



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

**VANANENUD TERASALUMIINIUMJUHTMETE
ELEKTRILISED JA SOOJUSLIKUD OMADUSED**

ELECTRICAL AND THERMAL PROPERTIES OF AGED ACSR TYPE OVERHEAD
LINE CONDUCTORS

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Ivar Kiitam

Üliõpilaskood: 153216AAVM

Juhendaja: Paul Taklaja

Tallinn, 2017.a.

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

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

“.....” 201...

Autor:

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

“.....” 201...

Juhendaja:

Kaitsmisele lubatud

“.....” 201...

Kaitsmiskomisjoni esimees

Lõputöö kokkuvõte

<i>Autor:</i> Ivar Kiitam	<i>Lõputöö liik:</i> Magistritöö
<i>Töö pealkiri:</i> Vananenud terasalumiiniumjuhtmete elektrilised ja soojuslikud omadused	
<i>Kuupäev:</i> 25.05.2017	79 lk
<i>Ülikool:</i> Tallinna Tehnikaülikool	
<i>Teaduskond:</i> Inseneriteaduskond	
<i>Instituut:</i> Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut	
<i>Töö juhendaja:</i> vanemteadur Paul Taklaja	
<i>Sisu kirjeldus:</i> <p>Kõrgepingeliinides kasutatakse laialdaselt terasalumiiniumjuhtmeid, mille omadused ajapikku muutuvad. Selle tõttu võivad elektrivõrkudes esineda probleemid liinijuhtmete rippega, mehaanilise tugevusega ja elektrilise koormatavusega. Vananenud õhuliinijuhtmete teatavad parameetrid on vaja määrata, et kontrollida nende sobivust edasiseks ekspluatatsiooniks ja hinnata vajadust liinide rekonstrueerimiseks.</p> <p>Antud töös käsitletakse peamiselt terasalumiiniumjuhtmete soojusliku seisundi ja elektritakistuse seisukohast olulisi omadusi ning juhtmematerjalide vananemise mehhanisme ja tagajärgi. Töös on esitatud ülevaade terasalumiiniumjuhtmete ehituslikest iseärasustest, lõõmutus- ja korrosiooniprotsessidest ja vananenud juhtmetele omastest koroonalahendusi iseloomustavatest parameetritest. Selgitatud on juhtme töötemperatuuri mõjutavaid faktoreid ja esitatud ülevaade juhtme soojuslikel arvutustel kasutatavatest meetodikatest.</p> <p>Füüsikalistest parameetritest on põhjalikumalt käsitletud õhuliinijuhtmete alumiinium- ja terastraatide soojusmahtuvust, vahelduvvoolutakistust ning juhtme pinna kiirguse absorptsiooni- ja emissioonitegurit. Nimetatud parameetrid määrati katseliste ja arvutuslike meetoditega Eesti põhivõrgu vananenud liinidelt kogutud õhuliinijuhtmete põhjal. Uuritud juhtmed AC-400 ja AC-120 pärinesid Eesti NSV perioodil ehitatud kõrgepingeliinidelt, mis olid töös olnud vastavalt 55 ja 39 aastat.</p> <p>Töö tulemusel selgus, et liinijuhtmete omadused ei erinenud oluliselt ootuspärastest. Leiti elektriliste ja soojuslike parameetrite väärtused, mida saab kasutada vananenud liinijuhtmetega seonduvate insenertehniliste arvutuste läbiviimisel.</p>	
<i>Märksõnad:</i> terasalumiiniumjuhe, vahelduvvoolutakistus, soojusmahtuvus, absorptsioonitegur, emissioonitegur, pinnakaredus, vananemine, koroon	

