma transpordi kasutamist ja raudteetransport on üks keskkonna sõbralikum massitranspordi viis.

Eestis on liikvel mitmeid raudtee veeremeid kuid üks viiendik nendest ei ole aktiivses kasutuses. Vanad vedurid seisavad depoos, ning on võimalus need uuesti taaskasutusse võtta. TEP70 on meie piirkonnas levinud vedur, mille moderniseerimise kohta on avaldatud mitmeid töid ja teadusartikleid.

TEP70 on Nõukogude Liidus loodud reisivedur, mis oli TEP60 järeltulija. Vedur TEP60 ei saanud hakkama nende nõuetega, mis olid vajalikud ühiskonnale, mis tõttu loodi TEP70 TEP60 baasil, jättes alles mehaanilise osa, kuid vahetades välja elektrisüsteemi ja veoajami.

TEP70 veoajami jagamine üksikuteks osadeks annab võimaluse analüüsida veduri tööd väiksemas mastaabis. Tehnilise dokumentatsiooni põhjal uuriti veduri veoajami juhtimisloogikat, kus lisaks vedurijuhi kontrolleri on olemas elektriline käiguvahetus ehk ergutusmähise šunteerimine, mis on automatiseeritud süsteem. Sünkroongeneraatori ja veomootori nimiandmed on vajalikud veomootorite karakteristikute loomisel, et hiljem koostada TEP70 veokarakteristikud ja mõõteskeem.

Veomootoritena kasutatakse alalisvoolu peavoolumootoreid. Kasutades veomootori nimiandmeid on loodud loomulikud veomootorite karakteristikud, mis annavad ülevaade voolu/kiiruse ja veojõu/kiiruse suhete kohta.

Võttes arvesse veduri veoajami juhtimisloogika, on loodud TEP70 veduri esimese ja teise astme ergutusmähise šunteeritud karakteristikud erinevatel vedurijuhi kontrolleri positsioonidel. Antud karakteristikud annavad ülevaade veduri võimekusest ja selgitab olukorda enne moderniseerimist.

Lisaks on väljatoodud, millist mõju avaldavad TEP70 veduri tööle erineva nurgaga raudtee kallakud ja erinevad keskkonnatingimused.

TEP70 veduri skeem on loodud veduri tehniliste andmete põhjal. Mõõteskeem sisaldab veduri põhiseadmete mõõtmist, milleks on sünkroongeneraatori ja veomootori pinge ja vool selleks, et kontrollida varem loodud teoreetilised karakteristikud. Tulemused salvestati ja analüüsi kasutades arvutitarkvara, kus hiljem võrreldi tulemust teoreetiliste karakteristikutega. Mõõtetulemused langevad kokku nii veduri käsiraamatu materjalidega kui ka teoreetiliste karakteristikutega. Mõõtmistel leiti, et veomootorid tarbivad voolu ebasümmeetriliselt, mis tõttu esineb viga, kuid teoreetiliste kõveratega võrreldes ei ole see suurem kui 5%.

Töö lisas on teadusartikkel, kus lõputöö autor on osalenud põhiautorina. Artikkel oli esitatud rahvusvahelisel teaduskonverentsil ja publitseeritud (ETIS kategooria 3.1):

- Teadusartikkel 1: Rjabtšikov, V.; Rassõlkin, A.; Kallaste, A.; Vaimann, T.; Lukichev, D. V. (2020). Possibilities of Changing the Transport Characteristics of the TEP70 Locomotive. In: Proceeding of 27th International Workshop on Electric Drives: MPEI Department of Electric Drives 90th Anniversary IWED2020 (1–6). IEEE, Moskva (Venemaa), 2020.

SUMMARY

Estonia has used the railway since the 19th century. During this time, both new locomotives and new railway lines have been used to transport people and goods. This field of research is relevant because statistics show that the use of rail is increasing in the transport of people and freight. The creation of new routes, such as the Rail Baltic project, which has the opportunity to connect the Baltic States with the whole of Europe, provides an opportunity for new cooperation and economic growth. Europe's vision is to use more environmentally friendly transport, and rail transport is one of the most environmentally friendly modes of public transport.

There are several railway vehicles in motion in Estonia, but one fifth of them are not in active use. Old locomotives stand in the depot and can be reused. TEP70 is a widespread locomotive in our region, and many works and research articles have been published on its modernization.

