



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

ÕHULIINIJUHTMETE PROJEKTEERIMISE- JA PAIGALDAMISE MEETODID 35 – 110 KV VÕRGUS

OVERHEAD LINE CONDUCTOR DESIGN AND INSTALLATION METHODS IN 35 –
110 KV NETWORK

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Kaspar Roon

Üliõpilaskood: AAVM153623

Juhendaja: Jako Kilter

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.

“20” mai 2020

Autor: Kaspar Roon

/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

“20” mai 2020

Juhendaja: Jako Kilter

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”201... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

<i>Autor:</i> Kaspar Roon	<i>Lõputöö liik:</i> Magistritöö
<i>Töö pealkiri:</i> Õhuliinijuhtmete projekteerimise- ja paigaldamise meetodid 35 – 110 kV võrgus	
<i>Kuupäev:</i> 20.05.2020	73 lk
<i>Ülikool:</i> Tallinna Tehnikaülikool	
<i>Teaduskond:</i> Inseneriteaduskond	
<i>Instituut:</i> Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut	
<i>Töö juhendaja(d):</i> dotsent Jako Kilter	
<i>Töö konsultant (konsultandid):</i>	
<i>Sisu kirjeldus:</i> <p>Käesoleva töö eesmärk oli uurida õhuliinijuhtmete projekteerimise- ja paigaldamise meetodeid kõrgepingeliinidel. Eesmärgi saavutamiseks jaotati töö neljaks põhiosaks, kus võeti vaatluse alla õhuliini kontseptsioon, juhtmete projekteerimine, paigaldusmeetodid ja modelleeriti 35 (110) kV õhuliin metoodika rakendamiseks.</p> <p>Töö põhiosas anti ülevaade arvutusmetoodikast juhtme oleku lahendamiseks ja teostati analüüs erinevate paigaldusmeetodite kasutamiseks. Modelleeritud õhuliinil teostati kontrollarvutused juhtme sobivuse hindamiseks ja selgitati välja vajaminevate vahendite valikukriteeriume ning anti ülevaade erinevate viseerimismeetodite kasutamisest juhtme paigaldamisel.</p> <p>Käesoleva töö praktiline pool keskendus peamiselt 35 (110) kV juhtmevahetuse projektidele, kuid töö raames välja toodud meetodeid on võimalik rakendada õhuliinidel olenemata selle nimipingest, kus suurema pingeklassiga liinide puhul peab arvestama selle konstruktsiooni eripärast tulenevate aspektidega.</p> <p>Teostatud töö tulemusena on soovituslik paigaldada õhuliini juhtmeid pingutusmeetodi kasutamisega ning juhtmete viseerimist teostada rippemeetodil. Töös selgus, et õigete töövõtete kasutamisega väheneb risk õhuliini vigastamisele ning suudetakse tagada projektijärgne paigaldus.</p>	
<i>Märksõnad:</i> kõrgepingeliin, juhtme ripe, juhtme montaažitabel, õhuliinijuhtme paigaldus, õhuliinijuhtme viseerimine.	

ABSTRACT

<i>Author:</i> Kaspar Roon	<i>Type of the work:</i> Master Thesis
<i>Title:</i> Overhead line conductor design and installation methods in 35 – 110 kV network	
<i>Date:</i> 20.05.2020	<i>73 pages</i>
<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> Associate Professor Jako Kilter	
<i>Consultant(s):</i>	
<i>Abstract:</i> <p>The aim of this thesis was to analyse design- and installation methods of overhead power lines. In order to achieve this aim the thesis was divided into four main parts, where an overview was given about the concept of overhead lines, the design of overhead conductors and installation methods. These methods were implemented on a modeled 35 (110) kV power line.</p> <p>In the main part of the thesis, calculation methods for solving the conductor state change were given. Analysis was performed for the use of different installation methods. On the modeled overhead line, control calculations for conductor were performed to confirm its suitability. Also, selection criteria for the required equipment was determined with an overview of the final sagging methods.</p> <p>The practical side of this thesis focused mainly on conductor change projects for 35 (110) kV lines, but the methods presented can be applied to overhead lines regardless of their nominal voltage, where for large lines specific aspects in their construction must be taken into account.</p> <p>As a result, tension method is the most recommended installation method for stringing overhead power lines and transit method is the most accurate way to sag conductors. The work revealed, that using these methods for overhead line installation the risk to damage the line is greatly reduced.</p>	
<i>Keywords:</i> high-voltage line, conductor sag, conductor installation table, conductor installation, conductor sagging.	

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema:	Õhuliinijuhtmete projekteerimise- ja paigaldamise meetodid 35 – 110 kV võrgus
Lõputöö teema inglise keeles:	Overhead line conductor design and installation methods in 35 – 110 kV network
Üliõpilane:	Kaspar Roon AAVM153623
Eriala:	Elektroenergeetika
Lõputöö liik:	magistritöö
Lõputöö juhendaja:	Jako Kilter
Lõputöö ülesande kehtivusaeg:	31.12.2020
Lõputöö esitamise tähtaeg:	25.05.2020

Kaspar Roon
Üliõpilane (allkiri)

Jako Kilter
Juhendaja (allkiri)

Jako Kilter
Õppekava juht (allkiri)

1. Teema põhjendus

Kõrgepingeliini ehituse üks tähtsamaid etappe on juhtme paigaldus. Korrektne projekteerimis- ja ehitusmetoodika tagab lõpptulemuseks nõutud gabariidid maapinna ja ristuvate rajatistega. Ehitusprotsessis algab juhtmete paigaldus etapis, kus on kõrgepingeliini mastid paigaldatud. Korrektne kerimismetoodika tagab selle, et kogu eelnev töömaal tehtu ei saaks hävitatud, kuna nõudeid eirates tekivad ohud õhuliinimastide või juhtme purustamiseks. Teema on aktuaalne, kuna õhuliinide ehitamise ja rekonstrueerimise investeeringud on Eesti põhi- ja jaotusvõrgus suurenemas.

2. Töö eesmärk

Töö eesmärgiks on uurida Eestis projekteeritavate kõrgepingeliinide juhtmete projekteerimis- ning paigaldusmetoodikaid.

3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

- Missuguseid meetodeid kasutatakse juhtmete arvutamiseks?
- Kuidas arvutatakse juhtme montaažitabelid?
- Millised on juhtmete paigaldusmeetodid?
- Missugused erinõuded on ette nähtud juhtme paigalduseks?

- Milliste mehhanismidega paigaldatakse õhuliini juhtmeid?
- Kuidas toimub juhtmete viseerimine töömaal?
- Missugused töö- ja projekteerimisetapid tagavad korrektse paigalduse?

4. Lähteandmed

- Eestis kehtivad standardid õhuliinijuhtmete projekteerimiseks.
- 701 projekteerimine Elering AS erinõuded
- Teadusartiklid juhtmete projekteerimisest ja paigaldamisest (IEEE Xplore ja ScienceDirect andmebaasid)
- A.Zelitsenko B.Smirnov „Õhuliinide ehitus eksploatatsioon ja remont“
- Southwire 3rd edition „Overhead conductor manual“
- F.Kiessling P.Nefzger „Overhead power lines“
- IEEE Std 524-2016 „Guide for the Installation of Overhead Transmission Line Conductors“

5. Uurimismeetodid

Töö esmane uurimismeetod keskendub õhuliini juhtmete projekteerimisele ja arvutusmeetodite lahendamisele. Uuritakse, missugused etapid tuleb läbida, et projekteerida juhtme paigaldustabel, mille järgi hakkab töövõtja neid monteerima. Uuritakse, missuguseid paigaldusmeetodeid kasutatakse juhtme kerimistödeks ning mille järgi valitakse tööks vajalikud vahendid. Modelleeritakse õhuliini meetodite ja arvutusmetoodikate rakendamiseks.

6. Graafiline osa

Juhtmete arvutamisel tuuakse lähteandmed ja arvutuskäigud välja tabelitena. Modelleeritud õhuliin visualiseeritakse jooniste ja pikiprofiilide kasutamisega. Kasutatavad seadmed õhuliinide paigaldamiseks näidatakse piltidena.

7. Töö struktuur

Sisukord

Sissejuhatus

Teema päevakohasus ja taust, ülesanne ning oodatavad tulemused

Põhiosa

1. Ülevaade kõrgepingeliinide konstruktsioonist
2. Juhtmete arvutusmetoodika
3. Juhtmete paigaldusmetoodika
4. Modelleeritud õhuliin

Kokkuvõte

Kasutatud kirjandus

8. Kasutatud kirjanduse allikad

Allikatena kasutatakse õhuliinijuhtmete manuaale, õpikuid ja standardeid. Juhtme paigaldusmeetodite uurimisel kasutatakse tootjatehaste katalooge ja eeskirju.

9. Lõputöö konsultandid

10. Töö etapid ja ajakava

Kirjanduse läbi töötamine, ülevaate vormistamine ja lähteandmete ettevalmistamine – 31.03.2019

Lõputöö põhiosa valmis – 24.04.2019

Lõputöö juhendajale esimeseks lugemiseks – 04.05.2019

Lõputöö juhendajale teiseks lugemiseks – 11.05.2019

Lõputöö valmis – 15.05.2019

SISUKORD

EESSÕNA.....	10
SISSEJUHATUS	11
1. ÕHULIINIDE KONSTRUKTSIOON	14
1.1 Õhuliini mastid	14
1.2 Isolaatorid	15
1.3 Liinitarvikud.....	17
1.4 Õhuliinijuhe.....	19
2. ÕHULIINIJUHTMETE PROJEKTEERIMINE	22
2.1 Juhtme rippe kontseptsioon	23
2.1.1 Juhtme venivus.....	25
2.1.2 Ripped erineva kõrgusega kinnituspunktides	27
2.1.3 Taandatud visangu kontseptsioon	28
2.2 Juhtme olekuvõrrand	29
2.3 Juhtme paigaldustabel	31
3. ÕHULIINIJUHTMETE PAIGALDUS.....	35
3.1 Kerimismeetodid.....	37
3.2 Paigaldamise mehhanismid	39
3.2.1 Vints ja leevendi	39
3.2.2 Piloottross	39
3.2.3 Juhtmerullikud.....	40
3.3 Maksimaalse tõmbejõu arvutus.....	42
3.4 Rullikute paigalduskoormused.....	44
4. MODELLEERITUD 35 (110) KV ÕHULIINI JUHTMEVAHETUSE ANALÜÜS	47
4.1 Lähteandmed	47

4.2 Juhtmearvutus	49
4.3 Kontrollarvutused ja seadmete valik	53
4.3.1 Maksimaalne tõmbejõud	54
4.3.2 Mehhanismide valik ja paigutus.....	55
4.3.3 Juhtmerullikute valik ja arvutus	59
4.3.4 Piloottrossi valik ja arvutus	60
4.4 Paigaldusprotsess.....	61
4.4.1 Juhtmete viseerimine.....	62
KOKKUVÕTE	65
SUMMARY	67
KASUTATUD KIRJANDUS	69
LISAD	71

EESSÕNA

Lõputöö teema õhuliinijuhtmete projekteerimis- ja paigaldusmeetodite uurimiseks valisin huvist valdkonna vastu ning eelnevast töökogemusest kõrgepingeliinide ehitajana ettevõttes Connecto Eesti AS.

Täna Connecto Eesti AS-i juhtkonda ja kolleege toetuse eest lõputöö koostamisel ning oma perekonda ja lähedasi kooliteel osutatud abi eest.

Kaspar Roon

kaspar.roon@gmail.com

+372 5373 4192

SISSEJUHATUS

Elektrienergiat võib lugeda kõige mugavamaks ja kvaliteetsemaks energiavormiks tänapäeva ühiskonnas, mille areng on tugevalt seotud suureneva nõudlusega elektrienergia järele [1]. Suurendades elektrienergia tootmist kasvab paratamatult selle edastamiseks vajaminev läbilaskevõimsus kõrgepingeliinides, mis toob endaga kaasa suuri investeeringuid elektrivõrkudesse. Investeeringute suurenemist kinnitab samuti Eesti elektrisüsteemihaldur Elering, kelle planeeritud investeeringud alajaamade ja õhuliinide suhtes ajaperioodil 2019 – 2023 moodustavad vastavalt 19,3% ja 80,7%. Investeeringute eesmärkideks on [1]:

- varustuskindluse toetamine
- elektrituru arengu toetamine (välisühendused)
- läbilaskevõime tagamine uute liitumiste ja koormuste kasvu võimaldamiseks
- võrgu vananemise peatamine
- töökindluse parandamine
- kadude vähendamine
- uute klientide liitumised (tarbijad, tootjad)

Nimetatud eesmärgid on väga suure tähtsusega Eesti energiamaastikul, kus investeeringute osakaale arvestades, moodustavad peamise osa eesmärkide elluviimisest õhuliinide ehitamine ja rekonstrueerimine.

Lisaks põhivõrgule on viimastel aastatel suurendanud investeeringuid kõrgepingeliinidesse võrguettevõtte Elektrilevi OÜ, kelle haldusalasse jäävad teatavasti nimipingel 0,4 – 35 (110) kV talitlevad liinid. Elektrivõrkudes esinev nimipinge 35 kV on tänapäevases võrgus iganev nimipinge. Nimetatud pingel talitlevate liinide renoveerimine ja arendamine on ebamõistlikult kulukas, mistõttu on ettevõtte viimaste investeeringuprojektide arengusuund nende viimine pingestmele 20 või 110 kV [2]. Esimene 110 kV liin Eesti jaotusvõrgus võeti kasutusele 2017. aastal, kus rekonstrueeriti olemasolev Kehra – Kose 35 kV õhuliin. Selle projekti raames paigaldati 10 uut masti, vahetati välja õhuliini isolatsioon, armatuur ja paigaldati suurema läbilaskevõimsusega õhuliinijuhe [3]. Lisaks Kehra – Kose õhuliinile on lähiaastatel teostatud ja planeerimisel mitmeid sarnaseid ehitusprojekte, millest aktuaalsemad neist:

- 2018. aastal rekonstrueeriti Elektrilevi OÜ tellimusel Hiiumaal Käina – Kärkla vaheline 35kV õhuliin. Trassi pikkus oli kokku 21,75 km ning paigaldatav faasijuhe AS-150/24. Õhuliin rekonstrueeriti võimalusega see viia 110kV pingestmele.

- 2019. aastal rekonstrueeriti Elektrilevi OÜ tellimusel Kohila -Järlepa 10kV õhuliin. Trassi pikkus oli kokku 12,5km ning paigaldatav faasijuht AS150/24. Õhuliin rekonstrueeriti olemasolevatel 35kV gabariidis raudbetoonmastidel ning võimalusega liin viia üle 20kV pingestmele.
- 2020. aastal rekonstrueeritakse Sikassaare – Nasva 35kV õhuliin. Trassi pikkus I etapis on 10km ning paigaldatav faasijuht AS-240/32. Õhuliin rekonstrueeritakse osaliselt olemasolevatel raudbetoonmastidel ning võimalusega see üle viia 110kV pingestmele.
- Lähitulevikus on Elektrilevi OÜ-l kavas rekonstrueerida Leisi – Läätsa 35 kV õhuliin, pikkusega ligikaudu 80km ning õhuliin rekonstrueeritakse võimalusega see üle viia 110 kV pingestmele.

Kirjeldatud investeeringud on üheks peamiseks ajendiks käesoleva töö autori teemavalikul, kuna tegemist on suuremahuliste töödega kõrgepingeliinides. Eelnevalt nimetatud projektid on väga spetsiifilise ülesehitusega, kus liinitrass, õhuliini mastid ja nende asetsemine looduses jäetakse võimalikult sarnaseks olemasoleva olukorraga. Sellest lähtuvalt on autor seisukohal, et nimetatud investeeringute elluviimise võtmeülesandeks on õhuliinijuhtmete projekteerimine ja nende paigaldus.

Käesolev lõputöö on koostatud õhuliinijuhtmete projekteerimise- ja paigaldamismeetodite uurimiseks. Töös käsitletud põhimõtteid on võimalik rakendada kõikidele õhuliinidele, kuid autor on valinud peamiseks uurimissuunaks 35 – 110 kV õhuliinid jaotusvõrgus esinevate investeeringute aktuaalsuse tõttu. Töö eesmärgiks on anda ülevaade õhuliinijuhtmete projekteerimisest, nende paigaldusest ja rakendada teoreetilist osa rekonstrueeritava projekti näitel.

Esimeses peatükis on antud ülevaade õhuliini konstruktsioonist. Uuriti, milliseid materjale õhuliinide projekteerimisel ja ehitamisel kasutatakse ning missugused on kasutatavate materjalide karakteristikud ja parameetrid.

Töö teises peatükis on uuritud õhuliinijuhtmete projekteerimist, lähemalt milliseid arvutusmeetodikaid on kasutatatud juhtmete oleku lahendamiseks. Töö tulemusena antakse arusaam õhuliini juhtmete käitumisest erinevatel koormustel, ripetel ja visangu pikkustel, mis kõik on vajalikud juhtmete paigaldustabelite koostamiseks.

Kolmandas peatükis on kirjeldatud juhtmete paigaldamise meetodid. Uuritud, missuguseid mehhanisme ja abivahendeid kasutatakse ning millistele kriteeriumitele need peavad vastama.

Lisaks on kirjeldatud, missugust arvutusmetoodikat kasutatakse vajaminevate abivahendite ja mehhanismide õigeks selekteerimiseks.

Lõputöö neljandas peatükis on rakendatud eelnevalt uuritud metoodikat autori poolt modelleeritud õhuliini projektil, milleks on 35 (110) kV õhuliin, kus lähteülesandeks on õhuliinijuhtme projekteerimine ja vahetus 110 kV nimipingele. Peatükis on kirjeldatud õhuliini ehituseks sobivate mehhanismide valikukriteeriume, nende paigutust õhuliini kerimisprotsessis ning vaadeldud erinevate viseerimisvõimaluste kasutamist juhtme lõplikuks paigaldamiseks.

1. ÕHULIINIDE KONSTRUKTSIOON

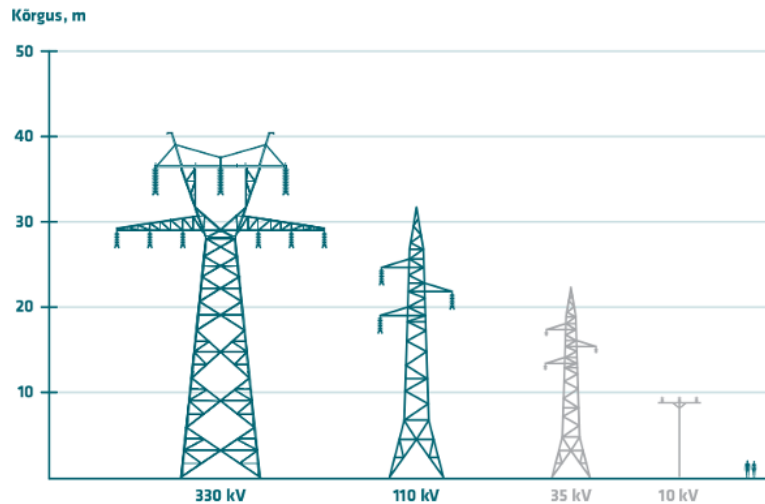
Elektrijaamades genereeritava elektrienergia ülekandmiseks ja jaotamiseks kasutatakse õhu- ning kaabelliine, mis erinevad teineteisest ehituse, maksumuse, tehniliste parameetrite ja muude näitajate poolest. Põhivõrgu ülekandeliinideks on peamiselt õhuliinid ja seda valdavalt liini ehitusmaksumuse tõttu. Tavaliselt koosneb õhuliin faasijuhtmetest, piksekaitsetrossist, optilisest piksekaitsetrossist, mastidest, isolaatoritest ja liiniarmatuurist [1].

1.1 Õhuliini mastid

Maste kasutatakse õhuliinijuhtmete ülevalhoidmiseks ja nende pingutamiseks. Peamised mastitüübid on [1]:

- 1) Kandemastid
- 2) Nurga-kandemastid
- 3) Ankrumastid
- 4) Nurgamastid
- 5) Üleviigumastid
- 6) Harumastid
- 7) Transpositsioonimastid

Kandemastid moodustavad õhuliinist keskmiselt 80 – 90% mastide koguarvust ja nende ülesanne on õhuliinijuhtmeid üleval hoida. Normaolukorras ei osutu kandemastidele pikisuunalisi jõude, seega on nad reeglina üsna kerged ja lihtsa konstruktsiooniga [1]. Nurga-kandemaste kasutatakse olukordades, kus liin muudab oma suunda. Erinevus tavapärase kandemastiga seisneb selles, et nurga-kandemastides asetsevad isolaatorketid nurga all. Maksimalne nurk, kus selliseid maste kasutatakse on kuni 20 kraadi [4]. Suuremate pikisuunaliste jõudude vastuvõtmiseks kasutatakse ankrumaste, kus juhtmed on kinnitatud isolaator-pingutuskettide abil. Ankrumastid on ette nähtud avariolukordadeks, kus nad on projekteeritud juhtmete ühepoolsele koormusele vastupidamiseks. Tavapärane praktika on selline, et ankrumaste kasutatakse kohtades, kus liin muudab nurka (nurgamastid). Sellise praktika heaks omaduseks on kergem liinijuhtmete paigaldus ning kõrvaldab riskid suurtele rikkeolukordadele. Üleviigumaste kasutatakse olukordades, kus liin ületab rajatisi või takistusi. Harumastid nähakse ette liin hargnemispunktidest ning transpositsioonimastid kohtadesse, kus on vaja muuta faasijuhtmete omavahelist asetsust [1]. Õhuliinimastide kõrgused olenevad kasutatavast pingeklassist (joonis 1.1). Mida suurem pingeklass, seda kõrgemal peavad asuma juhtme kinnituspunktid.