Summary of the Diploma Work

<i>Author:</i> Ivar Kiitam	<i>Kind of the work:</i> Magister Thesis
<i>Title:</i> Electrical and Thermal Properties of Aged ACSR Type Overhead Line Conductors	
<i>Date:</i> 25.05.2017	79 pages
<i>University:</i> Tallinn University of Technology	
<i>School:</i> School of Engineering	
<i>Department:</i> Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics	
<i>Tutor of the work:</i> senior researcher Paul Taklaja	
<p><i>Abstract:</i></p> <p>Steel reinforced aluminium conductors are widely used in high voltage overhead transmission lines. The properties of these conductors tend to change over time and may cause problems in the power grid concerning sag, mechanical strength and electric load ratings. Aged conductors should be tested to obtain values for key parameters, assess their suitability for continued service and determine the necessity for reconstruction of power lines.</p> <p>This work is mainly focused on conductor properties relevant to the thermal behaviour and electrical resistance of power line conductors as well as deterioration mechanisms and corresponding impact on conductor materials. An overview of the structural characteristics of ACSR, annealing and corrosion processes and corona parameters specific to aged conductors is presented. An explanation of factors affecting the operating temperature of the conductor and an overview of methods used in thermal calculations for conductors is included.</p> <p>Of the various parameters, heat capacity of both the aluminium and steel strands, AC resistance, radiation absorptivity and emissivity are examined more thoroughly. Values for these parameters are also determined based on samples of aged conductors gathered from power lines in the Estonian transmission grid. The studied conductors, branded AC-400 and AC-120, originate from high voltage lines constructed during the Soviet era and have been in service for 55 and 39 years, respectively.</p> <p>The results of calculations and experiments indicate no significant difference in obtained and expected parameter values. The values for electrical and thermal parameters for applying in engineering calculations concerning studied power line conductors are proposed.</p>	
<i>Key words:</i> ACSR conductor, AC resistance; heat capacity, absorptivity, emissivity, surface roughness, aging, corona.	

Sisukord

Lõputöö ülesanne.....	7
Teema põhjendus:	7
Töö eesmärk:.....	7
Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:.....	7
Lähteandmed:.....	8
Eessõna	9
Lühendite ja sümbolite loetelu	10
Sissejuhatus.....	14
1. Terasalumiiniumjuhe ACSR.....	17
1.1. Juhtme ehitus	17
1.2. Õhuliinide geomeetrised parameetrid.....	19
1.3. Juhtmematerjalide peamised füüsilised parameetrid.....	20
2. Terasalumiiniumjuhtmete vananemise mehhanismid ja tagajärjed.....	21
2.1. Lõõmutus	21
2.2. Metallurgiline roome	22
2.3. Juhtme pinna mustumine	23
2.4. Pinnakaredus ja koroona	25
2.5. Tsingikihi kulumine	27
2.6. Alumiiniumtraatide kulumine	28
3. Õhuliinijuhtmete soojuslikud protsessid.....	30
3.1. Soojuslik tasakaal.....	30
3.1.1 Juhtivuslikud soojuskaod.....	31
3.1.2 Magnetilised soojuskaod.....	31
3.1.3 Päikesekiirguse neeldumine	31
3.1.4 Konvektiivne soojuskadu.....	32
3.1.5 CIGRÉ konveksiooni arvutusmetoodika.....	32
3.1.6 IEEE konveksiooni arvutusmetoodika.....	35
3.1.7 Kiirguslik soojuskadu.....	36
3.1.8 Soojusülekanne koroonalahendustest ja aurumisest	36
3.2. Soojuslik siirdeprotsess.....	36
3.3. Adiabaatiline soojenemine.....	37
4. Vananenud õhuliinijuhtmete soojusmahtuvus	38
4.1. Juhtmete üldiseloomustus	38
4.2. Soojusmahtuvuse määramise metoodika	39
4.3. Visuaalne analüüs	40
4.4. Soojusmahtuvuse arvutused.....	41
4.5. Tsingikihi mõju juhtme soojusmahtuvusele.....	43
4.6. Määrde mõju juhtme soojusmahtuvusele.....	44
4.7. Erisoojuse temperatuurisõltuvuse mõju juhtme soojusmahtuvusele.....	44
5. Vananenud juhtmete absorptsiooni- ja emissiooniteguri mõõtmine.....	46
5.1. Katseseade.....	47
5.2. Katse protseduur	51
5.3. Katse tulemused	53
5.4. Katsekehade soojenemise ja jahtumise võrdlus	56