TEP70 is a passenger locomotive created in the Soviet Union, which was the successor of TEP60. The TEP60 locomotive could not meet the requirements of society, which is why the TEP70 was created on the basis of the TEP60, retaining the mechanical part, but replacing the electrical system and the drive.

Dividing the TEP70 traction unit into individual parts makes it possible to analyze the operation of the locomotive on a smaller scale. On the basis of the technical documentation, the control logic of the locomotive traction was studied, where in addition to the driver's controller, there is an electric gearshift, i.e. exiting winding shunting, which is an automated system. The nominal data of the synchronous generator and the traction motor are needed to create the traction motor characteristics in order to later compile the TEP70 traction characteristics and measurement scheme.

DC traction motors are used as traction motors. Using the nominal data of the traction motor, the natural characteristics of the traction motors have been created, which provide an overview of the current / speed and traction / speed ratios.

Considering the control logic of the locomotive traction drive, the characteristics of the first and second stage excitation windings of the TEP70 locomotive have been created at different positions of the locomotive driver's controller. These characteristics give an overview of the locomotive's capacity and explain the situation before modernization.

In addition, the effects of different road slopes and different environmental conditions on the operation of the TEP70 locomotive have been pointed out.

The measuring scheme of the TEP70 locomotive is based on the technical data of the locomotive. The measurement scheme includes the measurement of the main locomotive equipment, which is the voltage and current of the synchronous generator and the traction motor, in order to check the theoretical characteristics created earlier. The results were recorded and analyzed using computer software, which was later compared with the theoretical characteristics. The measurement results coincide with the materials of the locomotive manual as well as with the theoretical characteristics. Measurements have shown that the traction motors consume current asymmetrically, which causes an error, but it does not exceed 5% of the theoretical curves.

There is a research article in the appendix, where the author of the dissertation has participated as the main author. The article was presented at an international scientific conference and published (ETIS category 3.1):

- Publication 1: Rjabtšikov, V.; Rassõlkin, A.; Kallaste, A.; Vaimann, T.; Lukichev, D. V. (2020). Possibilities of Changing the Transport Characteristics of the TEP70 Locomotive. In: Proceeding of 27th International Workshop on Electric Drives: MPEI Department of Electric Drives 90th Anniversary IWED2020 (1–6). IEEE, Moscow (Russia), 2020.

KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] L. Välja, "20. sajandi Eesti raudteejaamad," 2012.
- [2] A. Tulvi, Logistika Õpik kutsekoolidele. 2013.
- [3] A. Rassõlkin, H. Hõimoja, E. Pettai, and N. Tšurkina, "Review of the Estonian Railroad rolling stock and solutions for locomotive modernization," in 10th International Symposium "Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering", Doctoral School of Energy and Geotechnology., 2011, pp. 57-62.
- [4] "Eesti raudtee aastaaruanne 2018," 2018.
- [5] The European Rail Research Advisory Council, "RAIL 2050 VISION," 2017.
- [6] J. Kilter, T. Kangro, T. Sarnet, and I. Palu, Elektriraudtee ja selle mõjud elektrisüsteemi talitlusele, vol. 2015, no. 2. 2015.
- [7] "Eesti Veeremite seeria ja mudelite nimekiri — TrainPix." [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://trainpix.org/show.php?rid=82> [Kasutatud 10.05.2020].
- [8] Tarbijakaitse ja tehnilise järevalve amet, "Raudteeliiklusregister" [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.ttja.ee/et/valdkonnad/raudteeliiklusregister> [Kasutatud 10.05.2020].
- [9] В.Г.Быков; Ю.В.Хлебников; Б.Н.Морошкин; Г.Е.Серделевич; В.М.Ширяев;, Reisedur ТЕР70 (vene keeles). 1976.
- [10] A. Bogajevskiy, S. Arhun, A. Hnatov, V. Dvadenko, N. Kunicina, and A. Patlins, "Selection of Methods for Modernizing the Regulator of the Rotation Frequency of Locomotive Diesels," in Proceeding of 60th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), 2019.
- [11] L. Liudvinavičius and V. Jastremskas, "Modernization of Diesel-electric Locomotive 2M62 and ТЕР-70 Locomotives with Respect to Electrical Subsystem," Procedia Eng., vol. 187, pp. 272–280, 2017, doi: 10.1016/j.proeng.2017.04.375.
- [12] "Электродвигатель постоянного тока тяговой типа ЭД ПАСПОРТ ЭД121АУ.pdf." .
- [13] В.Т. Пархомов, "ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СХЕМА ТЕПЛОВОЗА ТЭП70." 2005.
- [14] A. Rassõlkin and H. Hõimoja, "Calculation of the Traction Effort of Switching Locomotive," in 11th International Symposium "Topical Problems in the Field of Electrical and Power

Engineering” and Doctoral School of Energy and Geotechnology II, 2012, no. 1.