Joonis 1.1 Võrgu pingestatele vastavad õhuliinimastide kõrgused [5]

1.2 Isolaatorid

Isolaatoreid kasutatakse kõrgepingeliinide pingestatud juhtide kandmiseks ja toetamiseks, et tagada piisav vahekaugus maandatud ning teiste pingestatud osade vahel. Kõigil isolaatoritel on igal ajahetkel kaks peamist funktsiooni – elektriline isolatsioon ja mehhaaniline tugevus. Isolatsioonimaterjaliks võivad olla klaas, portselan või polümeer (komposiitisolaator) [4]. Eesti ülekandeliinidel kasutatakse peamiselt klaasisolaatoreid, väiksemas mahus on paigaldatud ka komposiitisolaatoreid. Alljärgnevalt tuuakse välja erinevate isolaatorite eelised ja puudused [4]:

Klaasisolaatori eelised:

- suur mehhaaniline tugevus, kus üksiku taldriku purunemisel väike mõju töökindlusele,
- lihtne ja enim eelistatud konstruktsioon isolaatorketi paigaldusele,
- pikk eluiga Eesti tingimustes (peamine kahjustaja saaste ja erosioon),
- odav hind.

Klaasisolaatori puudused:

- isolaatorketi suur kaal, raskem monteerida ja suurem koormus mastidele,
- hüdrofiilne isolaatori pind,
- teatud armatuuri puhul vastuvõtlikum korrosioonile.

Komposiitisolaatori eelised:

- kerge kaal,
- hüdrofoobne isolaatori pealispind,

- lihtsasti kasutatavad eriprojektides (kerge muuta lekkerada, isolaatori pikkust ja mehaanilist tugevust).

Komposiitisolaatori puudused:

- kallim hind,
- lühem eluiga,
- kahjustunud isolaatorit on raske tuvastada,
- esineb palju rikkeid, kuna isolaatori dimensioonid on väiksemad on nad vastuvõtlikumad lindude väljaheidete poolt põhjustatud ülelöökidele.

Õhuliinidel alates 35 kV kasutatakse enamjaolt taldrikisolaatoritest koosnevaid isolaatorkette. Taldrikute arv sõltub liini nimipingest, masti tüübist ja materjalist. Üldjoontes on vastavate nimipingetega õhuliinidel teatud arv taldrikuid: 35kV – 3...4 taldrikut, 110kV – 7...8 taldrikut, 330kV 14...20 taldrikut [1]. Kasutatavate klaasisolaatorite tüübid on toodud tabelis 1.1.

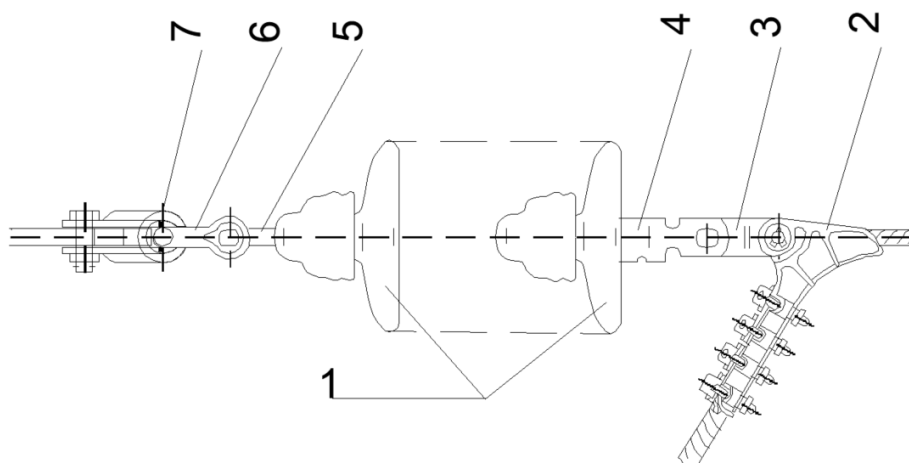
Tabel 1.1 Kasutatavate klaasisolaatorite karakteristikud [6]

Tüüp	Mehaaniline katkemiskoormus, kN	Kaal, kg
U40B	40	1,70
U70BS	70	3,60
U70BL	70	3,60
U70BL	70	4,30
U70C	70	3,80
U80B	80	3,80
U100BS	100	3,90
U100BL	100	3,90
U120B (H-127)	120	3,90
U120B (H-146)	120	3,90
U120B	120	4,60
U125B	120	4,10
U160BS	160	6,13
U160BL	160	6,13
U190B (H-170)	190	7,90
U190B (H-190)	190	7,90
U210B (H-170)	210	7,20
U240B (H170)	240	7,90
U240B (H192)	240	7,90
U300B (390mm)	300	10,00
U300B (485mm)	300	11,50
U400B	400	16,20
U530B	530	20,50

Liinide ehituse ja hoolduse seisukohast saab siinkohal vaadelda isolaatorketi kaalude erinevust komposiitisolaatori ning klaasisolaatori vahel. Õhuliinil nimipingega 110kV on valdavalt kasutuses U120B isolaatori tüüp, mis kaalub 3,9 kg. Kui ühes ketis kasutada 8 taldrikut, saame kogu keti kaaluks 31,2 kg. 330kV liini puhul, kus valdavalt kasutatakse kandekettides U160BS tüüpi isolaatoreid, tuleks keti kaaluks 116,47kg. Vastav komposiitisolaator kaaluks 110kV võrgus 4-6 kg ning 330kV puhul 8-10kg [6].

1.3 Liinitarvikud

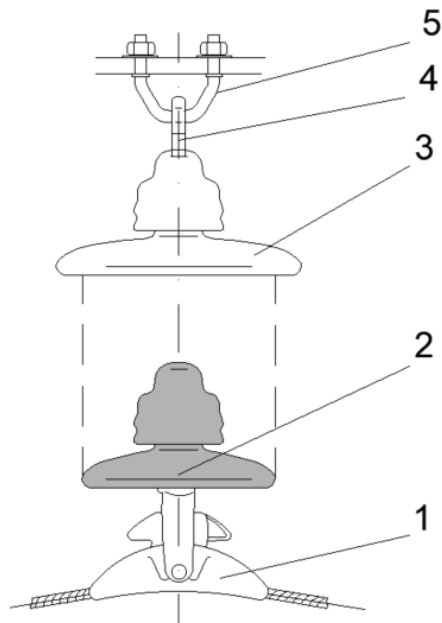
Liiniarmatuuri hulka kuuluvad klemmid, vardad, konksud, sangad ja muu materjal, mis on vajalik juhtmete kinnitamiseks, isolaatorketi komplekteerimiseks ning mastile kinnitamiseks. Liinitarvikute eesmärk on mehaaniliselt siduda õhuliin mastiga ning kaitsta juhet ning isolaatoreid. Õhuliini klemmid jagunevad oma ülesandelt pingutus- ja kandeklemmideks, seostamisklemmideks, ühendusteks, lõhisjuhtmete vahepulkadeks, vibratsioonisummutiteks, kaitserõngasteks ja sarvedeks. Pingutusklamme kasutatakse juhtmete ja trosside kinnitamiseks ankrumastide külge ning need jagunevad omakorda veel kiil, polt ja kokkusurutavateks klemmideks (joonis 1.2) [1].



Joonis 1.2 Õhuliinijuhtme AS240/32 pingutuskett – 1) klaasisolaatorid, 2) poltklemm, 3) vahelüli, 4) pesaplaat, 5) pöörpistikuga silmus, 6) seekel, 7) seekel

Joonisel 1.2. on kujutatud pingutusketi joonis juhtmele AS240/32, kus tähistatud seekel number 7 kinnitatakse ankrumasti traaversi külge ning poltklemm nr. 2 juhtmele. Poltklemm paigaldatakse konkreetse ankrumisangu pinget hoidvale kaugusele ning klemm pöörab juhtme maapinna suunas, millest moodustub juhtme look traaversist möödaviiguks.

Kandeklemme kasutatakse juhtmete kinnitamiseks kandemastidel (joonis 1.3.)



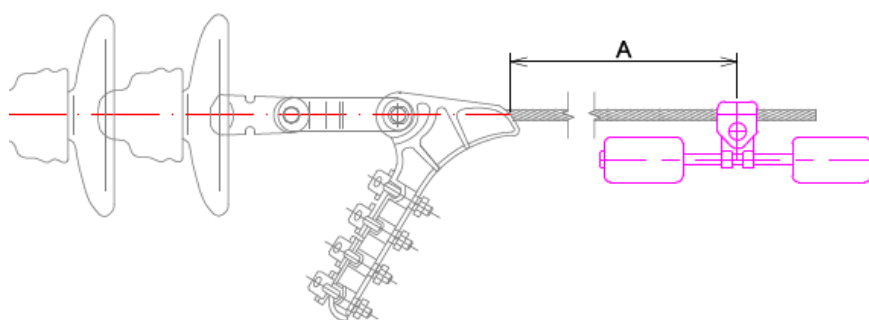
Joonis 1.3 Õhuliinijuhtme AS240/32 kandekett – 1) kandeklemm, 2) klaasisolaatorid, 3) laiema profiiliga klaasisolaator, 4) pöördpistikuga silmus, 5) U-polt

Joonisel on kujutatud juhtmele AS240/32 mõeldud kandeketti, kus U-polt kinnitatakse kandemasti traaversile ning kandeklemm on ette nähtud juhtme üleval hoidmiseks. Kandeklemmis on juhe jäigalt fikseeritud, mis tähendab, et selle paigalduseks peab olema juhe eelnevalt viseeritud. Lõhisjuhtmeid, mis koosnevad kahest, kolmest, neljast või koguni rohkematest juhtmetest on kasutuses reeglina 110 kV ja kõrgemates pingesüsteemides [1].

Juhtmete omavahelise kauguse tagamiseks kasutatakse vahelatte, mis fikseerivad juhtmed nii, et need ei lähe omavahel sõlme ning kaitseb juhete üksteisega kokkupõrgete eest. Vahepulkade arv ja distants sõltub visangute pikkusest ja vibratsiooni nõuetest. Eesti elektrisüsteemis on kasutusel kahele juhtmele mõeldud vahelatted, mis kolme juhtme puhul asetatakse kõrvuti, ühendades ükshaaval kõiki kolme juhete [1].

Lisaks juhtmete horisontaalsele liigutamisele mõjutab tuul juhete ka vertikaaltasandis, mis toob kaasa juhtmetes võnked, millel on väike ulatus, kuid suur sagedus. Tuule kiirus, mille juures juhtme vibratsioon on võimalik, sõltub juhtme riputuskõrgusest. Masti kõrguse suurenemisega vibratsiooni tekkimise võimalus kasvab. Vibratsiooni esinemine sõltub veel liini visangu pikkusest, juhtme läbimõõdust ja riputuskõrgusest [4]. Kõige suurem mõju juhtme vibratsioonil on kande- ning pingutusklommides, kus vibratsiooni mõjul tekivad painutused klommide otstes. Painutuste arv saavutab liini eksploatatsiooni kestel väga suuri väärtusi ja põhjustab juhtme väsimust, kus äärmisel juhul võivad tekkida juhtmekiudude purunemised, mis omakorda võib kaasa tuua kogu juhtme

katkemise isegi normaalsel tõmbel. Kõige esimesena purunevad vibreerimise tagajärjel juhtme väliskihi traadid, sest need painduvad kõige enam. Pärast esimeste kiudude katkemist algab purunemine juba kiiremas tempos, kuna alles jäänud kiududele suureneb tõmbepinge juhtme ristlõike vähenemise tõttu. Juhtme kaitsmiseks vibratsiooni eest on mitmeid võimalusi. Passiivne viis oleks kaitsta juhet kohas, kus see kõige enam paindub – kandeklemmides. Selle jaoks on loodud spetsiaalsed sidemed, vardad (armeeering), mis tugevdab juhet. Aktiivsemaks viisiks on kasutada vibratsioonisummuteid, mis neelavad juhtme vibratsiooni energia terastrossist traatidevahelise vihiga, mis veel omakorda võnguvad [7]. Vibratsioonisummutid monteeritakse teatavale kaugusele mõlemale poole riputuspunkti (joonis 1.4.).



Joonis 1.4. Vibratsioonisummuti asetsemine pingutusketil

Joonisel 1.4. kujutatud vibratsioonisummuti intalleeritav kaugus A sõltub juhtme margist ja visangu pikkusest.

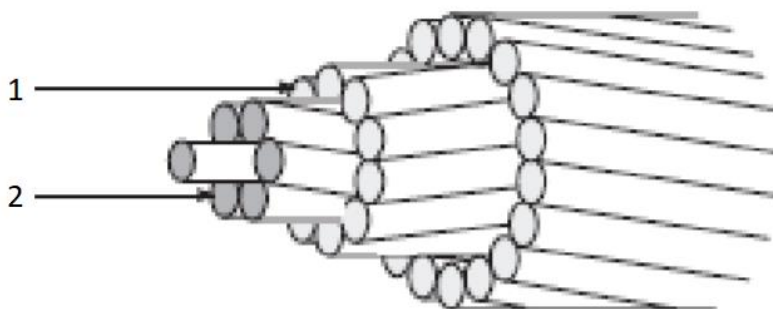
1.4 Õhuliinijuhe

Õhuliinijuhtmed kannavad endas kõrgepingeliinides peamist funktsiooni, mida illustreerib ka õhuliini maksumus, kus juhtmete paigaldus ja materjalikulu on ca 30 – 50% kogu projekti maksumusest. Eestis määrab ülekandeliinide juhtmemargid põhivõrgu haldaja Elering AS, kelle dokumendiseerias 701 Projekteerimine on välja toodud standartsete juhtmete konfiguratsioon (tabel 1.2):

Tabel 1.2 Ülekandeliini standartsete juhtmete valiku konfiguratsioon [8]

Un, kV	Juhtmeid faasis, tk	Juhtme mark
330	3x	ACSR402
110	1x	402-AL1/52-ST1A
110	2x; 1x	242-AL1/39-ST1A
110	1x	152-AL1/25-ST1A

Terasalumiiniumjuhe (ACSR) on enimkasutatav juhtmetüüp ülekandeliinidel, kus juhtme mehaanilise tugevuse tagamiseks on selle keskosa tsingitud terasest. Terasest ümber on traatide materjaliks alumiinium. Juhe koosneb kokkukeerutatud traatidest, kus iga kiht on keerutatud vastassuunas sellest järgneva kihi suhtes, mis tagab juhtme tugevuse ja fikseerib traatide asendi (joonis 1.5) [9].



Joonis 1.5 Terasalumiiniumjuhe – 1) alumiiniumtraadid, 2 kihti, 30 traati, 2) tsingitud terastraadid, 7 traati. [9]

Terastraadi kasutamine õhuliinijuhtme valmistamisel annab sellele kõrge tugevuse ja kaalu suhte ja suurendab tervikjuhtme mehaanilisi tugevusi. Selle tõttu on juhtme ripe oma enda raskusest väikesem ja on võimalik projekteerida pikemaid visanguid. Pikemate visangute projekteerimisel peab arvestama järgnevate teguritega [9]:

- Õhuliinimastide koormused suurenevad – vaja on tugevamaid maste ja vundamente.
- Kandemastide, vundamentide ja materjali hulk väheneb – väiksem liinimaksumus.
- Mastipüstistuste arv väheneb – väiksem liinimaksumus.
- Hoolduskulud vähenevad, kuna mastide arv väheneb.
- Väiksem mastide hulk vähendab tõenäosust rikete tekkimiseks kandemastidel.

Õhuliini juhtmevaliku tegemisel tuleb lisaks arvestada nii tehnilisi kui majanduslikke kriteeriumeid [10]:

- Juhtme läbilaskevõime peab olema vastavuses elektrisüsteemi nõuetega.
- Juhtme ristlõike suurenemisel kasvab juhtme maksumus.
- Juhtme ristlõike suurenemisel suurenevad koormused mastidele ja juhtmetele.
- Juhtmevalik võiks olla teostatud standartsete suuruste järgi, et tagada liiniarmatuuri lihtne kättesaadavus.

- Juhtme diameetri valikul peab arvestama elektriväljatugevusega, sest juhtme diameetri vähenemine suurendab koroonamõju ja raadiolainete häireid.
- Juhe peab vastama ümbruskonna kliimatingimustele.

Õhuliinijuhtmete elektrilisi ja mehhaanilisi karakteristikuid käsitleb standard EVS-EN 50182:2002, mis on Euroopa standardi eesti keelne tõlge. Käesolev töö tugineb peamiselt terasaluumiiniumjuhtmete näidetele 35 – 110 kV võrgus, mille karakteristikud standardi järgi on toodud tabelis 1.3.

Tabel 1.3. Terasaluumiiniumjuhtme ACSR karakteristikud EVS-EN 50182 standardi järgi [11]

Kood	Uus kood	Pindala	Juhtmete arv, tk		Diameeter	Mass	Katketugevus	Alalisvoolu takistus
		mm ²	Al	St	mm	kg/km	kN	Ω / km
Ostrich	152-AL1/25-ST1A	176,9	26	7	17,28	613,6	54,78	0,19
Hawk	242-AL1/39-ST1A	281,1	26	7	21,80	976,2	84,89	0,1195
Duck	305-AL1/39-ST1A	344,1	54	7	24,12	1.151,2	96,8	0,095
Condor	402-AL1/52-ST1A	454,5	54	7	27,70	1.520,5	123,75	0,0719

Eestis on palju paigaldatud õhuliinijuhtmeid vastavalt Nõukogude Liidu standardile GOST-839-80, mille peamised kasutuses olevad juhtmed on toodud tabelis 1.4.

Tabel 1.4. Terasaluumiiniumjuhtme ACSR karakteristikud GOST standardi järgi [12]

Kood	Pindala	Juhtmete arv, tk		Diameeter	Alalisvoolu takistus	Katketugevus	Mass
	Al/St	Al	St	mm	Ω / km	N	kg/km
(120/27)	114/26,6	30	7	15,4	0,253	49465	528
(150/24)	149/24,2	26	7	17,1	0,204	52279	599
(185/24)	187/24,2	24	7	18,9	0,154	58075	705
(240/32)	244/31,7	24	7	21,6	0,118	75050	921
(300/39)	301/38,6	24	7	24	0,096	90574	1132
(400/51)	394/51,1	54	7	27,5	0,073	120481	1490

Käesolevas töös on autor kasutanud õhuliinijuhtmete arvutustes näidiseks ACSR tüüpi õhuliinijuhtmeid, mis on enim kasutatav õhuliinijuhtmetüüp Eestis.

2. ÕHULIINIJUHTMETE PROJEKTEERIMINE

Eestis on kasutusel õhuliinijuhtmete projekteerimisel mitmed standardid, erinõuded ja eeskirjad. Juhtmete ristlõige määratakse projekteerimise etapis ökonoomse voolutiheduse järgi, ökonoomsete intervallide meetodil või lubatava pingekao alusel (jaotusvõrkudes) [13]. Õhuliinide projekteerimisel lähtutakse standarditest:

- Standard „Elektriõhuliinid vahelduvpingega üle 1kV“ EVS-EN 50341-1:2013
- Standard „Elektriõhuliinid vahelduvpingega üle 1kV“ Osa 2-20:2018 Eesti siseriiklikud erinõuded (SEN)
- Standard „Üle 1kV nimivahelduvpingega tugevvoolupaigaldiste maandamine“ EVS-EN50522:2010
- Standard „Elektripaigaldise käit“ EVS-EN 50110-1:2013

Lisaks tuleb arvestada etteantud lähteandmeid, seadusandlust ja muid dokumente:

- Eel- ja põhiprojektid
- Omavalitsuste projekteerimistingimused
- Hankedokumendid
- Ehitusseadustik
- Seadme ohutuse seadus

Eesti elektrisüsteemi haldajate normdokumendid:

- „Elektrilevi OÜ (0,4 ... 20kV) võrgustandard“
- Elering AS koostatud 700 seeria nõuded kõrgepingeliinide projekteerimisele ja ehitusele
 - o 701 Projekteerimine
 - o 702 Ehitamine
 - o 703 Materjalid

Juhtmete lõhestamise vajaduse kehtestab koroona tingimus, mis kehtib reeglina 110kV ja kõrgema pingega liinidele. Lisaks tuleb juhtmete valikul lähtuda mehaanilistest tingimustest, kuna pärast elektrilisi arvutusi leitud juhtme ristlõige ei pruugi tagada piisavat mehaanilist tugevust [4]. See võib esineda juhtumitel, kus on väga pikad visangud ja väikesed elektrilised koormused. Mehaaniliste arvutuste eesmärgiks on [13]:

- Õhkvaheemike ja mastide dimensioneerimine (juhtmete rippe alusel).
- Juhtmete vastupidavuse tagamine (tõmbepingete arvutus).
- Paigaldustabelite ja -köverate koostamine.