5.5.	Absorptsiooni- ja emissiooniteguri arvutused.....	58
6.	Vananenud juhtmete vahelduvvoolutakistus.....	62
6.1.	Vahelduvvool ACSR õhuliinijuhtmetes.....	62
6.2.	Vananenud juhtmete alalisvoolutakistuse määramine	64
6.3.	Vahelduvvoolutakistuse ja alalisvoolutakistuse suhe	67
Kokkuvõte		71
Lisad		78
L.1 AC-400 alalisvoolutakistus		79

Lõputöö ülesanne

Lõputöö teema:	Vananenud terasalumiiniumjuhtmete elektrilised ja soojuslikud omadused
Üliõpilane:	Ivar Kiitam, 153216AAVM
Eriala:	elektroenergeetika
Lõputöö liik:	magistritöö
Lõputöö juhendaja:	Paul Taklaja
Lõputöö ülesande kehtivusaeg:	1 aasta
Lõputöö esitamise tähtaeg:	25.05.2017

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Instituudi juhataja (allkiri)

Teema põhjendus:

Suur osa Eesti põhivõrgu elektriliinidest on töös olnud mitukümmend aastat ja lähenevad oma tehnilise eluea lõpule. Selle tõttu on vaja uurida kuidas on muutunud liinijuhtmete füüsikalised omadused, et teha kindlaks kas nendega seotud insener-tehniliste arvutuste lähteandmed on õiged ja kuiõrd on suurenenud oht elektriliini mehaanilise rikke tekkimiseks. Samuti on vaja kindlaks teha kas liine on võimalik ripete vähendamiseks üle pingutada selliselt, et nõuded juhtme mehhaanilisele tugevusele on täidetud.

Lõputöös keskendutakse eelkõige liinijuhtme elektrilistele ja termilistele parameetritele. Antud töö annab ülevaate parameetrite muutumisest võrreldes esialgsete väärtustega. Töö tulemusena antakse soovitusel parameetrite muutmiseks arvutustes või nende seni teadaolevate väärtuste edasiseks kasutamiseks.

Töö eesmärk:

Töö eesmärgiks on uurida vananenud terasalumiinium-õhuliinijuhtmete füüsikalisi omadusi ja teha kindlaks nende hälbimine hetkel teadaolevatest ja kasutatavatest väärtustest.

Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

1. Selgitada välja vananenud õhuliinijuhtmete kiirguse absorptsiooni- ja emissioonitegur.

2. Selgitada välja vananenud õhuliinijuhtmete vahelduvvoolutakistus.
3. Selgitada välja vananenud õhuliinijuhtmete alumiiniumtraatide ja terastraatide soojusmahtuvus.
4. Seostada füüsilised parameetrid elektriliinide arvutustarkvaraga PLS-CADD.

Lähteandmed:

Töö teostamiseks vajalikud lähteandmed hangitakse asjakohasest kirjandusest, mille tuumiku moodustavad:

- Õhuliinijuhtmeid käsitlevad asjakohased IEEE, CIGRÉ, IEC jt erialaorganisatsioonide standardid ja juhendid
- Asjakohased konverentsi- ja teadusajakirjaartiklid
- Tarkvara PLS-CADD toimimist ja lähteandmeid selgitavad juhendmaterjalid
- Erialased raamatud
- Juhtmete parameetreid sisaldavad käsiraamatud ja kataloogid

Lisaks eelnevale kasutatakse TTÜ ja Elering AS-i koostööprojektide Lep15078 „Vananevate õhuliinijuhtmete füüsilised omadused“ ja Lep16105 „Vananevate juhtmete füüsilised omadused – II etapp“ raames valminud ja valmivaid aruandeid. Samuti hangitakse osa vajalikest lähteandmetest pikka aega töös olnud elektriliinidelt kogutud katsekehade teostatud katsete käigus.

Eessõna

Mõte kirjutada magistritöö õhuliinijuhtmete teemal arenes välja minu igapäevase töö käigus TTÜ elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudis. Olen põhitäitja TTÜ ja Elering AS-i koostööprojekti „Vananevate juhtmete füüsikalised omadused“, mille raames antud töö tulemusi rakendada saab. Uurimistöö on ajendatud asjaolust, et suur osa Eesti põhivõrgu taristust on lähenemas oma kavandatud eluea lõpule ja põhivõrgu haldajal on vaja teha põhjendatud otsuseid olemasolevate kõrgepingeliinide edasise kasutamise ja rekonstrueerimise kohta. Lõputööd juhendas projekti TTÜ-poolne vastutav täitja vanemteadur Paul Taklaja.