- [15] Всесоюзный научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта, Правила тяговых расчетов для поездной работы. 1985.

LISAD

Possibilities of Changing the Transport Characteristics of the TEP70 Locomotive

Viktor Rjabtšikov, Anton Rassõlkin, Toomas Vaimann,
Ants Kallaste
Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics
Tallinn University of Technology
Tallinn, Estonia
virjab@taltech.ee

Dmitry V. Lukichev
Faculty of Control Systems and Robotics
ITMO University
St. Petersburg, Russia

Abstract— The research concentrates on the modernization issues of diesel-electric passenger locomotives TEP70. There is number of TEP70 locomotives in Baltic region that are used very rarely by their direct application but may as well be usable as freight locomotives. The main goal of the study is to change the tractive force of a TEP70 locomotive to be able to transport cargo in the Baltic region. Analysis of TEP70 working principles and load characteristics are presented. Based on the analytical model of locomotive, suggestion to replace the gearbox to increase locomotive pulling capability is proposed. Moreover, the paper presents calculation of the traction effort of TEP70. That kind of calculations are very important for motion planning and it should be done in order to avoid overloading during the working mode of the locomotive.

Keywords— Railway engineering; rail transportation; gears

I. INTRODUCTION

Today, the total length of railroad track in Estonia is 1320 km [1], with the Russian gauge (1520 mm) being used. According to [2], in 2018 13.5 million tons of goods were transported on the railroad, what is 9% higher than in 2017. At the same year, transit traffic accounted nearly 9.1 million tons, which is more than 20% compared to the previous year, as shown on Fig 1.a. Number of passengers at domestic destinations in 2018 were almost 7.7 million travelers (5% higher than in 2017) and on international destinations 107.1 thousand travelers (increase 2%) respectively, as shown on Fig 1.b. Since 2014, Stadler FLIRT passenger multiple unit trains started operating in domestic destinations Estonia.

The TEP70 (ТЭП70) is a main line single unit diesel-electrical passenger locomotive, with AC/DC transmission and individual axle traction control. The TEP70 is currently in service in East Europe and Russia, but used in Estonia only for international destinations (Estonia-Russia, prospectively Estonia-Ukraine). Taking into account the

growing amount of cargo, it seems reasonable to change the transport characteristics of TEP70 locomotive to be able to increase the tractive force. Moreover, the maximum speed of the diesel-electric locomotive TEP70 is 160 km/h and the speed limit on Estonian railroad is mainly 120 km/h.

The TEP70 diesel-electric locomotive has been used as the basis of another subclass locomotive TEP70BS (ТЕП70БС) [3]. However, large number of components were modified including diesel-generator, ventilation system, even locomotive body, but keeping the same type of traction motors (ЭДV-133). Furthermore, the gear ratio has been kept the same as before (3.12:1), but for later modifications of TEP70BS, the gear ratio of 4.15:1 was used, which increased the locomotive traction force. TEP70U (ТЭП70У) [3] was also a modified type of the locomotive, but based more on TEP70BS, which had a more powerful diesel generator and more technologically advanced locomotive body.

Literature study shows, that there are different ways to improve the performance of TEP70. In [4], the authors suggest to improve the efficiency of diesel generator sets by 4-5% through the introduction of electric speed and power regulators, with the ability to control the start of fuel supply. TEP70 automatic control systems improvement is presented in [5], as authors claim, fuel consumption of the upgraded locomotive decreased by 20% according to the Statistical Department of Lithuanian Railways.

This paper presents modernization issues of TEP70 locomotive. Analysis of TEP70 working principles and load characteristics are presented. Analytical model of the locomotive presents calculations of traction force, based on the parameters of traction system and control modes of TEP70.