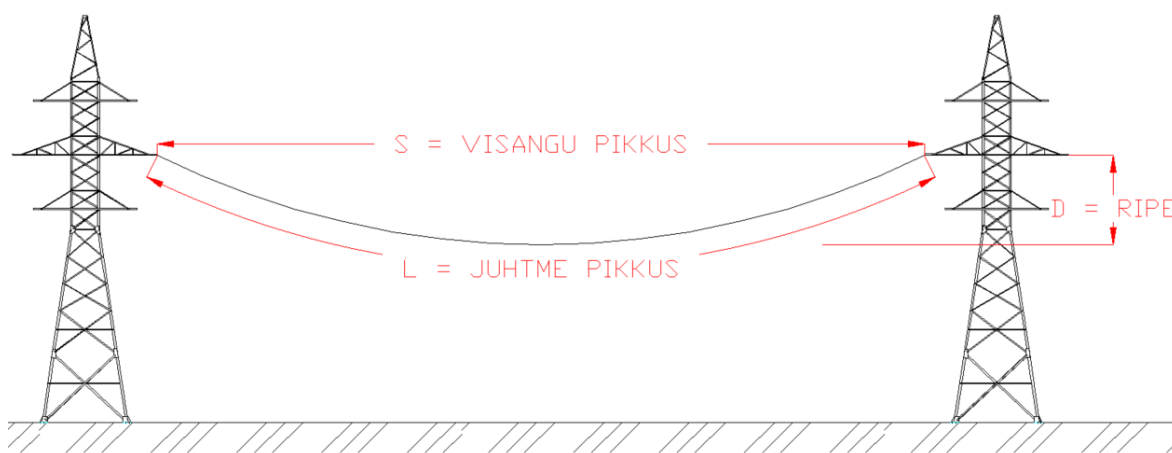
2.1 Juhtme rippe kontseptsioon

Kõrgepingeliinid peavad olema projekteeritud ning ehitatud selliselt, et tagatud oleks juhtmete piisav kaugus ehitistest, inimestest, sõidukitest, mis liini alt läbi sõidavad, kui ka muudest objektidest. Veelgi keerulisemaks teeb asjaolu see, et liine mõjutab teatud ajavahemikul venimus ning lisaks muudab liinijuhtmete kõrgust temperatuur. See tähendab, et pärast õhuliinijuhtmete projekteerimist ja paigaldamist peab arvestama asjaoluga, et riipe on pidevas muutumises. Kui õhuliinijuhe on paigaldatud kahele kandepunktile, kus juhtmele mõjuv jõud on ainult juhtme kaal, moodustab see aheljoone kuju (joonis 2.1.). Õhuliinijuhtmete ripete ja pingsuse arvutus peab vastama järgnevatele asjaoludele [14]:

- tagama piisava õhkvahemiku maapinnaga igal ajahetkel,
- pingsus ei tohi ületada oma piirväärtusi koormusjuhtumite puhul,
- vastama nõutud tingimustele vibratsiooni, juhtme hüplemise, magnetväljade ja koroona suhtes,
- pingsus ei tohi olla nii suur, et see hakkab kahjustama õhuliinimaste.

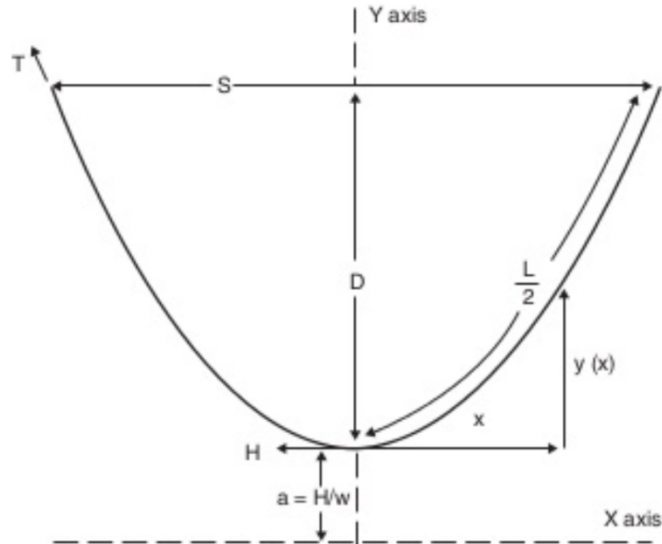
Juhtme riipe sõltub:

- juhtme kaalust,
- visangu pikkusest,
- juhtme pingsusest,
- ilmastikuoludest (tuulemõju, jääde),
- temperatuurist,
- juhtme elastsusest,
- juhtme roomest (venimine).



Joonis 2.1. Õhuliini juhe võrdsetel kinnituskõrgustel

Aheljoone kuju on funktsioon juhtme massist, horisontaalsest tõmbekomponendist, visangu pikkusest ja juhtme rippest. Juhtme ripet mõõdetakse vertikaalselt juhtme kinnituspunkti kõrguselt juhtme madalaimasse punkti [14]. Aheljoone graafiline kuju:



Joonis 2.2. Aheljoone kuju võrdsetel kinnituskõrgustel [14]

Aheljoone võrrand avaldub vastavalt [14]:

$$y(x) = \frac{H}{w} \left(\cosh \left(\frac{wx}{H} \right) - 1 \right) \cong \frac{w(x^2)}{2H} \quad (2.1)$$

kus w – juhtme mass, N/m,

H – pingsuse horisontaalne komponent juhtmes, N,

x – horisontaalne distant juhtme madalaimast punktist, m.

Juhul, kui juhtmete kinnituspunktid asuvad võrdsetel kõrgustel, on juhtme madalaim punkt visangu keskel ning võrrandi 2.1 järgi leitakse riipe visangu pikkuse jagamisel kahega ($x = \frac{S}{2}$). Parabooli meetod avaldub [14]:

$$D = \frac{H}{w} \left(\cosh \left(\frac{wS}{2H} \right) - 1 \right) \cong \frac{wS^2}{8H} \quad (2.2)$$

kus D – juhtme riipe, m,

w – juhtme mass, N/m,

H – pingsuse horisontaalne komponent juhtmes, N,

S – visangu pikkus, m.

Paraboolset meetodit rippe arvutamiseks saab täpseks nimetada juhul, kui riipe moodustab alla 5% visangu pikkusest. [14] Kahe meetodi erinevuse arvutamiseks vaatleme teras-alumiinium „Hawk“ tüüpi juhtme rippeid erinevatel visangu pikkustel. Tulemused on toodud tabelis 2.1.

Tabel 2.1. Ripete arvutusmeetodite võrdlus

Õhuliinijuhe Hawk 242/39 (juhtme mass $w = 9,57$ N/kg)			
Visangu pikkus, m	Aheljoone meetod	Parabooli meetod	Ripete erinevus, mm
	Riipe, m	Riipe, m	
150	1,476	1,475	1,00
200	2,624	2,623	1,00
250	4,1	4,098	2,00
300	5,905	5,902	3,00
350	8,038	8,033	5,00
400	10,501	10,492	9,00

Antud õhuliinijuhet kasutatakse enamjaolt 110 kV liinidel, kus visangute pikkused jäävad vahemikku 200 – 300 m. Selles vahemikus on kahe erineva meetodi rippe lõppkõrguse vahe keskmiselt 3 mm. Arvutatud suurusjärg tundub väga marginaalne, kuid arvestades vigu, mis võivad ette tulla liiniehitusel (mastipüstituse täpne asukoht, viseerimise täpsus, juhtme kinnituspunkti kõrgus), siis on kindlasti eeskujulikum projekteerimise faasis hoida rippe arvutus võimalikult täpne.

Sarnaselt juhtme rippele, saab aheljoone meetodi kaudu juhtme tegelikku pikkust arvutada. Võrrand avaldub [14]:

$$L = \left(\frac{2H}{w}\right) \sinh\left(\frac{Sw}{2H}\right) \cong S \left(1 + \frac{S^2 w^2}{24H^2}\right) \quad (2.3)$$

2.1.1 Juhtme venivus

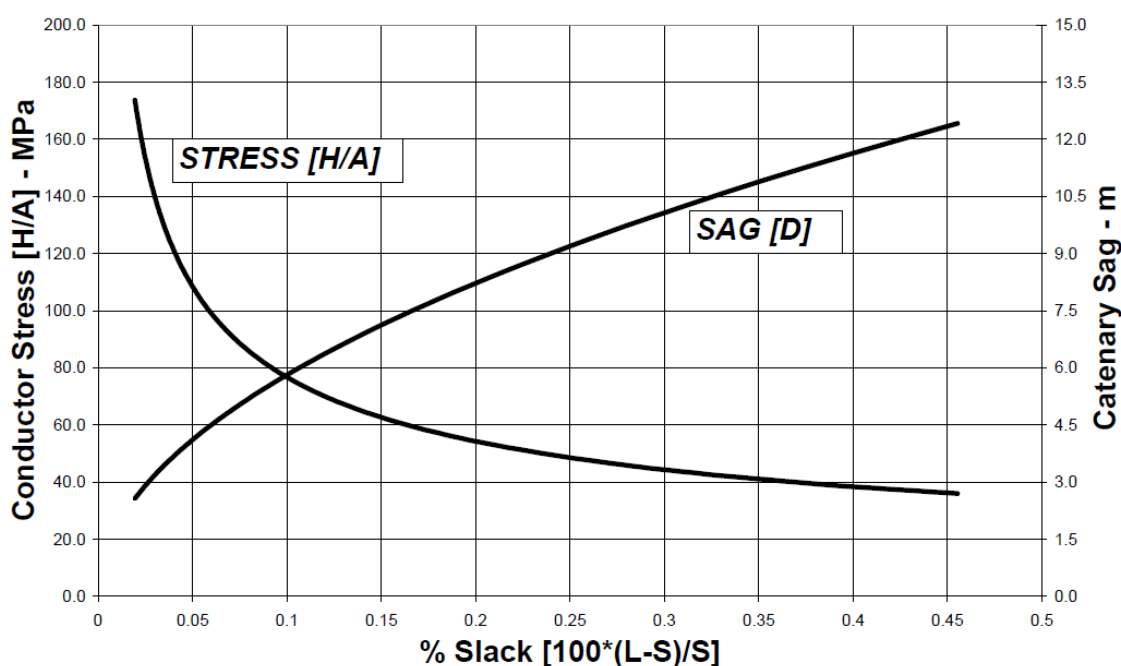
Juhtme pikkuse ja visangu pikkuse vahet nimetatakse juhtme venivuseks (*conductor slack*). Juhtme venivus avaldub valemi 2.3 järgi [14]:

$$L - S = \left(\frac{2H}{w}\right) \sinh\left(\frac{Sw}{2H}\right) - S \quad (2.4)$$

Sarnaselt juhtme rippe arvutusmeetoditele on võimalik leida juhtme venivus paraboolse võrrandi abil, mis ei ole küll nii täpne kui võrrand 2.4, kuid annab parema ülevaate juhtme venivuse, pingsuse ning visangu pikkuse omavahelistele seostele [14]:

$$L - S \cong S^3 \left(\frac{w^2}{24H^2} \right) \cong D^2 \left(\frac{8}{3S} \right) \quad (2.5)$$

Siinkohal on üsna ilmekalt näha, et juhtme venivus on visangu pikkusega kuupsõltuvuses vastava aheljoone konstandi korral $\left(\frac{H}{w}\right)$, ning ruutsõltuvuses juhtme rippega. Paremini saab seda seost näha graafilisel kujul joonisel 2.3. [14]

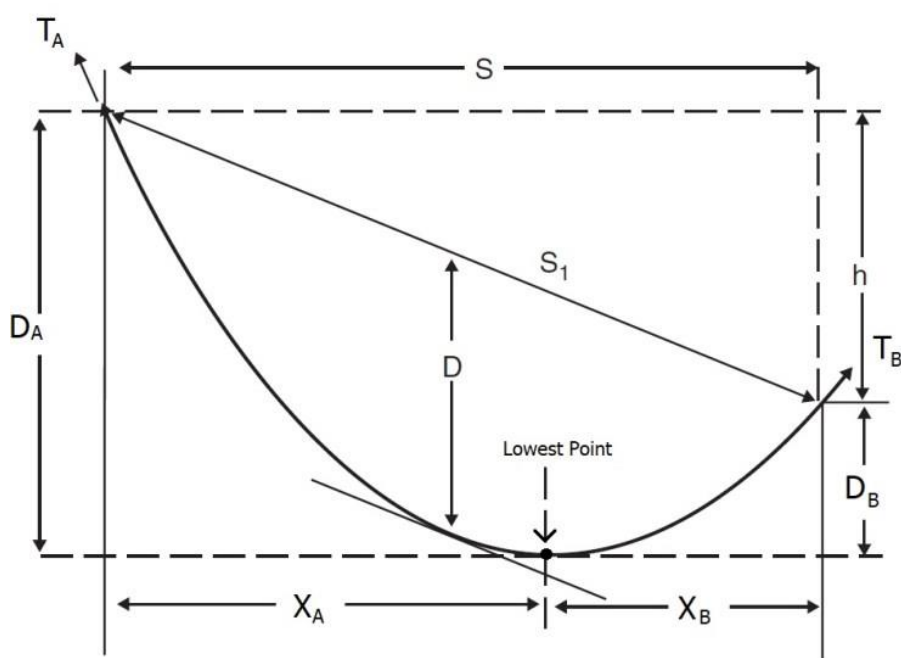


Joonis 2.3 Mehaanilise pinge ja rippe sõltuvus juhtme venivusest [14]

Joonisel 2.3 on kujutatud juhtme mehaaniline pinge vasakpoolsel telgjoonel, aheljoone meetodi kaudu tuletatud riipe parempoolsel teljel ning nende seos juhtme venivusega. Tähelepanuväärne on asjaolu, et üsna väikese juhtme pikkuse muutuse korral on märgatavalt suured mõjud visangu rippele ja mehaanilisele pingele. Joonise 2.3 graafiku järgi on juhtme pikkuse muutumisel 23 cm (1,5%) võrra on muutus juhtme mehaanilises pingsuses ligikaudu 30Mpa (38%) ning rippes ligikaudu 3m (33%). Juhtme venivuse aspekt on seetõttu juhtmete projekteerimisel ning paigaldamisel väga oluline, selgitamaks kui palju mõjutavad marginaalsed muutused juhtme pikkuses rippe peamised parameetreid. Juhtme venivust võivad põhjustada temperatuur ja elastiline kui ka plastiline juhtme venimine.

2.1.2 Ripped erineva kõrgusega kinnituspunktides

Eesti tingimustes esineb vähe olukordi, kus juhtmete kinnituspunktid asuvad märgatavalt erinevatel kõrgustel, kuid rippe olemuse paremaks mõistmiseks on oluline teada antud olukorra arvutuskäiku. Rippe analüüs ja arvutus koosneb identsetest võrranditest, kus kinnituspunktid asuvad samal kõrgusel. Aheljoone võrrand juhtme madalamaimast punktist on sama nagu peatükis 2.1. Erinevus on selles, et ripet vaadeldakse kahes erinevas lõigus – madalaimast punktist madalamasse kinnituspunkti (X_B) ja kõrgemasse kinnituspunkti (X_A) (joonis 2.4) [14].



Joonis 2.4. Juhtme rippe erinevatel kinnituskõrgustel [14]

Nagu jooniselt võib märgata, ei ole juhtme madalaim punkt enam visangu keskel. Lisaks on näha, et kinnituspunkti D_A suurenemisel liigub visangu madalaim punkt madalama kinnituspunkti poole ning võib liikuda ka kinnituspunktist kaugemale. Joonise 2.4. järgi avaldub juhtme madalaima punkti kaugus [14]:

$$X_B = \frac{S}{2} - \frac{H}{w} \sinh^{-1} \left(\frac{\frac{h}{2}}{\frac{H}{w} \sinh \frac{S}{2H}} \right) \quad (2.6)$$

Rippe arvutamiseks saab nüüd kasutada valemit 2.1, kus juhtme madalaima punkti horisontaalne distant x , tuleb asendada valemis 2.6 leitud distantiga X_B . Teades horisontaalseid kauguseid X_B ja X_A , saab avaldada juhtme tegeliku pikkuse [14]:

$$L \cong S + S^3 \left(\frac{w^2}{6H^2} \right) \quad (2.7)$$

kus $S = X_A + X_B$, m.

Juhtme rippe valemid sõltuvalt kinnituspunkti asukohast [14]:

$$D_R \cong \frac{w(X_B^2)}{2H} \quad (2.8)$$

$$D_L \cong \frac{w(X_A^2)}{2H} \quad (2.9)$$

kus D_R – juhtme riipe sõltuvalt parempoolsest kinnituspunktist, m,

D_L – juhtme riipe sõltuvalt vasakpoolsest kinnituspunktist, m.

Juhtme maksimaalsed mehaanilised koormused avalduvad kinnituspunktides [14]:

$$T_R = H + wD_R \quad (2.10)$$

$$T_L = H + wD_L \quad (2.11)$$

kus T_R – juhtme mehaaniline koormus parempoolses visangus, N

T_L – juhtme mehaaniline koormus vasakpoolses visangus, N

Juhtme horisontaalne koormus on mõlemas kinnituspunktis võrdne. Vertikaalne komponent juhtme mehaanilises koormuses on alati suurem juhtme kõrgemas kinnituspunktis [14].

2.1.3 Taandatud visangu kontseptsioon

Ülekandeliinid on tavapäraselt projekteeritud liini osade kaupa, kus iga vaadeldav osa algab ning lõpeb ankru- või lõpumastiga, mis tõkestab juhtmete pikisuunalisi liikumisi. Antud seksioone

nimetatakse ankrusisanguteks, kus visangu vahepealsed struktuurid on kandemastid. Õhuliinijuhtme rippe ja pingsuse arvutusi teostatakse reeglina taandatud visangule, mis on iga õhuliini ankrusisangule unikaalne. Taandatud visangu puhul eeldatakse, et kõik liinijuhtmele mõjuvad koormused erinevatel juhtumitel kehtivad kõikidele visangutele konkreetses sektsioonis. Taandatud visangu eesmärk on lihtsustada õhkvaheemike arvutusi, mastide planeerimisi ja liini kerimistööd. Taandatud visangut ei saa lugeda täpseks mägistes tingimustes, kus varieeruvad visangute pikkused ja mastide kõrgused. Taandatud visangut arvutatakse liinilõikudele, mis on üldiselt samal tasapinnal järgneva valemiga [14]:

$$RS = \sqrt{\frac{S_1^3 + S_2^3 + \dots + S_n^3}{S_1 + S_2 + \dots + S_n}} \quad (2.12)$$

kus RS – taandatud visang liinilõigule, kus on n arv visanguid, m,

S_1 – esimese visangu pikkus, m,

S_2 – teise visangu pikkus, m,

S_n – n -da visangu pikkus, m.

Taandatud visangus jäävad ankrumastide vahele reeglina kandemastid, millel juheta kannavad kandeketid. Kandeketid saavad juhtme suhtes vabalt liikuda, mis annabki eelduse, et igas visangus olevad jõud on võrdsed taandatud visangu jõududega. Seega saab taandatud visangu arvutamisel erinevatel koormusjuhtumitel teha eelduse, et need kehtivad kõikidele üksikutele visangutele [14].

2.2 Juhtme olekuvõrrand

Variatsioon temperatuuris, tuul ja jäide muudavad juhtme olekut nii selle alumiinium- kui ka teraskihis. Juhtme mehaanilise pingsuse muutumisel muutub juhtme riipe. Juhtme olekuvõrrand avaldub [15]:

$$\sigma^3 - \sigma^2 \cdot \left(\sigma_0 - \alpha \cdot E \cdot (t - t_0) - \frac{a^2 \cdot g_0^2 \cdot E}{24 \cdot \sigma_0^2} \right) = \frac{a^2 \cdot g_0^2 \cdot E}{24} \quad (2.13)$$

Võrrandi 2.20 kasutamisel on lihtsustamise mõttes võimalik see avaldada:

$$A = \sigma_0 - \alpha \cdot E \cdot (t - t_0) - \frac{a^2 \cdot g_0^2 \cdot E}{24 \cdot \sigma_0^2}$$

$$B = \frac{a^2 \cdot g_0^2 \cdot E}{24}$$

$$\sigma^3 - \sigma^2 \cdot A = B$$

- kus a – visangu pikkus, m,
 α – juhtme joonpaisumistegur, 1/°C,
 E – juhtme elastsusmoodul, kg/mm²,
 σ_0 – juhtme pingsus esialgses tingimuses, kg/mm²,
 σ – juhtme lõplik pingsus, kg/mm²,
 t_0 – temperatuur esialgses tingimuses, °C,
 t – juhtme lõplik temperatuur, °C,
 g_0 – juhtme erikoormus esialgses tingimuses, kg/m·mm²,
 g – juhtme lõplik erikoormus, kg/m·mm².

Tegemist on sisuliselt kuupvõrrandiga, mille täpsema avaldamise käigus on võimalik välja arvutada valemid juhtme pingsuse lahendamiseks erinevatel tingimustel. Käesolevas lõputöös on juhtme olekuvõrrand allika [15] näitel avaldatud tabelarvutusprogrammi Excel, mille kasutamisel saab arvutada erinevate juhtmetüüpide parameetreid. Olekuvõrrand käsitleb juhtmeid erinevatel erikoormustel, mis on samuti üheks sisendiks. Arvutuslik erikoormus juhtme omakaalust avaldub [13]:

$$g_1 = \frac{G}{A} \quad (2.14)$$

- kus g_1 – juhtme erikoormus omakaalust, kg/m·mm²,
 G – juhtme kaal ühe m kohta, kg,
 A – juhtme ristlõige, mm².