Töö käigus uurisin süvendatult õhuliinide erinevaid füüsikalisi parameetreid ja nende mõju liini talitlusele ning viisin läbi vastavad katsed Eesti kõrgepingeliinidelt kogutud katsekehadega. Katsed toimusid peamiselt TTÜ Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudi laborites. Töö koostamisel kasutasin mitmeid energeetikavaldkonnaga seotud väljaandeid, sealhulgas teadusartikleid, erialaseid käsiraamatuid, CIGRÉ publikatsioone ja IEEE standardeid.

Soovin tänada kogu projektmeeskonda koosseisus Priit Jürgenson, Priidu Peetsalu, Mart Saarna, Liisa Kurissoo, Hendrik Aava ja Sirli Sepper meeldiva koostöö ja heade näpunäidete eest, mis aitasid esile tõusnud küsimused kiiresti lahendada. Eriti suur tänu projekti juhile Paul Taklajale juhendamise ja seotud jõupingutuste eest. Pühendan kõigile, kes aitasid töö valmimisele kaasa, järgneva luuletuse:

Kui liin on longu jäänud, vana,

siis on teda mõõta vaja.

Võta vahelt jupp või kaks,

laborisse too üks sats.

Ivar Kiitam

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

Tallinna Tehnikaülikool

Lühendite ja sümbolite loetelu

$ACSR$	terasalumiiniumjuhe (<i>Aluminium Conductor Steel Reinforced</i>)
A_{Fe}	terastraatide summaarne ristlõikepindala
A_{Al}	alumiiniumtraatide summaarne ristlõikepindala
A_1	konvektiivse soojusülekanne tegur
A_2	konvektiivse soojusülekanne tegur
B_1	konvektiivse soojusülekanne tegur
B_2	konvektiivse soojusülekanne tegur
C	soojusmahtuvus
C_{Al}	alumiiniumtraatide soojusmahtuvus
C_{Fe}	terastraatide soojusmahtuvus
D	juhtme välisdiameeter
D_i	juhtme i -nda kihi keskmine diameeter
$E(\lambda; T)$	spektraalne kiiritustihedus
E_{max}	spektri kiiritustiheduse maksimum
E_{Σ}	summaarne kiiritustihedus
E_0^c	koroonasüttimise algväljatugevus juhtmel
E_0^s	koroonasüttimise algväljatugevus ideaalselt ümaral silindril
Gr	Grashof'i arv
I_{AC}	vahelduvvoolutugevus
I_{DC}	alalisvoolutugevus
J_{DC}	alalisvoolu tihedus
K_{mark}	konvektiivse soojusülekanne tuule suuna tegur
L_{Al}	alumiiniumtraadi suhteline tugevuskadu lõõmutusel
N_{Al}	alumiiniumtraatide arv juhtmes
N_{Fe}	terastraatide arv juhtmes
N_{ef}	mõjuv keerdude arv pikkusühiku kohta
N_i	traatide arv i -ndas kihis

Nu	Nusselt'i arv
Nu_δ	Nusselt'i arv tuule nurga δ korral
Pr	Prandtl'i arv
P_C	konvektiivse soojusülekanne võimsus
P_{Cf}	sundkonvektsiooni võimsus
P_{Cn}	loomuliku konvektsiooni võimsus
P_E	kiirgusemissiooni võimsus
P_i	koroonasoojendamise võimsus
P_J	voolu soojuskadude võimsus
P_M	magnetiliste kadude võimsus
$P_{R,net}$	kiirguslik netosoojusvoog
P_r	kiirgusliku soojuskao võimsus
P_r^*	korregeeritud kiirgusliku soojuskao võimsus
P_S	juhtme päikesekiirguse absorptsiooni võimsus
P_w	aurumisest põhjustatud soojuskao võimsus
R_{AC}	vahelduvvoolutakistus
R_{DC}	alalisvoolutakistus
Re	Reynolds'i arv
R_a	pinna keskmine karedus
R_f	juhtme pinna karedustegur
R_{i20}	traadi alalisvoolutakistus temperatuuril 20 °C
R_{j20}	juhtme alalisvoolutakistus temperatuuril 20 °C
R_{rms}	pinna ruutkeskmine karedus
R_1	traadi alalisvoolutakistus temperatuuril θ_1
R_2	traadi alalisvoolutakistus temperatuuril θ_2
T	absoluutne temperatuur
V	tuule kiirus
Y	elektriliini tööaastate arv