II. TEP70 WORKING PRINCIPLES AND LOAD CHARACTERISTICS

Diesel-electric transmission system in general means a transmission system, where the mechanical energy produced by the diesel engine prime mover is converted into electricity by means of a generator and transferred to an electric traction drive [6]. These diesel-electric locomotives TEP70 [7] are equipped with typical bodies with six traction motors of DC serial excitation, type ED-121AU1 (ЭД-121АУ1). The main power source in the diesel-electric locomotive TEP70 is a power train, which includes a diesel engine 2A-5D49 (2A-5Д49) and an AC synchronous traction generator GS-504A (ГС-504А). Synchronous traction generator feeds the six traction motors that produce the traction effort to push the locomotive. Analogue automatic control system of synchronous traction generator is used in TEP70. In [5] the load characteristic of synchronous traction generators is not

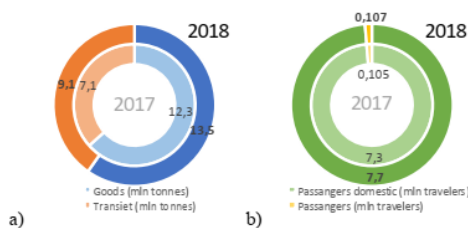


Fig. 1. Usage of Estonian railroad in 2017 and 2018.

The research has been supported by the Estonian Research Council under grant PSG453

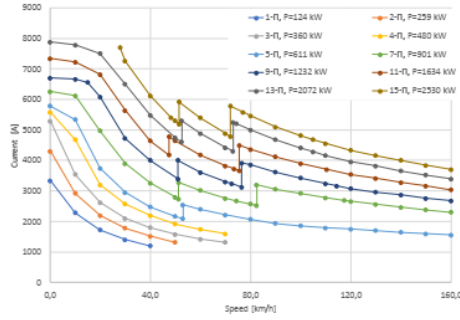


Fig. 2. Traction force characteristics with different controller positions.

of a hyperbolic shape, due to this, significant part of transformed diesel engine power is lost.

Power generated by the synchronous traction generator depends on the position of the controller that can be selected by the locomotive driver or automatically, based on the working mode. Overall, there are 16 positions (0-XV) of the controller. Since the electric transmission provides three steps of the locomotive's speed, each section of the speed has its own section of traction characteristics, which together make up the general traction characteristic of the locomotive. These sections can be seen in Fig. 1. Speed steps are switched by removing a part of the current from the excitation windings of the traction motor through shunt resistances.

III. LOCOMOTIVE MODELLING

The technical data of the studied locomotive is presented in Table I.

TABLE I. TECHNICAL DATA OF TEP70 [7]

Year of manufacture	1973 - 2006
Wheel arrangement	3 ₀ —3 ₀
Diesel engine	2A-5D49 (2A-5D49)
Diesel engine power, kW (hp)	2942 (4000)
Power convertor type	AC/DC
Traction generator	GS-504A (ГС-504А)
Traction generator power, kW	2750
Traction motor	ED-121AU1 (ЭД-121АУ1)
Traction motor power, kW	413
Number of traction motors	6
Velocity limit, km/h	160
Minimum road curve radius, m	125
Size type	1-T
Length, m	21,7
Working mass, tonnes	135±3%
Traction clutch, kN	230

A. Model of Locomotive TEP70

TABLE II. TECHNICAL DATA OF TRACTION MOTOR ЭД121АУ

Voltage, V	512
Current, A	880
Rotational speed, rpm	645
Efficiency, %	91.1
Total winding resistance, Ω	0.0276
Number of pole pairs	2
Number of active wires in the anchor	58
Number of parallel branches of the anchor winding	4

Technical data of the traction motor is presented in Table II. First of all, in order to be able to calculate the characteristic of the motor, one needs to find the electric coefficient of the motor, which can be calculated by (1), where p is the number of pole pairs, N is the number of active wires in the anchor winding and a is the number of parallel branches of the anchor winding:

$$k_E = \frac{p \cdot N}{2 \cdot \pi \cdot a} \quad (1)$$

After which, magnetic flux per pole Φ can be calculated using (2) and (3), where U is the supply voltage, E is the anchor winding induced back electromotive force (EMF), I_a is the anchor winding current, r is the total motor resistance, and n is the rotational speed.

$$U = E + I_a \cdot r \quad (2)$$

$$E = k_E \cdot \phi \cdot n \quad (3)$$

As the magnetic flux is dependent on current, calculating motor constant γ using (4) is necessary:

$$\phi = \gamma \cdot I_a \quad (4)$$

In Fig. 2, the traction motor ЭД121АУ characteristic is presented. After replacing all variables in the (4) with the traction motor values, taken from Table 2, it is possible to receive a characteristic, which describes how the motor angular velocity is dependent on current.