Erikoormus jäite kaalust avaldub [13]:

$$g_2 = \frac{l}{A} \quad (2.15)$$

- kus l – normjäitekoormus, kg.

Vastavalt 2.22 valemile saab vertikaalse erikoormuse jäitega kaetud õhuliinijuhtmele avaldada [13]:

$$g_3 = g_1 + g_2 \quad (2.16)$$

Tuulest tingitud erikoormus jäiteta juhtmele [13]:

$$g_4 = \frac{q_h \cdot G_q \cdot G_c \cdot C_c \cdot d}{1000A} \quad (2.17)$$

Tuulest tingitud erikoormus jäitega juhtmele [13]:

$$g_5 = \frac{q_h \cdot G_q \cdot G_c \cdot C_c \cdot \psi_W (d + 2b)}{1000A} \quad (2.18)$$

kus b – jäite paksus, mm

ψ_W – tuulekoormuse kombinatsioonitegur,

d – juhtme läbimõõt koos isolatsiooniga, mm

G_q – iilireaktsioonitegur,

G_c – juhtmete mehaanilise resonantsi tegur,

C_c – juhtme tuuletakistustegur,

q_h – juhtme dünaamiline surve kõrgusel h .

Summaarne erikoormus jäiteta juhtmele [13]:

$$g_6 = \sqrt{g_1^2 + g_4^2} \quad (2.19)$$

Summaarne erikoormus jäitega juhtmele [13]:

$$g_7 = \sqrt{g_3^2 + g_5^2} \quad (2.20)$$

2.3 Juhtme paigaldustabel

Juhtme olekuvõrrandi arvutus annab eelduse õhuliinijuhtme montaažitabeli koostamiseks, kus on liinijuhtme ehitajale välja toodud konkreetsed ripped ning tõmbed, millest peab paigaldusel lähtuma. Iga õhuliiniprojekt peab sisaldama juhtmete ja piksekaitsetrosside montaažitabeleid.

Kuna õhuliinijuhtmeid ehitatakse aastaajast hoolimata, peavad montaažitabelis olema käsitletud parameetrid erinevate välistemperatuuride korral. Lähteandmed paigaldustabelite koostamiseks:

- Juhtme karakteristikud:
 - Ristlõige
 - Mass
 - Elastsusmoodul
 - Joonpaisumistegur
 - Erikoormus
- Taandatud visangu pikkus ankruvisangu kohta.
- Aasta keskmine soovituslik pingsus.
- Aasta keskmine temperatuur.

Õhuliinijuhtme montaažitabeli arvutuskäik:

1. Juhtme olekuvõrrandi arvutus erinevatel välistemperatuuridel, mille tulemusena saadakse pingsus juhtmes (N/mm²).
2. Pingsuse teisendamine tõmbekoormuseks.
3. Rippe arvutus vastavale tõmbekoormusele, mille tulemusel saadakse juhtme ripe enne venimist.
4. Rippe arvutus pärast õhuliinijuhtme venimist.

Montaažitabeli koostamisel ei arvestata juhtmele erikoormusi tulenevalt jäitest ja tuulest, kuna paigaldamise tingimused on üsna tõenäoliselt normaalses tingimustes ja uuel juhtmel ei esine jäitekihti. Käesolevas töös on kasutatud montaažitabeli koostamiseks tabelarvutusprogrammi Excel, kus juhtme ripete arvutamisel kasutatakse aheljoone meetodit. Erinevate ACSR tüüpi õhuliinijuhtmete karakteristikud montaažitabeli koostamiseks on toodud tabelis 2.2.

Tabel 2.2. ACSR tüüpi juhtmete karakteristikud

Juhe	Mark	ACSR 152/25	ACSR 242/39	ACSR 305/39	ACSR 402/52
	Tüüp	Ostrich	Hawk	Duck	Condor
Ristlõige	mm ²	176,9	281,1	344,1	454,5
Katketugevus	kN	54,78	84,89	96,8	123,75
Mass	N/m	6,01328	9,56676	11,28176	14,9009
Algne elastsusmoodul	N/mm ²	61000	61000	50000	51000
Lõplik elastsusmoodul	N/mm ²	76000	76000	67000	68000
Joonpaisumistegur	1/C	0,0000192	0,0000192	0,0000193	0,0000193
Läbilaskevõime	A	550	745	845	1000
Erikoormus juhtme omakaalust	N/m·mm ²	0,033992538	0,034033298	0,032786283	0,032785259

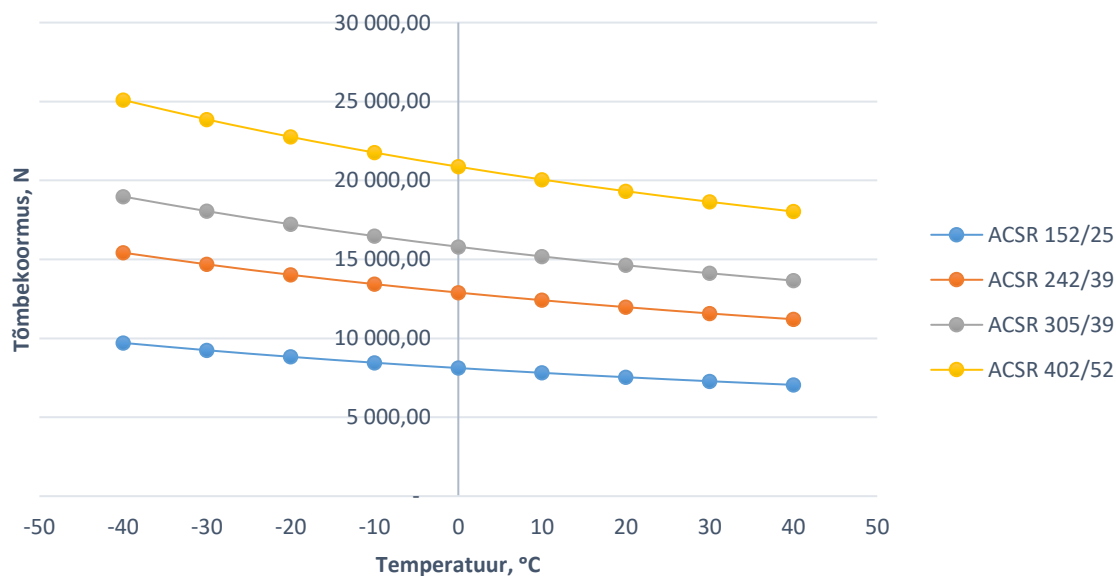
Tabelis 2.3. on toodud juhtmetüüpide olekuvõrrandi arvutusest saadud pingsus teisendatuna tõmbekoormusesse on toodud tabelis 2.3, kus lähteandmeteks on:

- Visangu pikkus 300 m.
- Aasta keskmine pingsus 55 N/mm².
- Aasta keskmine õhutemperatuur 5 °C.

Tabel 2.3. ACSR tüüpi juhtme tõmbekoormused erinevatel temperatuuridel

Temperatuur	Tõmbekoormus, N			
	ACSR 152/25	ACSR 242/39	ACSR 305/39	ACSR 402/52
-40	12 686,70	20 149,62	24 557,65	32 506,97
-30	11 884,16	18 877,23	23 061,36	30 506,85
-20	11 173,05	17 749,75	21 714,94	28 710,06
-10	10 543,27	16 751,11	20 506,81	27 100,46
0	9 984,88	15 865,54	19 424,02	25 659,99
10	9 488,56	15 078,30	18 453,38	24 370,50
20	9 045,97	14 376,20	17 582,11	23 214,31
30	8 649,76	13 747,57	16 798,31	22 175,32
40	8 293,61	13 182,43	16 091,26	21 238,89

Parema ülevaate saamiseks on erinevate teraalumiiniumjuhtmete pingsused toodud graafiliselt joonisel 2.5, kus on näha, et temperatuuri tõustes juhtme pingsus väheneb. Kuna kasutatud õhuliinijuhtmete ristlõiked ja erikoormused on erinevad, aga lähteandmed samad, on graafikul kujutatud juhtmete sõltuvus välistemperatuurist üsnagi sarnane ning erinevust tõmbekoormustes mõjutab antud juhul kõige rohkem juhtme erikoormus.



Joonis 2.5. ACSR juhtme pingsuse sõltuvus välistemperatuurist

Eelnevalt kirjeldatud arvutusmetoodika toob välja, kui olulisel kohal on õhuliinijuhtmete projekteerimisel lähteandmete valik, kuna aasta keskmise pingsuse määramisel muutub ripete olukord üsna märgatavalt. Vastavalt standardile EVS-EN 50341-2-20:2018, tuleb juhtme baaspingeks terasalumiiniumjuhtmetel valida see piirides 45 – 60 N/mm² [16]. Terasalumiiniumjuhtme ACSR 152/25 ripped tabeli 2.3. tõmbekoormustel ja baaskoormusel 45 N/mm² ja 60 N/mm² on toodud tabelis 2.4.

Tabel 2.4. Terasalumiiniumjuhtme ACSR 152/25 ripped erinevatel baaspingetel

Temperatuur, °C	Juhtme ripe, m	Juhtme ripe, m
	Baaspingel 45 N/mm ²	Baaspingel 60 N/mm ²
-40	4,76	6,97
-30	5,11	7,32
-20	5,47	7,66
-10	5,83	8,00
0	6,19	8,33
10	6,55	8,66
20	6,91	8,98
30	7,26	9,29
40	7,61	9,59

Juhtme baaspinge valimisel tuleb lähtuda projekteeritavast õhuliinijuhtmest kui ka projekteeritud kõrgepingeliini mastidest. Baaspinge järgi arvatud koormustele peavad vastu pidama nii mastid kui ka juhtmed ise. Küll aga võib Tabeli 2.4. näitel järeldada, et juhul, kui baaspinge väärtuse arvestamisel on võimalik seda määrata teatud väärtuste vahemikus, mõjutab lõplik valik juhtme rippeid üsna märgatavalt. Tabelis 2.4. on arvatud juhtme ripped enne selle venimist ning üldistatuna võib väita, et vastavalt SEN-is välja toodud baaspingete vahemikule oleneb sellest ACSR 152/25 juhtme näitel ripe kuni 2 meetrit.

3. ÕHULIINIJUHTMETE PAIGALDUS

Ülekandeliinide ehitus koosneb erinevatest tööetappidest, mis kõik vajavad individuaalset lähenemist võimaldamaks peamiste komponentide – vundamentide, mastide ja õhuliinijuhtmete paigaldust. Õhuliinide projekteerimine lähtub konkreetsest maastikust, kuhu liin on planeeritud. Täpselt samasugustel lähteandmetel tuleb planeerida õhuliini ehitustegevus, mis määrab ära kasutatavad mehhanismid, spetsiifilised teadmised, oskused ning ehitusmeeskonna füüsilise vastupidavuse kui ka nende poolt kasutatava varustuse. Hoolikas planeerimine tagab lõpliku ehitise kvaliteetse, tähtaegse ja keskkonda võimalikult vähe koormava tulemuse. Ehitusperioodi ajal tuleb lähtuda meetmetest, mis minimeerivad ohud keskkonna reostumisele ning tagavad objekti ohutuse. Maapinna täielikku kahjustumist on liiniehitusel pea võimatu vältida. Selle vähendamisele aitab kaasa liini projekteerimisel hea trassivalik, kus tuleb kaaluda ligipääsuteede võimalikkust, ajutiste teede ehitamise vajadust ja võimalikkust. Ehitustegevuse teostaja saab maapinna kahjustamise vältimiseks kasutada ligipääsudeks puidust plaate, ajutisi juurdepääsuteid, ning hoolikat materjalide transpordiviisi, kus ehitusplatsi hoitakse korras kogu ehitusperioodi vältel. Töömaale jäetud ehitusmaterjalid on põhjustanud hilisemaid kahjustusi põllumajandusmehhanismidele, eluslooma karjadele. Ehitustegevuse planeerimisetapis on soovitatav keskenduda järgmistele spetsiifilistele teguritele [4]:

- Maastikutüüp
- Pinnasetüüp
- Ehitiste olemasolu/hoonestatus
- Põllumassiivid
- Infrastruktuur
- Ristmeväljad (teed ja õhuliinid)

Käesolevas lõputöös on autor keskendunud peamiselt õhuliini juhtmete paigaldusele ja montaažile, kuid enne nimetatud etapiga alustamist, on alljärgnevalt kirjeldatud sellele eelnevad ning järgnevad tööetapid:

1. Mastidetailide transport mastiasukohtadesse.

Metallsõrestik- või raudbetoonmastid on eelnevalt tootmisheses detailselt pakendatud ning ehitustegevusega alustamisel on kõige efektiivsem neid võimalusel ladustada tulevase mastiasukoha läheduses. Ladustamiskohad tuleb valida selliselt, et detailid ei segaks hilisemat vundamentide ehitust [17].

2. Vundamentide ehitus.

Vastavalt projekti eripärale eemaldatakse pealispinnas ning alustatakse vundamentide paigaldust. Eestis kasutatakse ülekandeliinide puhul peamiselt seen- või vaivundamente [17].

3. Mastide komplekteerimine.

Mastide asukoht tuleb valida selline, et seal oleks võimalik raskete mehhanismidega opereerida. Nimetatud tööetapp hõlmab endas koostemontööre ning tõstemehhanismi detailide koostamiseks[17].

4. Mastitõstmised.

Pärast mastide koostamist, mis tehakse vundamentide läheduses, asetsevad mastid puidust plaatide või prusside peal. Masti püstitamiseks kasutatakse teleskoopkraanat [17]. Antud tööetapi kõige väljakutsuvam osa on kraana ligipääs, kuna suuremate mastide tõstmiseks võib vaja minna kuni 200 tonni tõstevõimega masinat, mille kaal võib ulatuda transpordiasendis 60 tonni ning vasturaskustega kuni 131 tonni piiridesse. Ligipääsudeks on töövõtjatel kasutusel erinevad viisid, Eesti praktikas kasutatakse kõige enam:

- kraana tõmbamist metallplaadil,
- ajutiste teede ehitust,
- ajutiste teede ehitust puitplaatide või palkide kasutamisega.

5. Liinirullikute paigaldus ning liinijuhtme kerimine

Pärast mastipüstitusi, paigaldatakse mastidele isolaatorketid ning rullikud juhtme kerimiseks. Olenevalt projektist kasutatakse juhtmete kerimiseks 2 meetodit: pilootrossi või olemasolevat liinijuhet, kui tegemist on juhtmevahetuse projektiga [17].

6. Liinikoridori koristus ja heakord

Projekti lõpus toimub liinikoridori heakorrastamine, kus toimub maapinna silumine, ajutiste rajatiste eemaldamine, ehitusjäätmete koristamine [17].

Õhuliinijuhtme paigaldamistööd tuleks läbi viia kogemustega meeskonnal, et kaitsta juhet kui ka kindlustamaks korrektsed ripped ja mehaanilised koormused juhtmele. Äärmiselt oluline on õhuliinijuhtme ripete projektijärgne installatsioon, kuna see määrab ära koormused mastidele kui ka õhkvaheemikud maapinnaga [4].

3.1 Kerimismeetodid

Õhuliinijuhtmete kerimiseks on läbi ajaloo olnud mitmeid erinevaid meetodeid, millest tänaseks on peamiseks soovituslikuks töövõtteks kujunenud pingutusmeetod (tension method) õhuliinijuhtmete ACSS, ACSR ja teiste mitmekihiliste juhtmete installeerimiseks. Peamised kerimismeetodid on toodud järgnevalt [18]:

1) Pingutusmeetod (*tension method*)

Pingutusmeetod kujutab endast õhuliinijuhtme kerimist pinge all, kus ühes liiniotsas on tõmbemehhanism (vints), ning teises otsas leevendi/pidur. Õhuliinijuhe asetseb trumlil ja spetsiaalsel pukil leevendist tagapool. Juhtme tõmbamiseks on kasutusel terastross või sünteetiline köis, mis paigaldatakse kerimislõigu mastidel olevatele rullikutele. Piloottrossi lõpp kinnitatakse paigaldatava õhuliinijuhtme külge läbi leevendi rullikute. Kerimisprotsessis tõmmatakse vintsi piloottrossi seni, kuniks uus õhuliinijuhe jõuab vintsini. Leevendi kasutamisega hoitakse õhuliinijuhet kerimisprotsessi vältel pinge all, mis tähendab, et juhtme kerimise ajal on võimalik muuta juhtme rippeid ja kindlustada see, et juhe ei puuduta maapinda ega ka teisi ristuvaid rajatisi [18].

2) Poolpingutusmeetod (*semi-tension method*)

Antud kerimismeetod on üsna sarnane tavapärasele pingutusmeetodile, kuid siinkohal jäetakse ära leevendina töötav pidurdusmehhanism. Õhuliinijuhe keritakse otse kaablitrumlilt ja pinge hoidmiseks kasutatakse juhtmepukki. Sellisel meetodil saab hoida minimaalset õhkvahekkum protsessi ajal ning juhtmepukile peab rakendama minimaalset jõudu. Vastasel korral võib kahjustada saada juhe koos juhtmepukiga [18].

3) Lõtv kerimismeetod (*slack method*)

Antud meetodil asetatakse juhtmetrummel pukile, kus see saab vabalt pöörleda. Sellele saab rakendada minimaalset pidurdusjõudu, et takistada trumli ülepöörlemine või juhtmetele silmuste tekkimine. Juhe kinnitatakse sõidukile, mis kerib juhtme laiali mastist masti. Iga masti juures tõstetakse juhe rullikutele kuniks veomehhanism on jõudnud liini lõppu. Antud meetodi kasutamisel ei saa välistada, et juhe puudutaks maapinda ning lisaks ei sobi see liinilõikudele, kus esineb ristuvaid rajatisi või sõiduteid. Maapinnaga kokkupuutel esineb paratamatu oht juhtme vigastamiseks või määrdumiseks. Võõrkehade sattumisel juhtmekiudude vahele võib suurendada koroonas esinemine [18].

4) Laotusmeetod (*layout method*)

Vastupidiselt lödvale kerimismeetodile kinnitatakse antud protsessis juhtme ots liinisektsiooni lõppu ning juhe paigaldatakse trumliga masinale või treilerile, mis liikudes mastist masti kerib juhtme laiali. Mastide läheduses tõstetakse see vastavale rullikule [18].

Juhtmete paigaldamiseks ei ole Eestis ega ka Euroopas kasutusel standardeid. Antud lõputöös on lähtematerjaliks kerimistöodele IEEE standard 524-2016, kus on soovituslikud meetodid mehhanismide valikule, tööriistadele ja paigaldusvõtetele. Vastavalt antud standardile, on soovituslik kasutada pingutusmeetodit õhuliinijuhtme kerimiseks. Lõdva- ja laotusmeetodi kasutamise eelised ja puudused on [19]:

Eelised:

- odavam meetod,
- vähem mehhanisme (tõmbemehhanism, juhtmepukk),
- piloottrossi ei ole vaja eelnevalt paigaldada,
- kiirem paigaldus.

Puudused:

- suur sõltuvus liinilõigu maastikust,
- juhe puutub kokku maapinnaga – oht juhtme vigastamisele,
- ristmehväljade puhul ei saa seda meetodit kasutada,
- vajab sobivat, takistusteta maapinda.

Pingutusmeetodi eelised:

- saab kasutada erinevat tüüpi maastikel,
- juhe ei puutu kokku maapinnaga – oht juhtme vigastamisele minimaalne,
- ristmehväljad ei mõjuta paigaldamist – juhe pidevalt õhus.

Pingutusmeetodi puudused:

- kallim lahendus,
- rohkem mehhanisme (tõmbemehhanism, pidurdusmehhanism, juhtmepukk),
- vaja eelnevalt paigaldada piloottross,
- ajakulukam.

3.2 Paigaldamise mehhanismid

Käesolevas peatükis antakse ülevaade peamistest mehhanismidest ja tarvikutest õhuliini ehitusel, kus tuuakse välja soovituslikud nõuded nende valimisele.

3.2.1 Vints ja leevendi

Õhuliinijuhtme kerimiseks kasutatav vints ning leevendi peavad oma tööprotsessis tagama sujuvad jõud vältimaks äkilisi tõmbeid ning juhtme hüplemist. Mõlemad mehhanismid peavad olema suutelised tagama ühtlast tõmbejõudu. Neid mehhanisme saab paigaldada eraldiseisvatena või gruppidega, kui tegemist on lõhisfaasidega. Soovitatav on, et lõhisfaaside kerimisel asuksid juhtmed iseseisvatel leevendiratastel. Vintsid peaksid olema varustatud mehhaanilise pinge indikaatoritega ja piirajatega, kus piirajal on automaatne vintsi seiskamise süsteem tõmbejõu ületamisel. Leevendid peaksid samuti olema varustatud tõmbejõu indikaatoritega [19].

Mehhanismide töövõime ja jõudude valik sõltub keritava juhtme kaalust, kerimissektsiooni pikkusest, tõmbejõust, visangu pikkustes, maastikust ning takistuste olemasolust (ristuvad õhuliinid, maanteed, veekogud ja raudteed). Üldjoontes on kerimiseks kasutatavad tõmbejõud ligikaudu 50% väiksemad kui lõplikud jõud juhtme viseerimisel. Juhtme horisontaalseid tõmbejõude ei tohiks kerimisprotsessis kunagi ületada. Täpsemat tõmbejõudude arvutust on töö autor käsitlenud peatükis 3.3 [19].