Z	punkti kõrgusnivoo nulljoone suhtes
c	valguse kiirus vaakumis
c_{Al}	alumiiniumi erisoojus
c_{Fe}	terase erisoojus
c_p	õhu isobaariline erisoojus
d_{Al}	alumiiniumtraadi diameeter
d_{Fe}	terastraadi diameeter
g	raskuskiirendus
h	Planck'i konstant
h_c	konvektiivse soojusülekande koefitsient
h_{Zn}	tsingikihi paksus terastraatidel
k_B	Boltzmann'i konstant
k_I	I katsekeha temperatuuri tõusu kiirus
k_{II}	II katsekeha temperatuuri tõusu kiirus
k_f	õhu soojusjuhtivus piirkihi temperatuuril
k_i	i -nda kihi traadi pikkustegur
k_p	konveksiooni parandustegur
m_P	Peek'i karedustegur
m_j	juhtme mass pikkusühiku kohta
m_{Al}	alumiiniumi mass juhtme pikkusühiku kohta
m_{Fe}	terase mass juhtme pikkusühiku kohta
m_1	konvektiivse soojusülekande tegur
m_2	konvektiivse soojusülekande tegur
n	konvektiivse soojusülekande tegur
ν_f	õhu kinemaatiline viskoossus
ΔR_m	magnetefektidest põhjustatud lisatakistus
$\Delta\theta$	juhtme ületemperatuur keskkonna temperatuuri suhtes
α	kiirgusabsorptsioonitegur

α_{DC}	alalisvoolutakistuse temperatuurisõltuvuse tegur
α_L	lineaarpaisumise temperatuuritegur
β	erisoojuse temperatuurisõltuvuse tegur
γ	faasinurk koguvoolu ja alumiiniumjuhtmetes indutseeritud pinge vahel
ε	kiirgusemissioonitegur
ε^*	korrigeeritud kiirgusemissioonitegur
θ_a	väliskeskkonna temperatuur
θ_f	juhtme ja õhu piirikihi temperatuur
θ_j	traadi temperatuur
θ_s	juhtme pinna temperatuur
θ_s^*	juhtme pinna korrigeeritud temperatuur
θ_1	traadi temperatuur külmas vees
θ_2	traadi temperatuur soojas vees
λ	elektromagnetkiirguse lainepikkus
λ_f	õhu soojusjuhtivus
λ_i	keerutuse sammu pikkus i -ndas kihis
μ	õhu dünaamiline viskoossus
μ_r	suhteline magnetiline läbitavus
μ_0	vaakumi magnetiline läbitavus
ρ	tihedus
ρ_r	suhteline õhutihedus
ρ_V	erisoojus ruumala järgi
ρ_{Zn}	tsingi tihedus
ρ_δ	absoluutne õhutihedus
ρ_{DC20}	alalisvoolu eritakistus temperatuuril 20 °C
σ	Stefan-Boltzmann'i konstant

Sissejuhatus

Oluline osa Eesti elektrisüsteemi põhivõrgu liinidest on ehitatud aastakümneid tagasi ja praeguseks on need olulisel määral amortiseerunud. Tekkinud on erinevad probleemid, mis takistavad elektrivõrgu laitmatut talitlemist. Liinijuhtmete ripped on suurenenud ja esineb kohti, kus nõuded minimaalsele maagabariidile on rikutud. Aastakümneid kestnud tuulevibratsiooni mõjul on mõnedel liinijuhtmetel paiknevad vibratsioonisummutid osaliselt või täielikult purunenud ning juhtmete traadid katkenud.