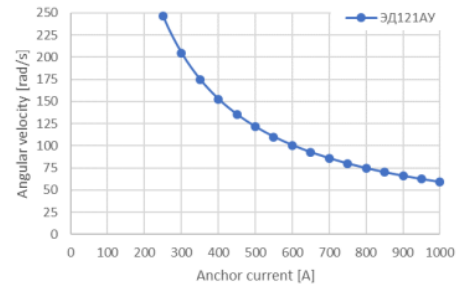


Fig. 3. Angular velocity of the traction motor dependence on current at nominal voltage.

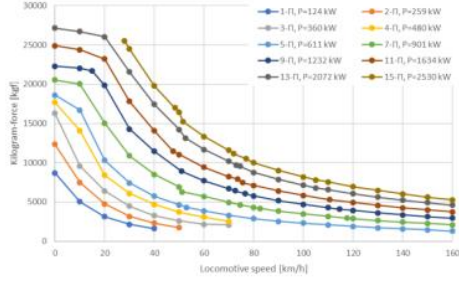


Fig. 4. Traction force of a locomotive TEP70 with the gear ratio of 3.12.

To generate locomotive traction force, the characteristic should take into account the gearbox ratio, which is 3.12, wheel size, which diameter is 1.22 m and the locomotive speed sections, where the electrical transmission switching occurs.

Traction force characteristic can be found by calculating the torque using (5) and (6), where k_m is the mechanical constant.

$$\frac{k_m \cdot \phi}{k_E \cdot \phi} = 9.55 \quad (5)$$

$$M = k_m \cdot \phi \cdot I_a \quad (6)$$

In Fig. 3, the traction force of the locomotive is presented. With the gear ratio of 3.12, start-up traction force is limited to a maximum of around 27 ton-force. With the gear ratio of 3.12, the maximum speed of the locomotive is 160 km/h.

B. Changing the Transport Characteristics of TEP70

One of the ways to change the locomotive traction force is to change the gear ratio. To increase the torque produced by the traction motors, gear ratio must be also increased. On the other hand, the maximum speed of the locomotive will be decreased.

Due to the availability of a gearbox with a ratio of 4.15, Fig. 4 demonstrates the traction force changes related to the speed of the locomotive.

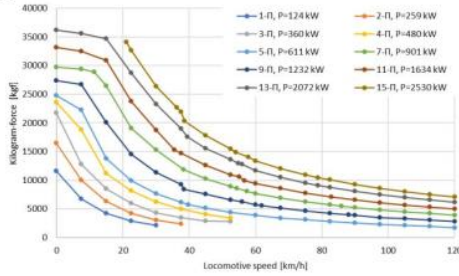


Fig. 5. Traction force of locomotive TEP70 with the gear ratio of 4.15.

With the changed gearbox ratio, the start-up traction force increased from 27 ton-force to 36 ton-force, which makes around 33%. From the point of view of the locomotive, it means that this modification will increase the volume of the transported product.

IV. CALCULATION OF TEP70 TRACTION EFFORT

The traction effort is the train pushing force provided by the traction motors of a locomotive. Calculation of the traction effort is very important for the locomotive motion planning. The motion planning of a modernized locomotive must be done to avoid the overloading during operation. There are two ways to find the traction effort of any locomotive: first is theoretical, where the traction effort is calculated basing on technical data and mechanical properties; second is empirical, based on tests and measurements. This paper presents the theoretical approach, based on [8].

The load on a traction system of the locomotive depends on several parameters – mass of wagons (for this particular case 90 tons), the velocity of the train and the peculiar properties of the railroad, like slope and the curving radius. Moreover, the worst weather conditions should be taken into account. Atmospheric condensations have a negative influence on the friction forces between the train wheels and railroad rails.