3.2.2 Piloottross

Piloottrossid peavad olema valdavalt keerdudekindlad. Trossi minimaalne katkemisjõud peaks olema vähemalt kolm korda suurem eeldatavast kerimise tõmbejõust. Piloottrossi teatud arvu kiudude purunemisel tuleb see välja vahetada. Üks levinuimaid trossitüüpe, mida liinijuhtme paigaldamisel kasutatakse, on põimitud tross. Põimitud trossid koosnevad kaheksast kuni kaheteistkümnest põimitud kiust, mis on üsna väändumiskindel ja sobib seeläbi õhuliinijuhtme tõmbamiseks väga hästi. Juhuks, kui trossil peaksid tekkima silmused, hargnevad nad peamiselt iseseisvalt lahti, kahjustamata trossi. Tross ise on suure diameetriga, mis omakorda tähendab, et need on suure diameetriga trumlitel. Alternatiivina on kasutamisel veel sünteetilised köied, mille eelisteks on tavapärasest terasest trossi ees kergem kaal. Standardse FUX tüüpi terastrossi kasutamise eelisteks on kõrge paindumus, stabiilsus trossi keerdmomendi osas, pinge ühtlane jagunemine trossikiudude osas, kõrge efektiivsus kerimisprotsessis ja tsingitud pealispind, mis tagab pika eluea. FUX tüüpi trossi karakteristikud on toodud tabelis 3.1 [4].

Tabel 3.1. FUX tüüpi piloottrossi karakteristikud [20]

FUX mudeli nr	Diameeter, mm	Indikatiivne kaal, kg/m	Minimaalne katkemiskoormus, kN	Standartne pikkus, m
21000105	6	0,11	21,5	1800-3600
21000115	8	0,22	42,6	1600
21000125	10	0,35	68	1200
21000135	13	0,55	101	800-1600
21000140	16	0,84	160	900
21000100	18	1,21	212	800
21000145	20	1,37	262	1000
21000155	22	1,52	320	900
21000120	24	1,76	371	800
21000165	26	1,98	409	700
21000170	28	2,33	479	600

3.2.3 Juhtmerullikud

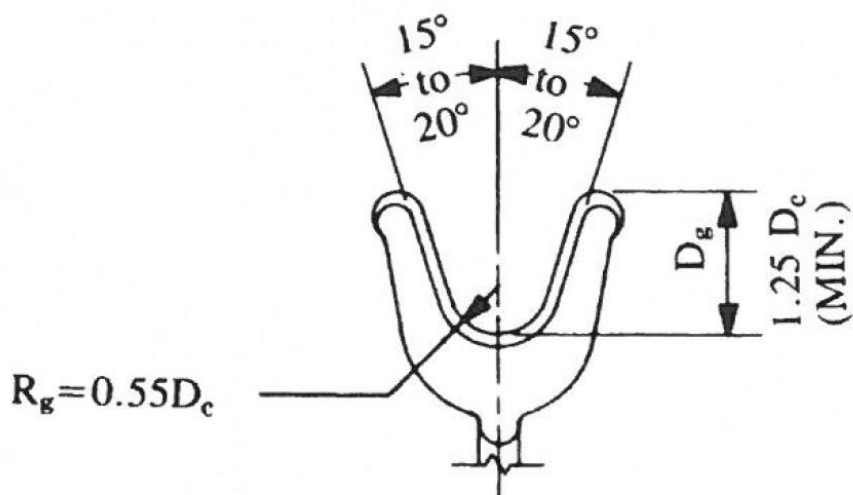
Juhtmerullikud kinnitatakse liinimastidele enne piloottrossi või õhuliinijuhtme paigaldust. Rullikud asetatakse isolaatorkettidele või masti traaversi külge. Plokirattad peavad olema piisava suuruse ja vastama õhuliinijuhtme nõuetele. Juhtmerulliku diameetri suurendamisega kaasnevad järgnevad eelised [19]:

- Juhtmeraadius rullikul suureneb, mis tähendab, et väheneb juhtme paindumine rullikul, mis omakorda vähendab vajaminevat energiat juhtme tõmbamiseks.
- Surve juhtmekiududele väheneb, mis minimaliseerib võimalused juhtme vigastamiseks sisekihtides.
- Hõõrdejõud rullikusoonel väheneb.
- Väheneb rulliku kiirus kerimise ajal, mis pikendab selle eluiga.
- Väheneb survejõud juhtmele rulliku ületamisel, mis vähendab riski paigaldatava juhtme vigastamiseks.

Juhtmerulliku diameetri suurendamine muudab need raskemaks ja raskesti käsitlevaks, mis toob omakorda kaasa:

- Juhtmerulliku maksumuse suurenemise.
- Liini ehitusprotsessi aeglustumise, kuna raskemate juhtmerataste paigaldamine võtab kauem aega.

Rulliku diameeter mõõdetuna soone madalaimast punktist on soovitatav võtta vähemalt 20 korda suurem keritava juhtme diameetrist [19]. Rullikusoone mõõtmed on kujutatud joonisel 3.1.



Joonis 3.1 Juhtmerulliku soon [19]

kus D_c – juhtme diameeter,
 R_g – rulliusoone raadius,
 D_g – rullikusoone kõrgus.

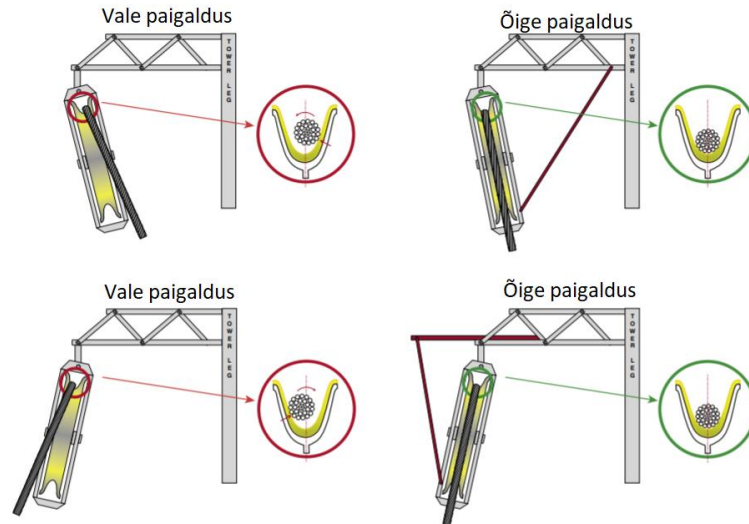
Rullikuid, mille soone raadius on suurem soovituslikust, saab teatud juhtumitel kasutada ka väiksema diameetriga juhtmete kerimisel. Sellisel juhul tuleb arvestada alumiiniumkihtide arvuga juhtmetes, kuna kihtide arvu suurenemine nõuab juhtme hoolikamat toetamist [19]. Joonise 3.1 järgi on soovituslik valida juhtmerulliku soone diameeter 1,1 korda suurem juhtme raadiusest ning soone kõrgus vähemalt 1,25 korda suurem juhtme diameetrist. Soovituslikud rullikusoone mõõtmed vastavalt juhtme alumiiniumkihtide arvule on toodud tabelis 3.2.

Tabel 3.2. Soovituslikud rullikusoone dimensioonid [19]

Alumiiniumkihtide arv juhtmes	R_g		D_g
	Minimaalne	Maksimaalne	Minimalane
1 kuni 2	0,55Dc	1,1Dc	1,25Dc
3	0,55Dc	0,75Dc	1,25Dc
üle 4	0,55Dc	0,625Dc	1,25Dc

Juhtmerulliku puhul tuleb tähele panna nende lubatud kandejõudusid ning hoolitseda selle eest, et rullikusoone oleks sile. Rullikud saavad kõige enam koormust kerimisloigu lõpu- ja algumastides, kus neile rakendub suurem kandekoormus kerija või leevendi asukoha tõttu. Suurem koormus on rullikutel samuti nurga-kandemastides, kus lisaks koormusele tuleb jälgida rullikute nõuetekohast paigaldust. Oluline on, et juhe liiguks kerimise käigus rulliku soone põhjas. Joonisel 3.2 on näidatud

juhtme asukoht nurga-kandemastides, kus ilma tugikonstruktsioonita asub juhe soone küljele toetudes, põhjustades sellega juhtme pöörlemise soone sees. Rulliku toeks võib kasutada tugevamat köit või trossi, kui rullikud on suure diameetriga ja seeläbi raskemad [21].



Joonis 3.2 Juhtmerullikute paigaldus nurga-kandemastides [21]

3.3 Maksimaalse tõmbejõu arvutus

Pingutusmeetodil õhuliinijuhtme paigaldamisel on oluline teada, kui efektiivselt töötavad liinile eelnevalt paigaldatud juhtmerullikud. Enne selle välja selgitamist on vajalik teada jõudu, mis õhuliinijuhet teatud kõrgusel maapinnast hoiab ja seda terve visangu pikkuses. Tegemist on staatilises olukorras esineva koormusega, mis avaldub [19]:

$$T_1 = \frac{WL^2}{8D} \quad (3.1)$$

- kus T_1 – vajaminev jõud juhtme üleval hoidmiseks ühes visangus, N,
 W – juhtme kaal, N/m,
 D – juhtme ripe (ripe kerimisehetkel, mitte lõplik ripe), m,
 L – taandatud visangu pikkus, m.

Arvutades välja jõu T_1 , mida on vaja juhtme üleval hoidmiseks ühes visangus, saab hakata välja arvutama jõudu, mida läheb vaja juhtme tõmbamiseks kerimissektsiooni ulatuses koos kõigi kaasnevate takistustega. Antud takistusteks on õhuliinijuhtme paigaldamisel juhtmerullikud, kus juhtmele mõjub täiendav tõmbejõud rullikust tekkiva nurga ületamiseks. [19]

Piltlikult saab antud momenti ette kujutada ümara raudtala painutamise teatud raadiusele. Painutusepoolne metall ümarrua alumistes kihtides peab sellisel juhul kokku tõmbama ning paindekoha ülemistes kihtides venima. Õhuliinijuhe on aga palju venivam ja elastsem kui ümarraud, ning tänu selle põimitud struktuurile, ei avaldu juhtmele kumbki kriteerium. Küll aga avaldub juhtmele rulliku ületamisel hõõrdejõud, mis on proportsionaalne juhtme tõmbejõule – mida suurem on tõmbejõud, seda rohkem tööd tuleb teha, et juhe üle nõutud raadiuse tõmmata. Juhtmele rakendub lisanduv jõud enne rullikut, kus juhe peab saavutama rullikust tuleneva painde ning pärast rulliku ületust, kus on vaja rakendada jõudu, et juhet uuesti sirgu tõmmata. Vajamineva jõu hulk on proportsionaalne tõmbejõuga ja sõltuvuses rulliku diameetriga – mida väiksem diameeter, seda suurem painderaadius. Juhtmetõmbamiseks rakenduv jõud suureneb progressiivselt pärast iga rulliku ületust. [19]

Juhtmerullikust tulenevaks takistuseks arvestatakse IEEE standardi 524-2016 järgi 2%, seega on igas kandemastis plokiratta efektiivsus 98%. Antud efektiivsuse väärtused varieeruvad olenevalt juhtmesuurusest ja rulliku diameetrist. 98% efektiivsust kasutatakse üldjuhul normaalsetes tingimustes teostatavate kerimistöde kohta. [19]

Sellest lähtuvalt saab välja arvutada ligikaudse tõmbejõu juhtme kerimiseks, kus valemis 3.1. arvutatud jõud T_1 , mis käsitleb endas jõudu enne kerimissektsiooni esimese rullikuni jõudmist, kaudu saab avaldada vajamineva tõmbejõu kerimissektsioonile [19]:

$$T_{max} = \frac{T_1}{EN} \quad (3.2)$$

kus E – juhtmerulliku efektiivsus

N – juhtmerullikute arv kerimissektsioonis

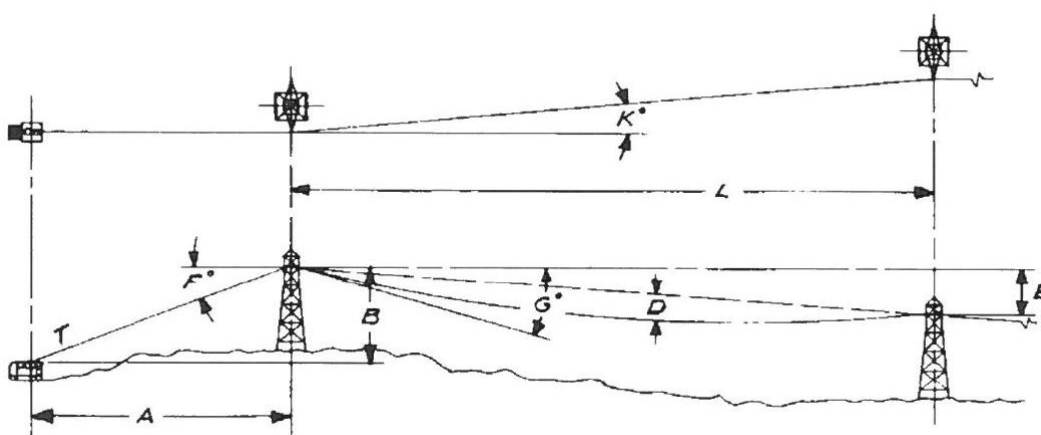
Antud lähenemisviis vajamineva tõmbejõu arvutamiseks on justkui soovituslik juhised, kuna sõltub paljudest muudest faktoritest, mis tulemust võivad mõjutada. Küll aga on see enamuse juhtumitel üsnagi aktsepteeritav lahenduskäik välja arvutamiseks vajaminevate mehhanismide ja piloottrossi karakteristikuid [19].

3.4 Rullikute paigalduskoormused

Järgnevalt kirjeldame meetodit arvutamaks koormust, mis rakendub juhtmerullikutele kerimissektsiooni esimestes mastides pingutusmeetodi kasutamise puhul. Tingimusel, kus kandestruktuurid asuvad ühel kõrgusel ning liinilõigus ei ole nurga-kandemaste, kohaldatakse sellist meetodit ainult esimesele ja viimasele rullikule. Juhul, kui liinilõigus on nurga-kandemaste või kandemastid asuvad erinevatel kõrgustel, tuleks ka nendes mastides kalkuleerida koormused, mis mõjuvad juhtmerullikutele. Antud meetodit tuleb võtta arvesse kõrgepingeliinide mastide koormuste projekteerimisel. Antud meetodi arvutuskäigu lahendamiseks on vaja teada järgnevaid lähteandmeid [19]:

- A - distant leevendi või vintsi ja esimese masti vahel, m,
- B - traaversi kõrgus, kus asub esimene rullik, m,
- D - ripe kerimisprotsessis, m,
- E - kinnituspunktide kõrguse erinevus, m,
- F° - juhtmenurk vintsi või leevendi suhtes, deg,
- G° - tangentsiaalne nurk juhtme ja horisontaalprojektsiooni vahel, deg,
- K° - asimuutnurk masti traaversite vahel, deg,
- L - visangu pikkus, m,
- R_H - horisontaalne koormus rullikul, N,
- R_V - vertikaalne koormus rullikul, N,
- R_{MAX} - maksimaalne koormus rullikul, N,
- T - liini tõmbekoormus, N.

Graafiliselt on ülaltoodud lähteandmed välja toodud joonisel 3.3.



Joonis 3.3 Rulliku kandekoormuste diagramm [19]

Resulteeriva jõu arvutamiseks juhtmerullikul tuleb esmalt arvutada nurgad kerimismehhanismi ja rulliku vahel ning juhtme ning horisontaalprojektsiooni vahel, mis avalduvad [19]:

$$\tan F = \frac{B}{A} \quad (3.3)$$

ning

$$\tan G = \frac{E + 4D}{L} \quad (3.4)$$

Rulliku vertikaalkoormus avaldub vastavalt [19]:

$$R_V = 2T \sin \frac{F^\circ + G^\circ}{2} \quad (3.5)$$

Rulliku horisontaalkoormus avaldub vastavalt [19]:

$$R_H = 2T \sin \frac{K^\circ}{2} \quad (3.6)$$

Rullikule mõjuv maksimaalne koormus on seega [19]:

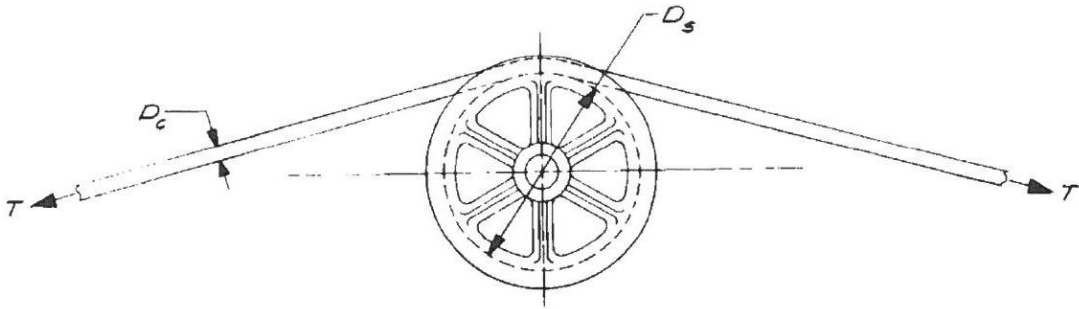
$$R_{MAX} = \sqrt{R_V^2 + R_H^2} \quad (3.6)$$

Kirjeldatud meetodi järgi saab ligikaudse rullikule mõjuva maksimaalse koormuse väärtuse, kuna kirjeldatud valemid lähtuvad juhtme rippe arvutusest paraboolse meetodi järgi, mitte täpsema aheljoone meetodi järgi. Käesolevas arvutuses ei käsitleta ripet tõmbe või pidurdusmehhanismi ja esimese rulliku vahel, kuigi reaalses situatsioonis on see olemas. Küll aga sobib see arvutuskäik rulliku koormuse hindamiseks, kuna see annab pisut suurema väärtuse kui on tegelik koormus [19].

Rullikute valiku tegemisel on oluline lähtuda ka rullikule avalduvast survest (joonis 3.4), mis koosneb järgnevatest muutujatest – juhtmekoormusest, rulliku diameetrist ning juhtme diameetrist. Antud jõud avaldub vastavalt [19]:

$$P = \frac{3T}{D_S D_C} \quad (3.7)$$

kus P – kandesurve, N/mm^2
 T – juhtme tõmbekoormus, N
 D_S – juhtmerulliku diameeter, m
 D_C – juhtme diameeter, m



Joonis 3.4. Rullikule avalduva surve diagramm [19]

4. MODELLEERITUD 35 (110) KV ÕHULIINI JUHTMEVAHETUSE ANALÜÜS

Käesolevas peatükis rakendatakse eelnevalt välja toodud meetodikaid töö autori poolt modelleeritud õhuliiniprojekti järgi. Selle koostamise sisendiks on võetud Eesti jaotusvõrgus paljusinev 35 kV õhuliin, mis on rajatud Nõukogude Liidu aegsetele raudbetoonmastidele, kuhu on võimalik paigaldada 110 kV gabariidis õhuliinijuhe. Modelleeritud õhuliinil on kasutatud kandemastidena PB110-13, mille alumiste traaversite kõrgus on 14,5 m ning ülemise traaversi kõrgus 17,5 m maapinnast [22]. Nurga-ankrumastidena on kasutatud raudbetoonmasti UB110-11, mille alumiste traaversite kõrgus maapinnast on 12,9 m ning ülemise traaversi kõrgus 16,9 m maapinnast [22].

4.1 Lähteandmed

Õhuliinijuhtme projekteerimiseks kasutatavad lähteandmed vastavalt standardile EVS-EN 50341-2-20:2018 [23] [16]:

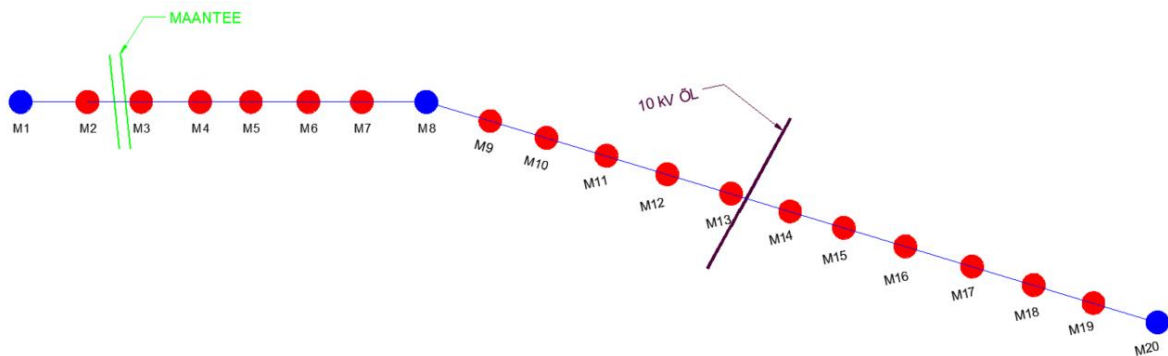
- Töökindlusnivoo	I
- Maksimaalne juhtme temperatuur	+60 °C
- Maksimaalne trossi temperatuur	+40 °C
- Maksimaalne õhutemperatuur	+35 °C
- Aasta keskmine õhutemperatuur	+5 °C
- Minimaalne õhutemperatuur	-40 °C
- Temperatuur jäite korral	-5 °C
- Tuule baaskiirus	21 m/s
- Maastikutüüp	II
- Jäitekihi paksus	10 mm
- Jäite tihedus	900 kg/m ³

Õhkvahekiht EVS-EN 50341-1:2013 ja EVS-EN 50341-2-20:2018 järgi peavad olema vastavalt [23] [16]:

- Õhkvahekiht maani avatud maastikul: 5,0 m + D_{el} = 6,0 m
- Õhkvahekiht maantee, raudtee või veeteeni: 7,5 m + D_{el} = 8,5 m
- Õhkvahekiht tänav või muu tee (v.a. maantee osa): 6,0 m + D_{el} = 7,0 m
- Õhkvahekiht rada (põllu-, metsa vms katendita tee): 5,0 m + D_{el} = 6,0 m

- Õhkvahemik teiste elektriliinideni ja telekommunikatsiooni õhuliinideni: $1 \text{ m} + D_{pp} = 2,15 \text{ m}$
- Vertikaalne õhkvahemik elumajade ja muude ehitisteni: $4,5 \text{ m} + D_{el} = 5,5 \text{ m}$, kus $D_{el} = 1 \text{ m}$ ja $D_{pp} = 1,15 \text{ m}$.