Kõrgepingeliinidele omase pika eksploatatsiooniperioodi jooksul esineb erinevaid keskkonnast tulenevaid looduslikke ja elektrisüsteemi talitlusest ning väärtalitlusest tulenevaid mõjutusi, mille koosmõjul halveneb õhuliinijuhtmete seisukord. Talvel võib teatavatel ilmastikutingimustel tekkida liinidel jääde, mis oma massiga põhjustab juhtmetes plastset deformatsiooni. Esinevad lühised, mis soojendavad juhtmeid liigselt ja tekitavad juhtme traatidele elektrikaare põlemise tagajärjel kahjustusi. Soovimatu on ka liini ülekoormus, mis tekitab püsivalt kõrge juhtme temperatuuri tõttu alumiiniumtraatide lõõmutust ning selle tagajärjena ka juhtmete mehhaanilise tugevuse vähenemist. Avatud elektrituru tingimustes on võimalused liinide koormust juhtida mõnevõrra piiratumad. Elektrivõrgus kujunevad võimsusvood välja lähtuvalt turuosaliste tootmise ja tarbimise võimsustest, mitte energiasüsteemi optimaalsest talitlusest, mistõttu tuleb põhivõrgu liine tihti koormata läbilaskevõime piirile lähedal.

Otsustamaks, kuidas kõige paremini olemasolevat võrgutaristu ressursi ära kasutada ja missuguseid rekonstruktsioone planeerida, on vaja täpsustavat informatsiooni võrgurajatiste seisukorra kohta. Huvipakkuv on teadmine, kas liinide rippe vähendamiseks ja maagabariidi viimiseks nõutud piiridesse on sobiv ja piisav meede liinijuhtmete täiendav mehhaaniline pingutamise või tooks see suure tõenäosusega kaasa juhtme katkemise. Samuti on oluline saada infot juhtme soojuslikku olukorda mõjutavate parameetrite võimalikest muutustest. Jahutustingimuste halvenemise korral on vajalik vastavalt vähendada liinidele lubatavat koormust.

Kogemuslikult on teada, et ainult elektriliini töötaja ja visuaalse ülevaate põhjal ei saa ammendavaid järeldusi liini seisukorra kohta teha. Keskkonnatingimused, mis mõjuvad liinidele ja isegi ühe liini erinevatele lõikudele, erinevad suuresti, mistõttu juhtmete ja mastide degradeerumise määr võib olla lõiguti väga ebaühtlane. Liinide seisukorda mõjutavad

muuhulgas atmosfääri saasteainete sisaldus, sademete happelisus, tuule kiirus ja suund liinijuhtmete suhtes ning õhutemperatuur. Seejuures võib sama keskkonnategur mõjutada juhet nii soodsalt kui ebasoodsalt. Näiteks suur tuulekiirus parandab liinijuhtme jahutustingimusi intensiivsema konvektiivse soojusülekande kaudu, kuid suurendab juhtme vibratsiooni ja kiirendab juhtmetraatide mehaanilist väsimist. [1]

Antud töö käsitleb süvendatult vananenud õhuliinijuhtmete soojuslikke ja elektrilisi omadusi. Töö koostamine on seotud kahe Eleringi ja TTÜ koostöös valminud ja käimasoleva uuringuga:

- Lep15078 „Vananevate juhtmete füüsikalised omadused“
- Lep16105 „Vananevate juhtmete füüsikalised omadused – II etapp“

Lisaks eeltoodud projektidele on käesoleva töö autor tegelenud vananenud õhuliinide temaatikaga lepingu Lep15071 „Elering AS alajaamade ja liinide 2015-2019 aasta investeeringute ekspertiis“ täitmise raames. Käesolevas töös on muuhulgas kasutatud projektide täitmisel omandatud teadmisi ja nende raames kogutud tulemusi ning valminud aruandeid ja vahekokkuvõtteid.