In any system there are losses, which need to be considered. In the traction effort calculations, the more influential losses of the system must be taken into account. By combining the traction motor efficiency ($\eta_{mot}=91.1\%$), traction generator efficiency ($\eta_{gen}=94.8\%$) and the efficiency of the mechanical transmission ($\eta_{motr}=98.0\%$) together, total efficiency factor can be calculated using (7).

$$\eta_{tot} = \eta_{mot} \cdot \eta_{gen} \cdot \eta_{mec} \quad (7)$$

Total resistance force can be calculated by (8), where F_{fr} is the static friction force, F_{road} is the stretch resistance force and F_{air} is the aerodynamic force.

$$F_{load} = F_{fr} + F_{road} + F_{air} \quad (8)$$

The static friction force can be calculated by (9), where m_{ved} is the working mass of the locomotive, m_{vag} is the mass of a wagon, n is the number of the wagons, and g is the gravitational acceleration.

$$F_{fr} = 7.5 \cdot 10^{-3} \cdot (m_{ved} + n \cdot m_{vag}) \cdot g \quad (9)$$

The stretch resistance force takes into consideration the curve radius of the road, the friction between the rail and the wheel, and the mass of the wagon, which can be calculated by (10), where i is the road slope.

$$F_{road} = \sigma \cdot (m_{ved} + n \cdot m_{vag}) \cdot \left(\mu_r + \frac{i}{1000} \right) \cdot g \quad (10)$$

The aerodynamic force is dependent on the air velocity, the number of wagons and the area of the front of the locomotive A_{fr} , and it can be calculated by (11), where v is the locomotive velocity.

$$F_{air} = \frac{1}{2} \cdot \rho_{air} \cdot (C_{ved} + n \cdot C_{vag}) \cdot A_{fr} \cdot v^2 \quad (11)$$

For the transmittable traction effort, two various adhesive coefficients must be calculated. The first one is considering dry surface (12) and the second one is meant for the wet surface (13), where v is the locomotive velocity in km/h.

$$\mu_{dry} = \frac{7.5}{v + 44} + 0.161 \quad (12)$$

$$\mu_{wet} = \frac{7.5}{v + 44} + 0.13 \quad (13)$$

To take into consideration different atmospheric conditions, the maximum traction effort must be calculated using (14) and (15).

$$F_{max,dry} = \mu_{dry} \cdot m_{red} \cdot g \quad (14)$$

$$F_{max,wet} = \mu_{wet} \cdot m_{red} \cdot g \quad (15)$$

The wetter is the surface between rail and wheel, the less friction between those surfaces there is. This should be taken into consideration when calculating the maximum traction effort, as the maximal traction effort must be greater than the combination of the resistant force (16).

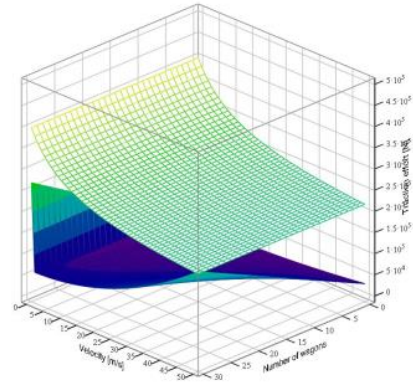
$$F_{max,wet} > F_{load} \quad (16)$$

In Fig. 7, the traction effort in case of different railroad slopes is presented, where the x-axis shows the velocity, y-axis the number of wagons, and z-axis the traction effort. There are three different railroad slopes, which are (a) 0‰, (b) 5‰ and (c) 10‰.

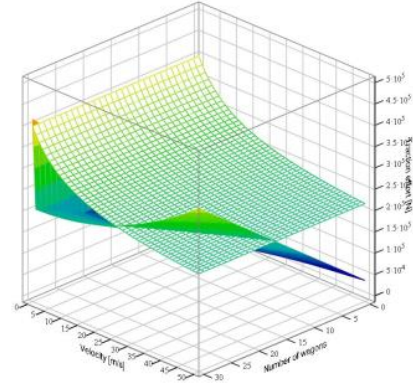
These parameters are most frequently changing during locomotive operation and the comparison between different road slopes gives an overall picture of how the locomotive will operate. In Fig. 7 (a), 0‰ railroad slope can be observed. Traction effort is always below load characteristic between zero and 45 m/s, which is the maximum speed of the locomotive. No overload is caused and the locomotive will operate freely. Fig. 7 (b) illustrates the road slope of 5‰. Locomotive start-up overload occurs around 29 and more wagons. Moreover, overload is also present when the speed exceeds 25m/s at the load of 29 wagons. Taking into account the fact that the overload is present in some operation areas, this will not prevent the driver of the locomotive from operating these locomotives in the area with 5‰ slope. Fig. 7 (c) shows the road-slope of 10‰. Start-up overload begins already at 20 wagons and with maximum speed of around 15 m/s. At the railroad slope of 10‰, the locomotive can operate at the maximum speed with the maximum of 11 wagons.