Õhkvahemike arvestamisel tuleb kasutada juhtme temperatuuri $+60 \text{ }^\circ\text{C}$. Õhuliini ülevaateplaan on joonisel 4.1.



Joonis 4.1. Modelleeritud õhuliini ülevaateplaan

Joonisel 4.1. on kujutatud modelleeritud 35 kV õhuliin, kus punase tooniga on tähistatud kandemastid PB110-13 ning sinise värviga nurga-ankrumastid UB110-11. Liinil on kaks erinevat ristmevälja, kus M2 – M3 vahemikus toimub ristumine maanteega ning M13 – M14 vahemikus toimub ristumine 10 kV õhuliiniga. Mastis nr. 8 toimub õhuliini suunamuutus, mis tähendab, et kerimistöodel oleks mõistlik antud õhuliin jagada kaheks erinevaks ankrumisanguks. Liini üldandmed on vastavalt:

- | | |
|-------------------------|---------------------------|
| - Liini pikkus | 4,4 km |
| - Olemasolev faasisjuht | AS-70/11, pikkus 13,86 km |
| - Nimipinge | 35 kV |
| - Kandemastid | PB110-13, kokku 17 tk |
| - Nurga-ankrumastid | UB110-11, kokku 3 tk |

Liini mastid ja visangud on toodud tabelis 4.1, kus on välja toodud masti numbrid ja neile vastav masti tüüp. Lisaks on tabelis kajastatud visangu pikkused, liini piketaaž ning visangus esinevad ristuvad objektid. Modelleeritud õhuliinil ei ole ühtlast mastide jaotust, mis tähendab, et enamjaolt on visangud erinevate pikkustega. Juhtmearvutuste teostamiseks on seeläbi vajadus teostada taandatud visangute arvutus.

Tabel 4.1. Olemasoleva liini mastide ja visangute andmed

Masti nr	Masti tüüp	Nurk	Piketaaz	Visangu pikkus, m	Ristutuvad objektid
1	UB110-11		0	0	
2	PB110-13		250	250	
3	PB110-13		450	200	Maantee
4	PB110-13		670	220	
5	PB110-13		860	190	
6	PB110-13		1075	215	
7	PB110-13		1275	200	
8	UB110-11	par 17° 0'	1515	240	
9	PB110-13		1765	250	
10	PB110-13		1985	220	
11	PB110-13		2215	230	
12	PB110-13		2455	240	
13	PB110-13		2705	250	
14	PB110-13		2935	230	10 kV ÕL
15	PB110-13		3145	210	
16	PB110-13		3385	240	
17	PB110-13		3645	260	
18	PB110-13		3885	240	
19	PB110-13		4119	234	
20	UB110-11		4369	250	

4.2 Juhtmearvutus

Olemasolevad tsentrifuugitud raudbetootüvega mastid kannatavad mastide passi kohaselt maksimaalse ristlõikega juhet AS 242/32, mis võetakse ka uueks paigaldatavaks juhtmeks. Mastidele lubatav piirpingsus aasta keskmisel õhutemperatuuril on vastavalt masti passile maksimaalselt 80 N/mm² [22]. Alljärgnevides arvutustes kasutab lõputöö autor piisava varu tagamiseks piirpingsust 60 N/mm².

Näidisliinis on kaks ankrusisangut, kus mastide vahelised pikkused on varieeruvad. Järgnevalt arvutatakse valemi 2.12 järgi taandatud visangute väärtused ankrusisangule M1 – M8 ja M8 – M20. Arvutustulemused on kantud tabelisse 4.2.

Tabel 4.2 Õhuliini taandatud visangu ja ankrusisangu pikkus

Ankrusisang	Taandatud visang, m	Ankrusisang, m
M1-M8	219	1515
M8-M20	239	2854

Peatükis 2.2 kirjeldatud valemite järgi teostatakse juhtme ACSR 240/32 pingsuse arvutus juhtme olekuvõrrandi kaudu, mille tulemused teisendatakse tõmbekoormusesse ja vastavate tõmbekoormuste ripped arvutatakse aheljoone meetodi kasutamisel erinevatele temperatuuridele. Arvutustulemused on toodud tabelis 4.3.

Tabel 4.3. ACSR 242/32 pingsus, tõmbekoormus ja ripe erinevatel õhutemperatuuridel

Temperatuur, °C	Pingsus, N/mm ²		Tõmbekoormus, N		Ripe, m	
	M1-M8	M8-M20	M1-M8	M8-M20	M1-M8	M8-M20
-40	90,66	87,80	25484,93	24681,88	2,32	2,68
-30	82,51	80,34	23193,78	22582,53	2,54	2,95
-20	75,10	73,61	21109,58	20690,82	2,77	3,24
-10	68,47	67,63	19246,12	19009,79	3,02	3,55
0	62,63	62,37	17605,46	17532,63	3,27	3,88
5	60,00	60,00	16866,00	16866,00	3,40	4,05
10	57,55	57,79	16177,80	16244,27	3,53	4,22
20	53,16	53,81	14944,66	15124,83	3,79	4,57
30	49,39	50,35	13882,74	14152,69	4,05	4,92
40	46,13	47,34	12967,77	13306,75	4,31	5,27
60	40,87	42,40	11489,78	11919,25	4,81	5,95

Tabelis 4.3. olevad õhuliini tõmbekoormused ja ripped kehtivad vastavate ankrusangute taandatud visangu pikkustele. Leidmaks ripped erinevates visangutes pikiprofiili jaoks, saab liini ripped kõigis mastivahemikes leida valemiga [14]:

$$D_i = \frac{w(S_i^2)}{8H_{RS}} \quad (4.1)$$

kus D_i – ripe i visangus, m,

w – juhtme kaal, N/m,

S_i – visangu pikkus i-visangus, m,

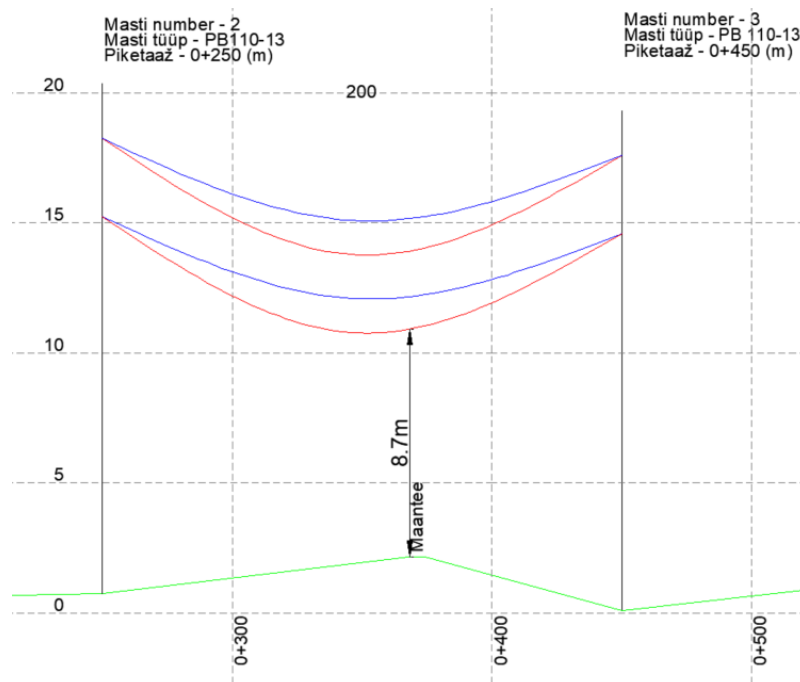
H_{RS} – tõmbekoormus taandatud visangu vastavale temperatuurile, N.

Lisaks Tabelis 4.3. toodud juhtme parameetritele, on tarvilik arvutada ripped lähteülesandes toodud temperatuuril +60 °C. Antud juhtumi puhul on õhuliinijuhtme ripped kõige suuremad, ning on võimalik kontrollida selle sobivust käesoleva õhuliini näitel. Arvutustulemused kõigi liinivisangute kohta on toodud tabelis 4.4.

Tabel 4.4. Õhuliini ripped aasta keskmise ja maksimaalse temperatuuri korral

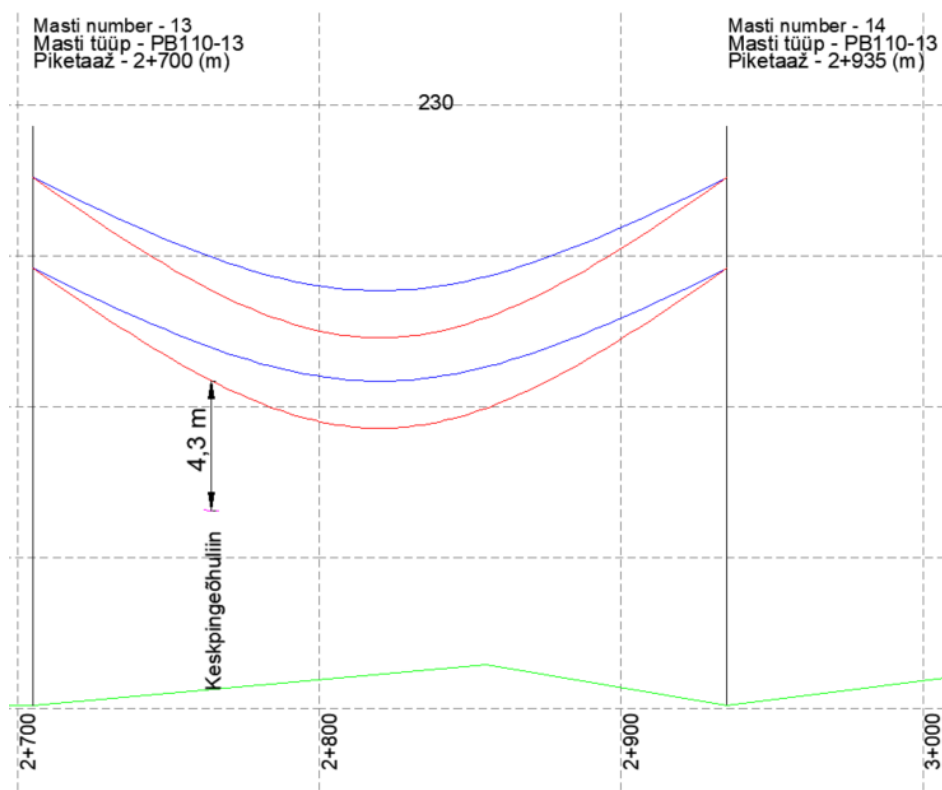
Visang	Visangu pikkus, m	Ripe 5 °C, m	Ripe 60 °C, m
M1-M2	250	4,43	6,50
M2-M3	200	2,84	4,16
M3-M4	220	3,43	5,04
M4-M5	190	2,56	3,76
M5-M6	215	3,28	4,81
M6-M7	200	2,84	4,16
M7-M8	240	4,08	5,99
M8-M9	250	4,43	6,27
M9-M10	220	3,43	4,86
M10-M11	230	3,75	5,31
M11-M12	240	4,08	5,78
M12-M13	250	4,43	6,27
M13-M14	230	3,75	5,31
M14-M15	210	3,13	4,42
M15-M16	240	4,08	5,78
M16-M17	260	4,79	6,78
M17-M18	240	4,08	5,78
M18-M19	234	3,88	5,49
M19-M20	250	4,43	6,27

Tabelis 4.4. toodud ripete järgi kuvatakse antud õhuliin pikiprofilina, kus saab kontrollida selle õhkvaheemike sobivust. Antud näite kohaselt vaatleme ristumist maantee ja olemasoleva 10 kV õhuliiniga. Pikiprofilil väljavõte M2 – M3 vahemikes on joonisel 4.2.



Joonis 4.2. Juhtme ripped M2 – M3 vahemikus

Joonisel 4.2. on väljavõtte pikiprofilist käesoleva õhuliini mastide nr. 2 ja nr. 3 vahemikus, kus on ristmeväli maanteega. Punase joonega on näidatud õhuliinid juhtme temperatuuril +60 °C ning sinisega aasta keskmisel õhutemperatuuril. Vastavalt standardile tuleb tagada maantee kohal gabariit 8,5 m, mis antud hetkel on täidetud. Joonisel 4.3 on väljavõtte pikiprofilist 10 kV õhuliiniga ristumisel.



Joonis 4.3. Juhtme ripped M13 – M14 vahemikus

Vastavalt lähteandmetele tuleb tagada ristuva õhuliiniga gabariit vähemalt 2,15 m, mis antud hetkel on täidetud. Olukordades, kus pärast pikiprofiilide joonistamist esineb probleeme õhkvahekega, kuid õhuliinijuhet välja vahetada ei soovita, tuleb gabariit tagada muude töövõtetega. Võimalused gabariidi parandamiseks on:

- Traaversite tõstmine ühe meetri võrra.
- T-keti montaaž probleemse visangu mastidesse.
- Juhtme tõmbekoormuse suurendamine.
- Mastide välja vahetamine.

Kõige kallim lahendus sellest loetelust oleks mastide välja vahetamine ning kõige odavam juba projekteerimise faasis tõmbekoormuse suurendamine tingimusel, et olemasolevad mastid suurematesse koormustesse vastu peavad.

Kuna käesoleval juhul ei ole õhuliinil gabariidiprobleeme, võib ette võtta juhtmearvutuse viimase etapi, milleks on juhtme paigaldajale projekteeritav montaažitabel.

Juhtme montaažitabel koosneb kahest ankrusisangust ning arvutatakse taandatud visangute järgi. Paigalduse lihtsustamiseks vähendatakse temperatuuride vahemikke. Montaažitabel on esitatud tabelis 4.5.

Tabel 4.5 Montaažitabel juhtmele ACSR 242/32

Ankrusisang N° - N°		1 - 8		8 - 20	
Arvutuslik visang, m		219		239	
JÕUD F (E'), RIPE f (E')		F (E'), N	f (E'), m	F (E'), N	f (E'), m
ÕHUTEMPERatuurIL t (°C)	-20	21110	2,32	24682	3,24
	-15	20150	2,54	22583	3,39
	-10	19246	2,77	20691	3,55
	-5	18398	3,02	19010	3,71
	0	17605	3,27	17533	3,88
	5	16866	3,40	16866	4,05
	10	16178	3,53	16244	4,22
	15	15538	3,79	15125	4,40
	20	14945	4,05	14153	4,57
	25	14394	4,31	13307	4,75
	30	13883	4,81	11919	4,92

Tabelis 4.5. on välja arvatud monteerimisjõud $F (E')$ ja sellele vastav riipe $f (E')$ enne juhtme venimist, mis tähendab, et toodud andmetest tuleb paigaldajal lähtuda. Aasta keskmiseks pingsuseks on mõlema ankrusisangu puhul arvestatud 60 N/mm^2 .

4.3 Kontrollarvutused ja seadmete valik

Õhuliini paigaldamise mehhanismid, materjalid ja tööriistad sõltuvad paigaldatavast juhtmest, mastidest, trassikoridorist ning ristmehväljadest. Arvestades konkreetset näidisliini, valitakse paigaldusmeetodiks 3. peatükis kirjeldatud pingutusmeetod, kuna mõlemas ankrusisangus esineb ristmehvälju, mis takistavad juhtme mööda maad laiali vedamist. Pingutusmeetodi edukaks teostamiseks on vaja kasutada peamiseid õhuliini mehhanisme: vints, leevendi ja juhtmepukk koos kõigi kaasnevate tarvikutega. Mehhanismide parameetrid sõltuvad paigaldatavast juhtmest ja tõmbekoormustest.

4.3.1 Maksimaalne tõmbejõud

Arvutame maksimaalse tõmbejõu mõlemale ankrusisangule vastavalt peatükis 3.3 toodud metoodikale ühildades valemid 3.1 ja 3.2. Maksimaalne tõmbejõud ankrusisangus M1 – M8:

$$T_{1-8} = \frac{WL^2}{8D} \cdot \frac{1}{E^N} = \frac{9,57 \cdot 219^2}{8 \cdot 9,5} \cdot \frac{1}{0,98^6} = 6817 \text{ N}$$

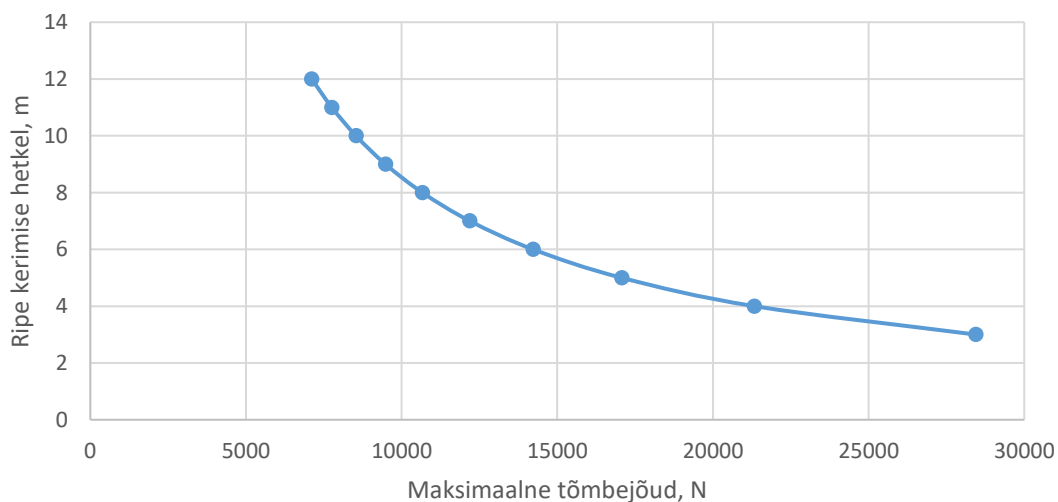
Maksimaalne tõmbejõud ankrusisangus M8 – M20:

$$T_{8-20} = \frac{WL^2}{8D} \cdot \frac{1}{E^N} = \frac{9,57 \cdot 239^2}{8 \cdot 9,5} \cdot \frac{1}{0,98^{11}} = 8983 \text{ N}$$

Maksimaalse tõmbejõu arvutuses on võetud eesmärgiks hoida juhtme ripe paigaldamise hetkel ohutuse tagamiseks 5m kõrgemal maapinnast, mis tagab piisava gabariidi liinilõigu ristmeväljades. Juhtmerulliku efektiivsuseks on arvestatud 0,98, mis on üsna standartne koefitsient.

Arvutatud tõmbejõuga jääb piisav õhkvahemik ristuva maantee ja keskpinge õhuliiniga. See tähendab, et vajaminevate ohutusmeetmete kasutusele võtmisega saab hoida liikluse häirimata ja keskpingeliini välja lülitamata.

Ühtlasi on mõistetav asjaolu, et pikad visangud ja suurem hulk juhtmerullikuid suurendavad juhtme kerimiseks vajaminevat tõmbejõudu ning rippe suurendamisega maksimaalne jõud väheneb. Maksimaalse tõmbejõu sõltuvus kerimishetkel rakendatavast rippest ankrusisangus M8 – M20 on toodud joonisel 4.4.



Joonis 4.4. ACSR 242/32 maksimaalse tõmbejõu sõltuvus rippest kerimise hetkel

IEEE Standardi 524-2016 järgi on veel üheks soovitusel võtta tõmbejõuks 10% õhuliinijuhtme katkekoormusest, mis ACSR 242/32 juhtmel on 84 890 N. M8 – M20 sektsioonis on arvutuste järgi tõmbejõuks 8983 N, mis moodustab juhtme katkekoormusest ligikaudu 10,6%. Kuna antud liinis puuduvad kandemastides nurgad ja kandekinnituste kõrguste vahed, võib antud tõmbekoormused vastavaks lugeda.