Uurimistöö käigus uuriti kahelt Eesti põhivõrgu liinilt kogutud vananenud õhuliinijuhtmeid. Katsekehadega läbiviidud katsete käigus määrati juhtme tähtsamad mehaanilised ja geomeetrilised omadused ning arvatati nende soojusmahtuvus. Arvestades paljude huvipakkuvate parameetrite otsese mõõtmise keerukust ja vastava aparatuuri puudumist, kasutati töö käigus ulatuslikult arvutuslikke meetodeid elektriliste ja soojuslike parameetrite määramiseks. Sobiva katsemetoodika ja arvutuskäikude valimisel lähtuti asjakohase kirjanduse soovistest ja vajaminevate vahendite kättesaadavusest. Vananenud õhuliinijuhtmetel määrati järgnevad parameetrid:

- Terasest südamikutraatide soojusmahtuvus
- Alumiiniumtraatide soojusmahtuvus
- Juhtme pinna absorptsioonitegur
- Juhtme pinna emissioonitegur
- Vahelduvvoolutakistus

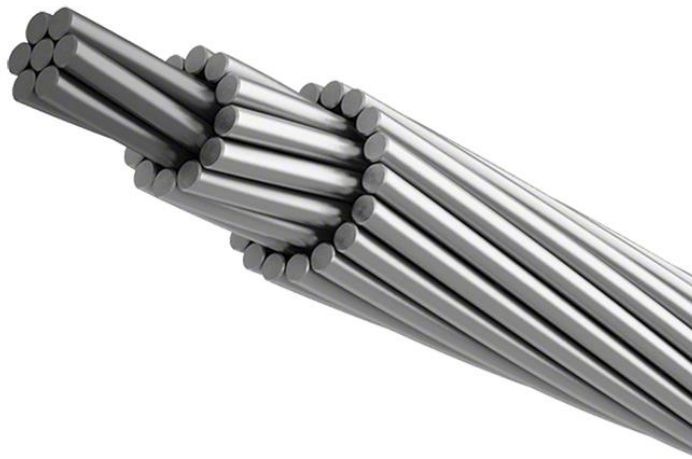
Kõik eelmainitud parameetrid on olulised juhtme soojusliku olukorra modelleerimiseks erinevate talitlustingimuste korral. Ebasobivalt suure koormusvoolu korral õhuliinijuhtmes tekivad probleemid maagabariidi nõuete rikkumise ja juhtme tugevuse vähenemisega ning suureneb oht rikete tekkimiseks.

Töö esimestes peatükkides antakse ülevaade terasalumiiniumjuhtmete eripäradest ja kirjanduse andmetest nende elektriliste ja soojuslike omaduste kohta. Samuti käsitletakse oluliste parameetrite eeldatavat muutumist liini talitlemisperioodi jooksul. Töö teises pooles kirjeldatakse uuritud juhtmete omadusi, nendega tehtud katseid ja katsetulemusi. Töö lõpus on esitatud tulemuste kokkuvõtte, soovitusel edasistes juhtmetega seotud arvutustes algandmete valikuks ja võimalikud edasised uurimissuunad vananenud õhuliinijuhtmete valdkonnas.

1. Terasalumiiniumjuhe ACSR

1.1. Juhtme ehitus

Viimase sajandi jooksul on kõrgepinge õhuliinide ehitamisel kõige laialdasemalt kasutuses olnud juhtmetüüp terasalumiiniumjuhe ehk teraljuhe (ingl. k *Aluminium Conductor Steel Reinforced – ACSR*). Juhe koosneb kihtidena kokku keerutatud alumiinium- ja tsingitud terastraatidest (joonis 1.1). Alumiiniumtraadid annavad juhtmele sobivalt väikese elektritakistuse ja terastraadid piisava tugevuse pikkade visangute ehitamiseks. Terastraadid paiknevad juhtme ristlõike keskosas ja on reeglina väiksema diameetriga võrreldes alumiiniumtraatidega. Terasa osakaal kogu juhtme ristlõikest võib varieeruda olenevalt juhtmemargile ettenähtud tugevusest. [2]



Joonis 1.1 ACSR haljas õhuliinijuhe 30 alumiiniumtraadi ja 7 terastraadiga [3]