When examining the different railroad slopes in Fig. 7, it follows, that it is very important to consider the slope of the road when choosing a correct setting for the locomotive operation, since the slope of the road has a very big impact on the start of the locomotive and the maximum speed, which it can gain.

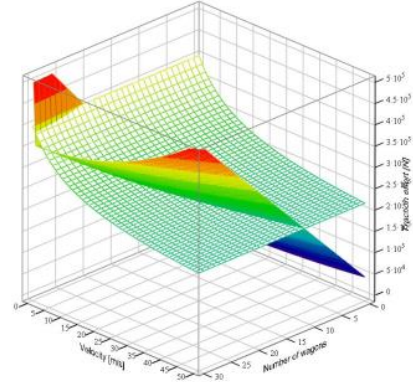
Additionally to the traction effort, power generated from the traction generator has also critical working points. The required power depends on the load of the traction motors F_{load} (8), total efficiency factor η_{tot} , velocity of the locomotive v and the power required to power up auxiliary devices P_{aux} , which is around 9%-11% of the nominal traction generator power. [9]



a)



b)



c)

Fig. 6. Traction effort of locomotive TEP70 with the railroad slope (a) 0‰, (b) 5‰ and (c) 10‰.

$$P_{diesel} = F_{load} \cdot v \cdot \frac{1}{\eta_{tot}} + P_{aux} \quad (17)$$

As in the previous case, atmospheric conditions need to be taken into account, which are (18) for the dry and (19) for the wet conditions.

$$P_{diesel} = F_{load, dry} \cdot v \cdot \frac{1}{\eta_{tot}} + P_{aux} \quad (18)$$

$$P_{diesel} = F_{load, wet} \cdot v \cdot \frac{1}{\eta_{tot}} + P_{aux} \quad (19)$$

In Fig. 8, dependence of velocity and the number of wagons is presented. Fig. 8 shows how the velocity changes occur at different railroad slopes for the calculated traction generator power P_{diesel} (19). Railroad slope has a huge impact on locomotive performance, including the maximum velocity and load.

Fig. 9 contains three graphs describing the power needed for traction motors to overcome the load and the produced power of the traction generator at different railroad slopes. Fig. 9 (a) contains 0‰ of railroad slope. The energy produced by the traction generator that goes to the traction motors is enough for all the sections of the load. No overload is presented. Fig. 9 (b) has a railroad slope of 5‰. At the load of 23 and more wagons, the overload appears. Locomotive cannot operate at its maximum speed. At the maximum load of 30 wagons, the locomotive can operate with a reduced speed of 25 m/s. In Fig. 8 (c), the railroad slope of 10‰ is presented. The traction generator has enough power for the locomotive to operate at a load of 30 wagons, yet with reduced speed of almost 2 m/s.

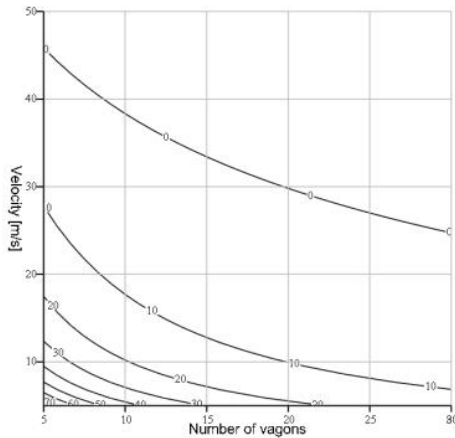
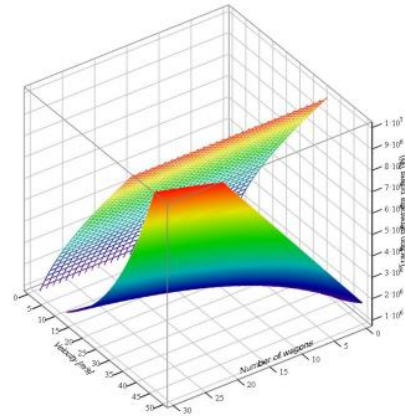
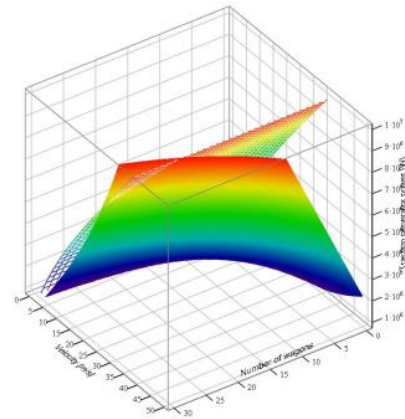