Tingimustes, kus on tarvilik õhuliinijuhet kerida kõrgemate ripetega, on soovituslik kasutada ajutisi struktuure juhtmekinnitusteks, näiteks kraana noole otsa kinnitatud juhtmerullikud, mis tõstavad rulliku kõrgust keset visangut ja suuremat tõmbekoormust juhtme kerimiseks ankrusisangusse ei rakendu. [21]

4.3.2 Mehhanismide valik ja paigutus

Pingutusmeetodi kasutamisel õhuliinijuhtme paigaldamiseks on vaja kolme peamist mehhanismi: vints, leevendi ja juhtmepukk. Käesoleva töö 3. peatükis kirjeldati nimetatud masinate valimiskriteeriume ja ühtlasi toodi välja masinates rakenduvad maksimaalsed tõmbed, mis reeglina ei ületa 50% õhuliinijuhtme lõplikest tõmbekoormustest viseerimisel. Vastavalt tabelile 4.5 on vaatluse all oleva liini maksimaalne tõmbekoormus -20 °C tingimustes ca 25 kN, seega peaksid mehhanismid olema suutelised õhuliinijuhet paigaldada vähemalt maksimaalse tõmbejõuga 12,5 kN. Nimetatatud tõmbejõud on liinipaigalduse mehhanismidele üsnagi kohased ja sellele vastavad tänapäeva peamised kerimismasinad.

Käesolevas töös valis autor õhuliini paigaldusmehhanismideks ettevõtte Tesmec S.p.A tooteseeriad. Tegemist on 1951. aastal loodud Itaalia ettevõttega, mis on spetsialiseerunud kõrgepingeliinide mehhanismide ja abitarvikute projekteerimisele, tootmisele ja varustamisele. Töö autori poolt valitud tooteseeriad tuginevad varasemastele kogemustele ning on käesolevas töös kasutatud vaid näidiste kujutamiseks ja ülevaate andmiseks. Nende valimisel lähtub autor ettevõtte viimasest tootekataloogist, kus on teada, et kõik Tesmec S.p.A tooted vastavad IEEE standardis 524-2016 toodud nõuetele ja soovitudele kerimismasinate valikul [20].

Vints (puller)

Modelleeritud õhuliini tõmbejõu mehhanismiks on sobilik kasutada Tesmeci hüdraulilist vintsi ARS403 (joonis 4.5) [20].



Joonis 4.5 Hüdrauliline vints ARS403 [20]

Valitud vintsi karakteristikud on toodud tabelis 4.6.

Tabel 4.6. Vintsi ARS403 karakteristikud [20]

Maksimaalne tõmbejõud	35 kN
Kiirus maksimaalsel tõmbejõul	1,2 km/h
Maksimaalne tõmbekiirus	3,6 km/h
Tõmbejõud maksimaalsel kiirusel	12 kN
Mass	980 kg
Diiselmootori võimsus	25 kW

Soovitatud tõmbemehhanismi eelisteks on lisaks mehhanismi kaal ja selle transpordiviis, mis mõjutavad otseselt juhtmekerimise protsessi, kus pärast igit ankrumisangut on tarvilik masinaid liigutada.

Leevendi (*tensioner*)

Leevendi valimisel lähtume juba valitud vintsi karakteristikutest. Leevendi tõmbejõud on soovituslik valida vintsist pisut kõrgem, et tagada rippe kontroll igal juhtuval tõmbekoormusel. Sellest lähtuvalt on sobilik masin Tesmec'i leevendi FRS403 (joonis 4.6.) [20].



Joonis 4.6. Leevendi FRS403 [20]

Valitud leevendi karakteristikud on esitatud tabelis 4.7.

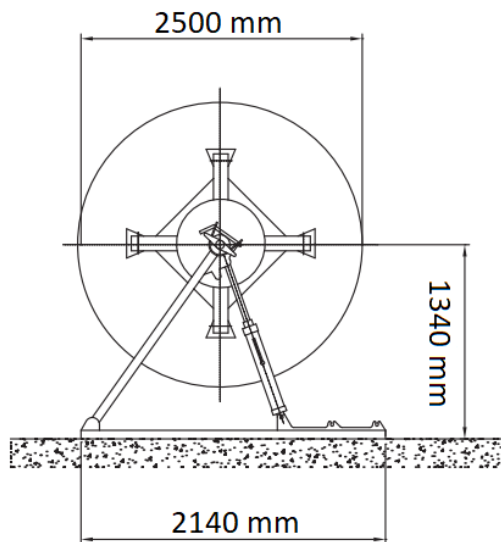
Tabel 4.7 Leevendi FRS403 karakteristikud [20]

Maksimaalne tõmbejõud	40 kN
Maksimaalne kiirus	5 km/h
Rulliku diameeter	1500 mm
Maksimaalne juhtmediameeter	34 mm
Mass	2300 kg

Uus õhuliinijuhe peab pingutusmeetodi kasutamisel asetsema juhtmepukil, mis on hüdrauliliselt ühendatud leevendiga, kust saab kontrollida juhtmepuki mehhaanilist pidurit, et tagada korrektne juhtme järeleandmine. Modelleeritud õhuliinile on projekteeritud faasijuht ACSR 242/39, mis standartsetel tarnetigimustel paigaldatakse tootjatehases K20 trumlitele, mille karakteristikud on [24]:

- Välimine diameeter 2000 mm
- Sisemine diameeter 1300 mm
- Sisemine laius 1000 mm
- Välimine laius 1188 mm

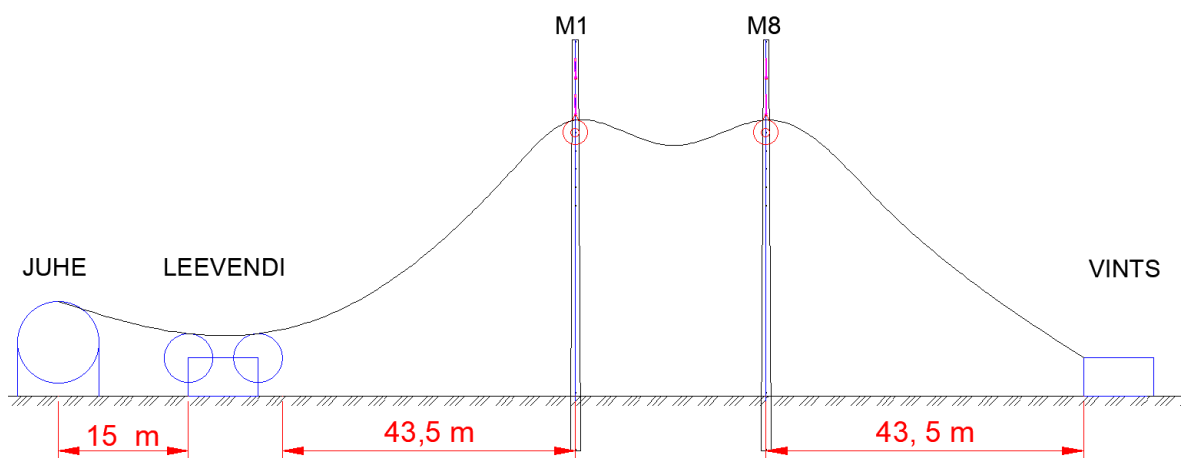
Nimetatud mõõtmetele peab vastama juhtmepukk. Tesmec'i seeria CVI600 juhtmepuki mõõtmed on toodud joonisel 4.7 [20].



Joonis 4.7. Juhtmepukk CUI600 [20]

Valitud juhtmepukk on sobilik K20 trumlil oleva ACSR 242/39 juhtme kerimiseks.

Käesolevas peatükis välja toodud mehhanismide paigaldus peab olema teostatud vastavalt õhuliinimastide ja kandekinnituste koormustele. Üldine praktika seadmete kauguse valiku suhtes on 3:1, kus ühele vertikaalsele vahekaugusele vastab 3 horisontaalset pikkust. Nimetatud lähenemisviisi soovitatakse samuti IEEE Standardis 524-2016, see tagab 20 kraadise juhtme sisenemisnurga esimesse kinnituspunkti. Ideaalsetes tingimustes on soovituslik asetada seadmed rullikuga samale joonele. Õigete meetmete kasutamine vähendab vertikaalseid koormuseid õhuliini mastile ning esimesele juhtmerullikule. Juhtmepukk on soovitatav asetada 15 – 25 m leevendi taha. Kokkuvõttev joonis mehhanismide positioneerimise kohta ankrusisangu M1 – M8 näitel on joonisel 4.8.



Joonis 4.8 Ankrusisangu M1 – M8 masinate positioneerimine alumiste juhtmete kerimisel

4.3.3 Juhtmerullikute valik ja arvutus

Juhtmerulliku arvutuse teostamine annab võimaluse hinnata kasutatava plokiratta ning masti vastavust ja masinate positsioneerimist, kuna koormuste vähendamiseks on võimalik kerimismasinaid liigutada. Järgnevalt arvutatakse rullikule avalduv koormus M8 – M20 ankruvisangu näitel, kuna selles lõigus on tõmbekoormus kõige suurem.

Juhtme nurk F° kerimismehhanismist maapinnini (valem 3.3):

$$F = \arctan\left(\frac{14,5}{43,5}\right) = 18,26^\circ$$

Juhtme nurk G° rulliku horisontaalprojektsiooniga (valem 3.4):

$$G = \arctan\left(\frac{0 + 4 \cdot 9,5}{250}\right) = 8,64^\circ$$

Rullikule avalduv vertikaalne koormus (valem 3.5):

$$R_V = 2 \cdot 8983 \cdot \sin\left(\frac{18,26 + 8,64}{2}\right) = 2 \cdot 8983 \cdot 0,45 = 8084,7 \text{ N}$$

Kuna masinad paigaldatakse juhtmerullikuga samale joonele, ei avaldu rullikule horisontaalkoormust:

$$R_H = 0$$

Maksimaalne koormus juhtmerullikule (valem 3.6):

$$R_{MAX} = \sqrt{8084,7^2 + 0^2} = 8084,7 \text{ N}$$

Eelnevalt kirjeldatud arvutuskäiku kasutatakse mastikoormuste arvestamisel. Ankrumastist – ankrumasti kerides asetseb esimene juhtmeratas ankrumasti traaversil, mis on reeglina mõeldud tõmbekoormuste vastuvõtmiseks. Juhtme kerimisel saab arvutuste järgi teha kindlaks vertikaalse koormuse, mille vastav traavers peab vastu võtma. Lisaks saab arvutuskäigus kinnitust

mehhanismide asetsemise tähtsus – mida suurem nurk jäetakse juhtme ja maapinna vahele, seda suuremaks lähevad vertikaalsed koormused masti traaversile ja juhtmerattale.

Teostades rulliku valikut lähtuvalt paigaldatavast õhuliinijuhtmest, mis koosneb kahest alumiiniumkihist, on soovituslik võtta vastavalt tabelile 3.2 rattasoone minimaalseks raadiuseks 11,99 mm ning maksimaalseks 24 mm, kus soone kõrgus on 27,25 mm. Näitena võtame kasutusele vastavate karakteristikutega juhtmeratta:

- Juhtmesoone diameeter	48 mm
- Ratta sisemine diameeter	350 mm
- Ratta välimine diameeter	440 mm
- Töökoormus	20 kN
- Mass	9,7 kg

Andmete olemasolul vaatleme rulliku kandesurvet sõltuvalt selle diameetrist juhtme ACSR 242/39 ja valemi 3.7 näitel:

$$P = \frac{3 \cdot 8983}{350 \cdot 21,8} = 3,54 \text{ N/mm}^2$$

Välja arvatud survejõud mõjutab ennekõike juhett, mis võib saada liigse koormuse all kahjustada. Suurim oht on alumiiniumkiudude deformeerimine või nende lahti harutamine liigse surve all. Lisaks kulub suurel koormusel liiniratta soon. IEEE 524-2016 standardi järgi on soovitatav surve juhtmerullikule 3,44 – 4,82 N/mm², mis on käesolevas arvutuses tagatud. Olukordades, kus koormus on liiga suur, tuleb valida suurema diameetriga juhtmerullik, kuna selle suurendamisel koormus väheneb.

4.3.4 Piloottrossi valik ja arvutus

Käesoleva töö peatüki 3.2.2 järgi on soovituslik kasutada trossi, mille katkekoormus on kolm korda suurem planeeritavast kerimisjõust. Antud projekti puhul on selleks ca 27 kN. Tabeli 3.1 järgi oleks sobilik kasutada 8 mm diameetriga FUX tüüpi trossi katkemiskoormusega 42,6 kN. Olemasoleva liini rekonstrueerimisel esineb praktikaid, kus on kasutatud piloottrossina olemasolevat juhett. Kui vaatleme käesolevat liini, millel on olemasolev õhuliinijuhe AS-70/11, siis selle kasutamist uue

juhtme kerimiseks ei ole soovitatav kasutada. Nimelt on AS-70/11 katkekoormus 24 kN, mis jääb soovituslikust katkekoormusest küll pisut väiksemaks, aga arvestades asjaolu, et antud juhe on pikemat aega kasutuses olnud, on keeruline hinnata selle seisukorda ning sobivust.

Olemasolev juhe sobib piloottrossi paigaldamiseks, kuna valitud trossi kaal on 0,22 kg/m, on selle tõmbejõud M8-M20 ankrusisangu näitel 826 N, ligikaudu kümme korda väiksem ACSR 242/39 kerimiseks vajaminevast jõust.

4.4 Paigaldusprotsess

Õhuliinijuhtme paigaldamine algab olukorras, kus tõmbamiseks kasutatav piloottross on mõlemast otsast maandatud. Selleks kasutatakse läbijooksvaid maanduseid, mis paigaldatakse esimese masti ja leevendi vahele ning viimase masti ja vintsi vahele.

Kui ankrusisangus on piloottross installeeritud, ühendatakse see paigaldatava juhtmega kasutades tõmbejõule vastavat pööritsat. Pööritsa mõõtmed ja vastupidavus peab olema selline, et see läbiks rulliku sooned ohutult ja seda kahjustamata.

Juhtme ja piloottrossi ühendamiseks kasutatakse veosukka, mis peab vastama keritava juhtme diameetrile ja kerimisel rakendavale tõmbejõule. Lisaks peavad need olema piisavalt väikesed, et läbida juhtmerullikuid kahjustumata. Veosuka otsad tuleb kinnitada soovitavalt terasest kaablisidemega, vältimaks ohtu selle lahti hargnemisele. Suka avatud ots on soovituslik kinnitada kahe sidemega ja katta isoleerteibiga.

Juhtmekerimiseks kasutatav kiirus on oluline faktor sujuva paigalduse tagamiseks. Kogemuslikult on saavutatud sujuv paigaldus kiirustega 5-8 km/h. Kõrgemate kiiruste kasutamisel kasvab potentsiaalne oht juhtme vigastamiseks või katkemiseks rikete olukorras.

Õhuliinijuhtme maksimaalne tõmbejõud ei tohiks ületada vajaminevat jõudu, milleks on õhkvahepike tagamine ristmeväljades. Ankrusisangutes, kus ristmeväljad puuduvad, tuleks õhuliinijuhtme ripe kerimise hetkel hoida võimalikult maalgidal, kuna sellega vähendatakse kerimiseks kasutatavat jõudu.

Juhtmepuki pidurdusjõud on soovituslik hoida alla 4,5 kN, kuna suurema jõuga pidurdades on oht juhete alumistes kihtides vigastada. Üleliigne pidurdusjõud võib:

- Deformeerida juhtmepuki kinnituskohti
- Kriimustada või kahjustada juhtmekiudusid

- Purustada juhtmetrumli

Kui keritava juhtme ots on jõudnud vintsini, kinnitatakse see tavaliselt lõpumastile kasutades selleks ettenähtud ankruketti. Pärast seda saab võimalikuks juhtme viseerimine, kus üks juhtmeots on fikseeritud mastil ning teisest otsast on võimalik juhet pingutada, kuniks see saavutab paigalduspinge ning vajaliku rippe. Kerimisprotsessid OPGW ning trossidele on samad, nagu õhuliinijuhtme puhul, aga kerimisjõud väiksemad.

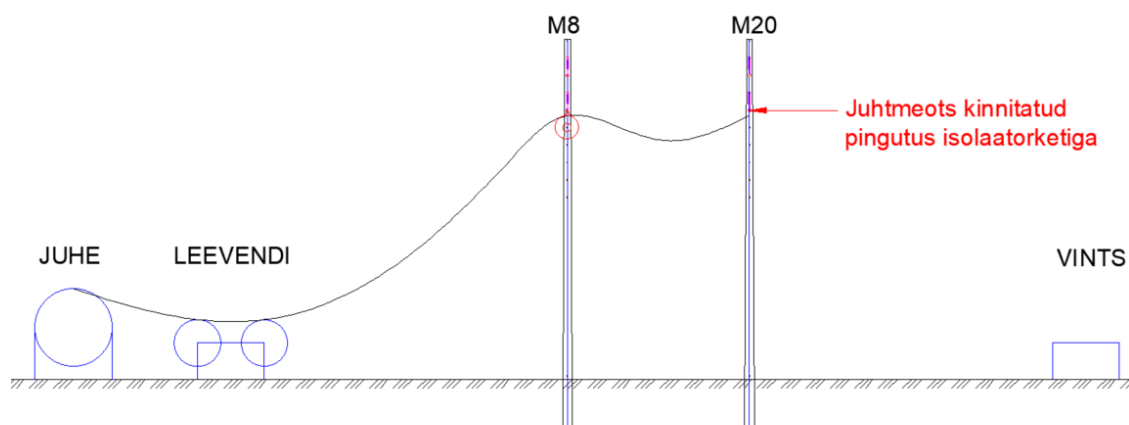
4.4.1 Juhtmete viseerimine

Õhuliinijuhtmete viseerimisel läheb vaja spetsiaalseid tööriistu, mis olenevad valitud viseerimismeetodist. Nimetatud abivahenditeks on raadiosaatjad, juhtme termomeetrid, rippe platvormid ja sihtmärgid, käsivintsid, dünamomeetrid, mõõdulindid. Kerimise sektsioon ei tohiks ületada 7 km või 20 visangut, mis teeb juhtme viseerimise oluliselt keerulisemaks.

Juhtmete viseerimiseks on kasutusel 3 erinevat meetodit:

1) Rippemeetod (*transit method*) [19]

Nimetatud töövõtte on enim levinud meetodiks, kuna seda hinnatakse kõige täpsemaks. Rippemeetod kujutab endas juhtme paigaldustabelile vastava rippe mõõtmist ühes visangus. Tavapäraselt valitakse selleks ankrumisangu kõige pikem visang, et tagada nõuetele vastav gabariit kõigis teistes visangutes. Rippemeetodil viseerimisel on ankrumisangu üks juhtmeots kinnitatud ankruketiga masti külge, ning rippe muutmine toimub pingsuse suurendamisega vabas otsas (joonis4.9).

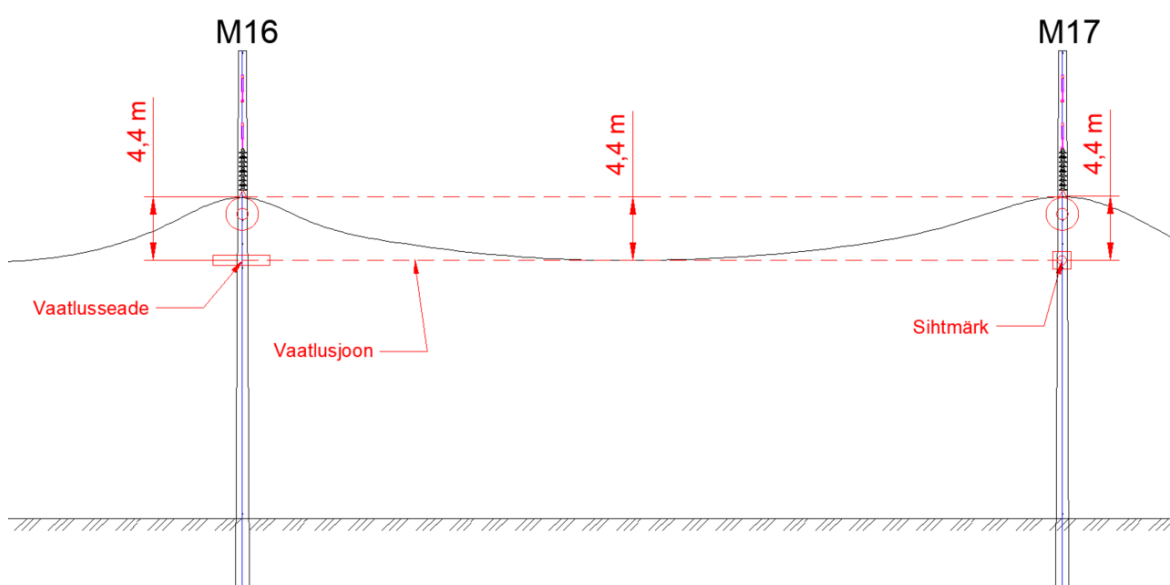


Joonis 4.9. Ankrumisangu põhimõtteskeem enne viseerimist

Ripet vaadeldakse kogu viseerimisprotsessi vältel. Käesolevas peatükis käsitletud õhuliini näitel vaatleme M8 – M20 sektsiooni viseerimist rippemeetodil. Lähteandmed viseerimiseks:

- Sektsiooni pikim visang on 260m (M16-M17)
- Õhuliini viseeritakse välistemperatuuril 15 °C
- Vastavalt tabelile 4.5 on ankrusisangu M8 – M20 taandatud visangu ripe 15 °C temperatuuri korral 4,4 m.

Visangus M16 – M17 seatakse vastavatele mastidele ülesse vaatlusseade ja sihtmärk, mis asetatakse otsitava rippe kõrgusele. Nimetatud protsessis peavad juhtmerullikud olema asetatud liinilõigu isolaatorkettidele (joonis 4.10).



Joonis 4.10. Ankrusisangu M8 – M20 viseerimine rippemeetodil

2) Dünamomeetri meetod (*dynamometer method*) [19]

Dünamomeetri meetodi kasutamisel asetatakse see pingutusmehhanismi ja õhuliinijuhtme vahele. Kasutatav dünamomeeter peab olema väga täpselt kalibreeritud, et tagada korrektne tulemus juhtmete viseerimisel. Maksimaalse tõmbejõu arvutuses suureneb tõmbejõud juhtmerullikute ebaefektiivsuse tõttu, mis võib samuti mõjutada dünamomeetri meetodi viseerimise täpsust (nimetatud ebaefektiivsuse tegureid on keeruline hinnata). Seeläbi võib anda hinnangu, et dünamomeetri kasutamine õhuliinide viseerimiseks võiks olla aktsepteeritav väga väikeste

ankruseksioonide korral ja pigem võiks täita funktsiooni teiste meetodite kontrollimiseks. Ideaalne kasutus antud meetodile oleks rakendada seda koos rippmeetodiga.

3) Lööklainemeetod (*stopwatch method*) [19]

Lööklainemeetod on kõige kiirem rippekontrollimeetod. Nimetatud töövõtte kujutab endas stabiilse õhuliinijuhtme mehhaanilist raputust ja sellele järgnevate lööklainete lugemist kindla ajaperioodi vältel. Tavapraktikas saavutatakse täpne viseerimisjõud 3-5 lööklaine lugemisel. Sellist meetodit võib kasutada väiksemate õhuliinijuhtmete ja lühikeste visangute korral, kuna kandeketid neelavad osaliselt lööklaine energiat, mis muudab lainete lugemise keerulisemaks.

Lööklainemeetodi arvutus avaldub [19]:

$$t = \sqrt{\frac{D \cdot N^2}{0,306698}} \quad (4.2)$$

kus t – aeg N -da lööklaine järel,
 D – riipe, m,
 N – lööklainete arv.

Joonise 4.10. näitel saab kolme lööklainega vajamineva aja t leida:

$$t = \sqrt{\frac{4,4 \cdot 3^2}{0,306698}} = 11,36 \text{ s}$$

Arvutatud on aeg, mis kulub kolmele lööklainele ühes visangus 4,4m riipe olemasolul. Töömaal näeb antud meetod joonise 4.10 näitel välja masti M16 isolaatorketilt juheta korra raputades. Mõõtes aega, mis kulub kolme lööklaine tagasijõudmiseks, saab hinnata sobiva riipe olemasolu. Kui tulemus klapi arvutatud ajaga, saab visangu riipe õigeks lugeda.

Nimetatud meetodit praktikas väga palju kasutatud ei ole, ning huvitav on ka asjaolu, et see ei sõltu visangu pikkusest ega juhtme läbimõõdust.

KOKKUVÕTE

Töö esimeses peatükis on vaadeldud õhuliini konstruktsiooni ja seal kasutatavaid materjale. Õhuliini materjalide valiku tegemisel tuleb tagada nende vastavus standarditele ja liinil esinevatele koormustele. Valiku tegemisel võib lisaks hinnata nende paigaldamise lihtsust ning kättesaadavust, kuna sellest oleneb hilisem hooldustööde teostus ja rikete likvideerimise kiirus.

Teises peatükis keskendus autor õhuliinijuhtmete projekteerimise meetodikale, kus peatüki lõplikuks tulemiks oli juhtmete paigaldustabelite koostamine. Peatükis analüüsiti kahte erinevat rippe arvutamise meetodit, millest järeldus, et juhtme rippe arvutus aheljoone meetodil annab täpsema tulemuse. Teostati arvutused juhtmete pingsusele erinevatel välistemperatuuridel ja võrreldi ACSR 152/25 juhtme rippeid erinevatel baaspingetel. Juhtmete baaspinge valik peab olema hästi põhjendatud, kuna antud lähtepingega on võimalik juhtmete ripet oluliselt mõjutada.

Töö kolmandas peatükis käsitleti õhuliinijuhtmete paigaldamisele esitatavaid nõudeid ja meetodeid. Autori hinnangul tuleks õhuliini paigaldamisel kasutada ainult pingutusmeetodit, kus õhuliinijuhe maad ei puuduta ja võimaldatakse kerimisprotsessis hoida töös ristuvaid õhuliine kui ka ristuvaid maanteid. Enne ehitustöödega alustamist tuleks juhtme paigaldajal teostada peatükis välja toodud arvutused vajaliku tõmbepingte selgitamiseks ja kasutatavate mehhanismide hindamiseks. Juhtmerullikud omavad väga suurt tähtsust kerimistöõde kvaliteedis, kuna mõjutavad otseselt nii maksimaalset tõmbepinget kui ka survet juhtmele.

Töö neljandas peatükis rakendas autor eelnevates peatükkides toodud meetodikat modelleeritud õhuliiniprojektil. Peatükis teostati arvutused liinile, kus üheks tingimuseks oli jätta talitlusse olemasolevad õhuliinimastid. Nimetatud projektidele juhtmete projekteerimise peamiseks takistuseks saab nõuetekohase gabariidi tagamine, mille parandamiseks on võrgu omanikul mitmeid võimalusi:

- Vahetada välja olemasolevaid maste (suurendab liini maksumust).
- Projekteerida väiksema ristlõikega faasijuht (vähendab läbilaskevõimet).
- Gabariidiprobleemiga visangutesse lisada üksikuid maste (suurendab maksumust).

Peatüki teises pooles arvutati modelleritud õhuliinile tõmbekoormused ja valiti sellest lähtuvalt sobilikud paigaldamise mehhanismid.

Käesolevas töös selgitatud meetodid õhuliinijuhtmete arvutamiseks ning paigaldamiseks on tarvilikud liiniehitust teostavatele ettevõtetele, et paremini mõista õhuliinijuhtme kontseptsiooni nii projekteerimise kui ka ehitamise etapis. Töö 3. ja 4. peatükis teostatud arvutused võiksid leida

rakendust ehitustöödele eelnevas analüüsis, riskide hindamisel ning mehhanismide valikul, et tagada juhtmete korrektne ja kvaliteetne paigaldus. Tegemist on uuendusliku lähenemisega juhtmete paigaldamisele, mis võiks vähendada tõenäosust projektide ebasoodsaks kulgemiseks. Lisaks eelnevale on töös saadud tulemused kasulikud võrgu omanikele, et enne ehitustegevusega alustamist uurida kavandatava õhuliini paigaldusprotsessi ning teostada järelpärimisi töövõtja poolt valitud paigaldusmeetoditele ning valitud mehhanismidele. IEEE standard 524-2016 ei keela otseselt mitte ühtegi paigaldusmeetodit, vaid annab soovitusel enim tõestust leidnud meetodite kasutamiseks. See suurendab töös välja toodud nüansside tähtsust, kuna puudub konkreetne standard, mis käsitleks juhtmete paigaldusele esitatavaid nõudeid.

Töös on käsitletud kolme erinevat viseerimismeetodit, mis kõik on IEEE standardi 524-2016 järgi sobilikud juhtme paigaldamisel kasutamiseks. Töö autor on arvamisel, et korrektseks paigalduseks oleks kõige sobilikum rakendada rippemeetodit ning kontrollida seda dünamomeetri meetodi põhimõtetega, et saada kõige täpsem tulemus montaažitabelis toodule. Lööklaine meetod tõstatab palju küsimusi, kuna nimetatud töövõtte ei olene juhtme parameetritest ega visangu pikkustest. Küll aga oleks see meetod kõige kiiremaks ja efektiivsemaks lahenduseks juhtmete viseerimisel. Töö autor on arvamisel, et antud töövõtet võiks täpsemalt uurida nii reaalsete mõõtmistulemuste teostamisega ning sellele vastava analüüsi teostamisega.

SUMMARY

The first chapter of this thesis gives an overview of the concept of high-voltage line including the materials used in the construction. When selecting the materials for an overhead line project the compliance with the standards and line loads must be ensured. In addition, the ease of the installation and availability of materials must be concerned, as it determines the performance of maintenance works and fault elimination speed.

In the second chapter, the author focused on the overhead line design methods to calculate the installation tables for overhead conductors. In this chapter, two different sag calculations methods were analyzed, from which it was determined that calculating conductor sags using catenary constant equation is more precise than the parabolic equation. Also, calculations of conductor tension at different temperatures were performed for the ACSR 152/25 conductor. In these calculations two different base tensions were used, which showed the importance of base tension selection justification as it significantly effects the final sag of the conductor.

The third chapter of the thesis dealt with the requirements and methods for the installation of overhead power lines. According to the author, only the tension method should be used for stringing works, where the conductor does not touch the ground and makes it possible to keep crossing roads and other power lines in operation during the stringing period. Before construction the conductor installer should perform the calculations outlined in this chapter in order to determine the maximum pulling tension and evaluate the parameters for planned equipment. The selection of stringing sheaves has a direct effect on the maximum pulling tension and the bearing pressure of the conductor.

In the fourth chapter the author of this thesis modelled an overhead power line where the methods of previous chapters were applied. In this chapter calculations were performed for the line, where one of the criteria was not to change the tower locations or types in the existing line. The main effort for these projects is to ensure the required ground clearance of the conductor. There are different options for improving the ground clearance in these types of projects:

- Replace the existing towers (increases the cost of the project).
- Choose a conductor with a smaller cross section (reduces the capacity).
- Add individual towers to problematic spans (increases the cost of the project).

In the second part of this chapter conductor tension was calculated and suitable mechanisms for installation were selected.

The methods for calculating and installing overhead conductors explained in this thesis are necessary for the line construction companies to better understand the concept of an overhead line during the design and construction phases. The calculations performed in the 3. and 4. chapter of this thesis could find application in the pre-construction analysis, risk assessment and selection of equipment in order to ensure the correct and high-quality installation of the conductors. This would be an innovative approach to stringing works that would reduce the likelihood of project failure. In addition to the above, the results obtained in this thesis are useful for the grid owners to inspect the installation methods and equipment chosen by the contractor. IEEE Standard 524-2016 does not explicitly prohibit any installation methods but provides recommendations for most proven methods. This increases the importance of the aspects highlighted in this thesis, as there is no specific standard in Estonia for conductor installation.

This thesis also deals with three different sagging methods that are all suitable for conductor installation according to the IEEE Standard 524-2016. The author of this thesis recommends using the transit method for sagging procedures and to check the process using the dynamometer method in order to achieve the most accurate result. The stopwatch method raises many questions about its reliability as it does not depend on the conductor parameters or the span lengths. However, this method would be the fastest and most efficient solution for conductor sagging. The method would be more reliable once this technique is studied in more detail by performing real measurements and corresponding analysis.

KASUTATUD KIRJANDUS

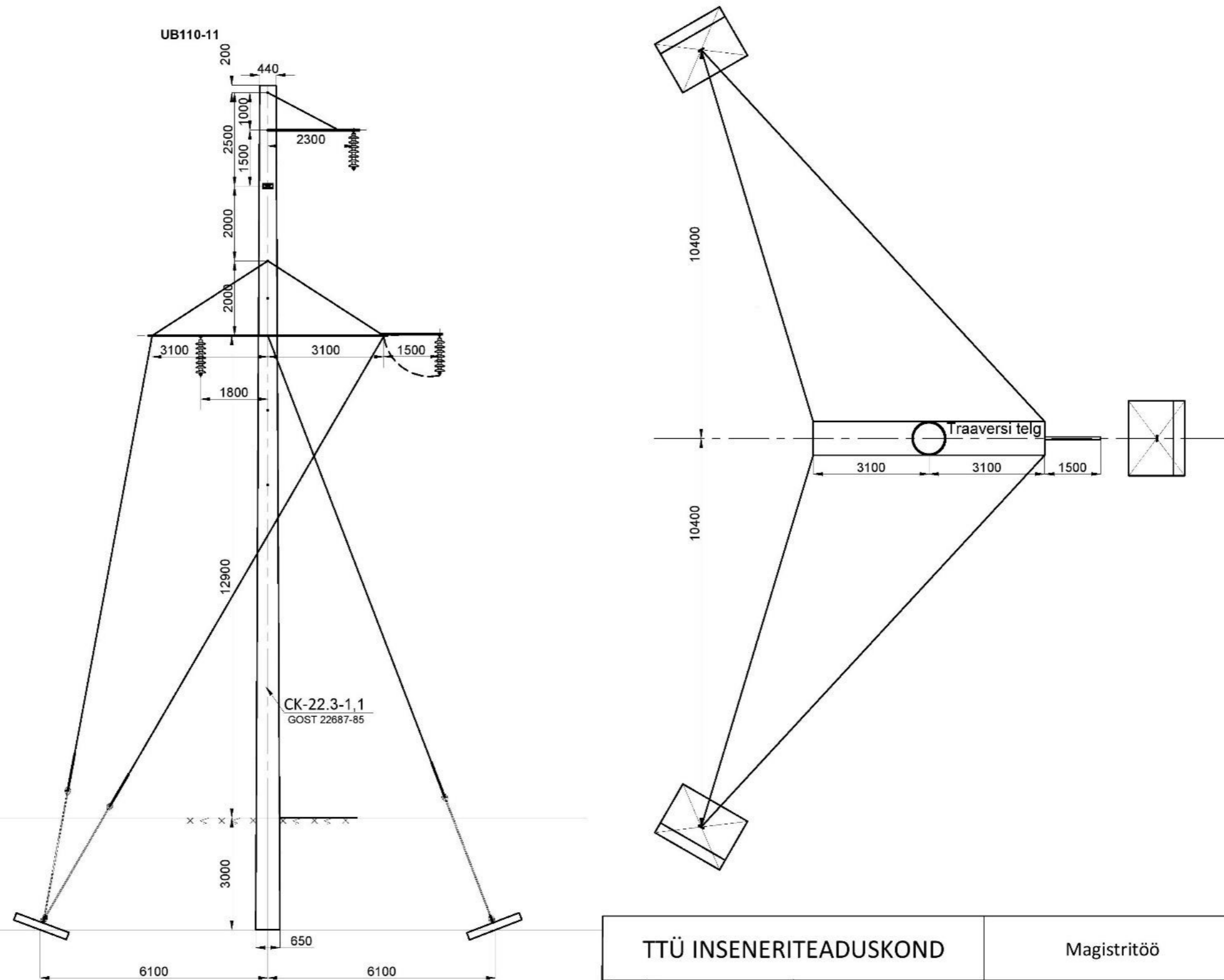
- [1] E. Tiigimägi, Elektrivõrgud, Tallinn, 1997.
- [2] Elektrilevi OÜ, „Tuultele avatud Sõrve poolsaar sai kindlama elektrivõrgu,“ [Võrgumaterjal].
Saadaval: <https://www.elektrilevi.ee/uudised/avaleht/-/newsv2/2019/08/23/tuultele-avatud-sorve-poolsaar-sai-kindlama-elektrivorgu>. [Kasutatud 22.04.2020].
- [3] Elektrilevi OÜ, „Droonivideo: Vaata, milline näeb välja Elektrilevi esimene 110 kV elektriliin!“, [Võrgumaterjal].
Saadaval: <https://www.elektrilevi.ee/et/uudised/-/newsv2/2017/12/15/droonivideo-vaata-milline-naeb-valja-elektrilevi-esimene-110-kv-elektriliin>. [Kasutatud 22.04.2020].
- [4] F. Kiessling, P. Nefzger, J. F. Nolasco ja U. Kaintzyk, Overhead Power Lines, Johannesburg, 2002.
- [5] „Eleringile kuuluvad liinid,“ Elering AS, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://elering.ee/eleringile-kuuluvad-liinid#tab3>. [Kasutatud 02.04.2020].
- [6] „EU GIG - kõrgepinge isolaatorid - tooted ja tehased,“ EU GIG, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.gig-group.com/>. [Kasutatud 19.03.2020].
- [7] A. Zelitšenko ja B. Smirnov, Õhuliinide ehitus, eksploatatsioon ja remont, Tallinn, 1968.
- [8] Elering AS, „701 Projekteerimine,“ Elering AS, 2019.
- [9] S. R. Yadav ja R. Shukla, „Selection of Transmission Line Conductors Considering Power Loss,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://rakeshshukla.webs.com/documents/transmission%20line1.pdf>. [Kasutatud 13.04.2020].
- [10] C. R. Bayliss ja B. J. Hardy, Transmission and Distribution Electrical Engineering, 2011.
- [11] EVS-EN 50182:2002, Eesti Standardikeskus, 2002.
- [12] EMTA Conductor & Cable, „Aluminium Conductors Steel Reinforced,“ [Võrgumaterjal].
Saadaval: <https://electricalengineerresources.com/2018/01/02/complete-sag-tension-relationship-in-transmission-and-distribution-lines-concepts/#CREEP>. [Kasutatud 07.04.2020].

- [13] P. Raesaar, Õhuliinide projekteerimise küsimusi, 2010.
- [14] Southwire company, Overhead conductor manual 3rd edition, 2018.
- [15] R. E. Pinto, „State Change Equation,“ IEEE, 2012.
- [16] EVS-EN-50341-2-20:2018 ELEKTRIÕHULIINID VAHELDUVPINGEGA ÜLE 1KV Osa 2-20: Eesti siseriiklikud erinõuded (SEN), Eesti Standardikesus, 2018.
- [17] Hydro-Québec, „Power Transmission,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.hydroquebec.com/learning/transport/construction-ligne.html#step2>. [Kasutatud 22.03.2020].
- [18] L. L. Grigsby, Electric Power Generation, Transmission, and Distribution, 2007.
- [19] IEEE Std 524-2016 Guide for the Installation of Overhead Transmission Line Conductors, New York: IEEE STANDARDS ASSOCIATION, 2016.
- [20] Condux Tesmec Inc., „Stringing Equipment and Accessories,“ 2020. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://conduxtesmec.com/download/condux-tesmec-catalog-2020-2021/?wpdmdl=1029&masterkey=5d8289ba8aa9e>. [Kasutatud 25.03.2020].
- [21] General Cable, „Overhead Conductor Installation Guide,“ 2014. [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://cdn.generalcable.com/getmedia/a535a5f6-535f-4347-8e0c-74a13146835d/46337_TransPowrGuide_LR. [Kasutatud 25.03.2020].
- [22] ЛЭПРФ, „ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫЕ ОПОРЫ ВЛ,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.leprf.ru/catalog/gbilep/>. [Kasutatud 26.04.2020].
- [23] EVS-EN-50341-1:2013 ELEKTRIÕHULIINID VAHELDUVPINGEGA ÜLE 1KV Osa 1: Üldnõuded, Eesti standardikeskus, 2013.
- [24] Prysmian Group, „Product catalogue,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: http://media.drakakeila.ee/2016/01/Draka_Catalogue_EN.pdf. [Kasutatud 3 05 2020].
- [25] Elering AS, „EESTI ELEKTRISÜSTEEMI VARUSTUSKINDLUSE ARUANNE 2019,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://elering.ee/sites/default/files/public/Infokeskus/elering_vka_2019_web_final2.pdf. [Kasutatud 22.04.2020].

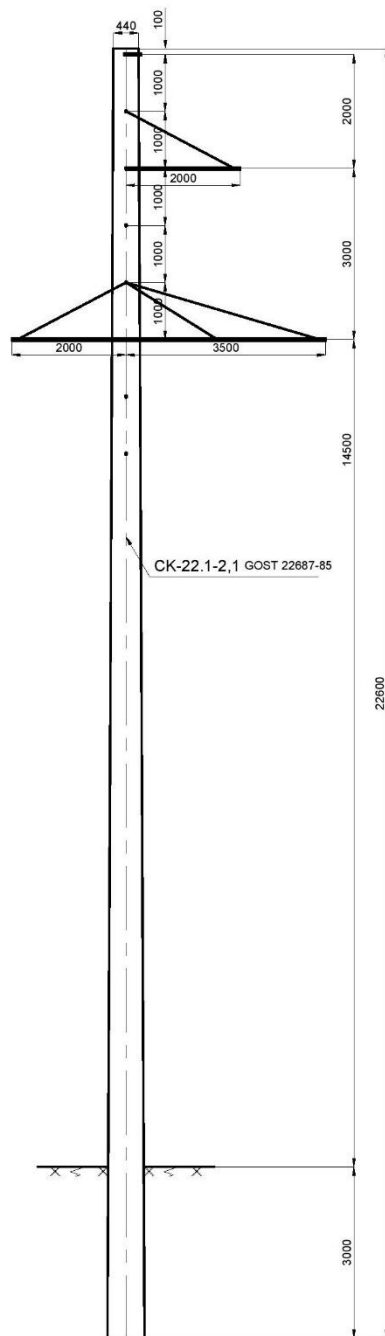
LISAD

Lisa 1 Nurga-ankrumasti UB110-11 üldvaade

Lisa 2 Kandemasti PB110-13 üldvaade



TTÜ INSENERITEADUSKOND		Magistritöö	Leht/Lehti: 1/1
Koostaja: Kaspar Roon	20.05.2020	Nurga-ankrumasti UB110-11 üldvaade	
Juhendaja: Jako Kilter	20.05.2020		
Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut		Õhuliinijuhtmete projekteerimise- ja paigaldamise meetodid 35 - 110 kV võrgus	



TTÜ INSENERITEADUSKOND		Magistritöö	Leht/Lehti: 1/1
Koostaja: Kaspar Roon	20.05.2020	Kandemasti PB110-13 üldvaade	
Juhendaja: Jako Kilter	20.05.2020		
Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut		Õhuliinijuhtmete projekteerimise- ja paigaldamise meetodid 35 - 110 kV võrgus	