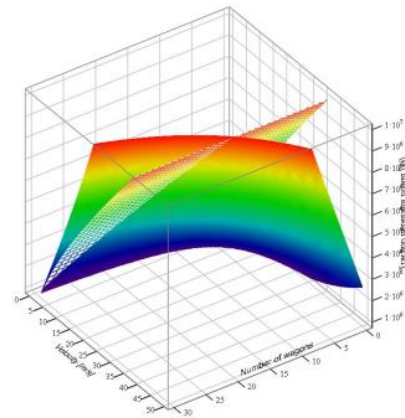
Fig. 7. Velocity and number of wagons dependence from the highest possible railroad slope for defined power of the traction generator.



a)



b)



c)

Fig. 8. Traction generator power of locomotive TEP70 with the railroad slope (a) 0‰, (b) 5‰ and (c) 10‰.

V. DISCUSSION AND CONCLUSION

The diesel-electric passenger locomotive TEP70 was chosen as an example because there are still some of them at Estonian railroad stock and further exploitation of those locomotives needs modernizing of the traction system. TEP70 is widely used in Russia and other countries including Baltic region. Changing the gearbox in TEP70 will increase the locomotive pulling capability, which means transporting a larger cargo with an upgraded locomotive, while reducing the maximum speed.

This paper observes the traction effort calculations based on TEP70 information. Calculation show how various parameters, in particular weather conditions, railroad slope and load have a huge impact on locomotive operation characteristics. These calculations have a significant value on motion planning and will help to understand the nuances of modernization of the locomotive. The motion planning of a switching locomotive should be done to avoid overloading during the working mode of a locomotive. The loads of locomotives are usually extra large, so the after-effects of overloads could be very dangerous.

That paper would be helpful for the future researches concerning to modernization of Estonian railroad.

REFERENCES

- [1] K. Simmermann, "Asia-Baltics rail route development: trends, facts and figures," 2010.
- [2] "Estonian Railways Annual Report 2018," Tallinn, 2018.
- [3] G. G. Osin, *Ustrojstvo i jeksploatacija teplovozov serii TEP70BS (TEP70U) (In Russian: Устройство и эксплуатация тепловозов серии ТЭП70БС (ТЭП70У))*. 2015.
- [4] A. Bogajevskiy, S. Arhau, A. Hnatov, V. Dvadenko, N. Kunicina, and A. Patlins, "Selection of Methods for Modernizing the Regulator of the Rotation Frequency of Locomotive Diesels," in *Proceeding of 60th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*, 2019.
- [5] L. Liudvinavičius and V. Jastremskas, "Modernization of Diesel-electric Locomotive 2M62 and TEP-70 Locomotives with Respect to Electrical Subsystem," *Procedia Eng.*, vol. 187, pp. 272–280, 2017.
- [6] H. Höimoja, T. Jalakas, A. Rosin, and A. Rassõlkin, "Modernisation Issues of Diesel-Electric Shunting Locomotive Power Units," *Sci. J. Riga Technical Univ. Power Electr. Eng.*, vol. 27, pp. 57–62, 2010.
- [7] V. G. Bykov, B. N. Moroshkin, G. E. Serdelevich, J. V. Chlebnikov, and V. M. Shirajev, *Passenger locomotive TEP-70. (In Russian)*. Moscow: Transport, 1976.
- [8] A. Rassõlkin and H. Höimoja, "Calculation of the Traction Effort of Switching Locomotive," in *11th International Symposium "Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering" and Doctoral School of Energy and Geotechnology II*, 2012, no. 1.
- [9] S. I. Zimkov, "Osobennosti konstrukcii magistral'nyh teplovozov, vlijajushhie na bezopasnost' dvizhenija (In Russian: Особенности конструкции магистральных тепловозов, влияющие на безопасность движения)," 2008.