Iga järgnev traatide kiht on keerutatud vastassuunalisena selle all asetseva kihi suhtes. Sellist konstruktsiooni kasutatakse juhtme tugevuse ja traatide omavahelise asendi muutumatuse tagamiseks ja energiakadude vähendamise eesmärgil. Kihi keerutamise suunda määratakse kokkuleppeliselt selliselt, et kui juheta vaadata piki selle telge ja kihi kõige kõrgemal asuv traat keerdub vaatlejast eemalduvas suunas paremale, on kiht keerutatud parempoolselt; kui kõige ülemine traat keerdub vaatlejast eemalduvas suunas vasakule, on juhe vasakpoolselt keerutatud. Laialdases kasutuses on kuni nelja alumiiniumtraatide kihiga ACSR juhtmed. Alumiiniumtraatide kihte on tavaliselt paarisarv, sest sellisel juhul on terassüdamikuga magnetilistest omadustest tingitud kaod oluliselt väiksemad kui paaritu kihtide arvu korral. [4] Alumiiniumit on ulatuslikult kasutatud õhuliinijuhtmete traatide valmistamisel, sest [4]:

- See on maapõues üks kõige levinumad elemente, seda on suhteliselt odav toota ja alumiinium on üks parima elektrijuhtivusega metalle; alumiiniumi erijuhtivus tiheduse järgi on seejuures ligikaudu kaks korda suurem kui vasel.
- Alumiiniumi tihedus $2,7 \text{ kg dm}^{-3}$ on teiste metallidega võrreldes väike ja selle tõttu on alumiiniumjuhtmeid lihtsam ja odavam paigaldada, samuti saab ehitada alumiiniumit kasutades pikki visanguid.
- Alumiiniumi sulameid saab toota väga erineva tugevusega, kõige tugevamad lähenevad mehaaniliste omaduste poolest pehmetele terastele. Väiksema tugevusega sulamitel on reeglina parem elektrijuhtivus, mistõttu need on eelistatud juhtmematerjalidena. Uuemates juhtmetüüpides, mis on ette nähtud talitlema kõrgematel temperatuuridel, on mõnel juhul alumiiniumsulamist traatidel olulisem roll juhtme tugevuse tagamisel [5].
- Alumiiniumi töödeldavus on väga hea: alumiiniumit saab valtsida ja lihtsalt traadiks tõmmata.
- Alumiinium on enamikes ilmastikutingimustes väga vastupidav korrosioonile tänu õhukesele ja tihedale oksiidikihi (Al₂O₃), mis metalli pinnale tekib ja takistab selle edasist oksüdeerumist. Alumiiniumsulamite korrosioonikindlust tõstab täiendavalt anodeerimine.

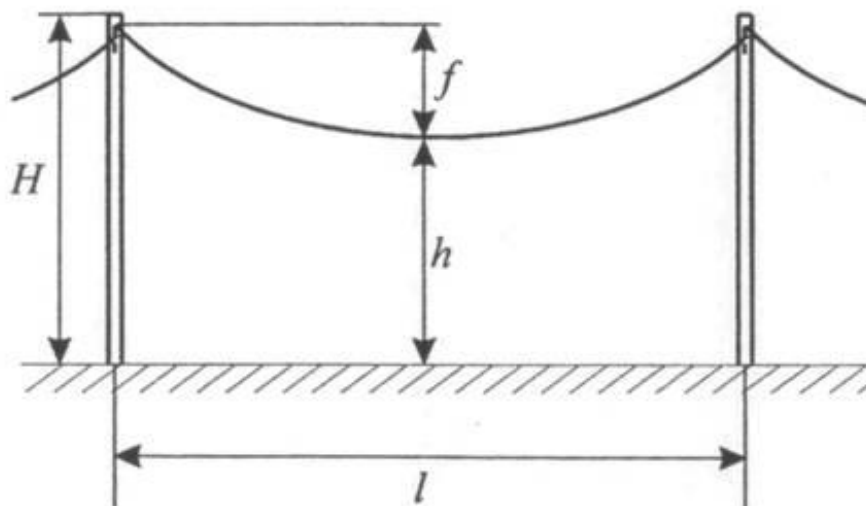
Terast kasutatakse ulatuslikult õhuliinide ehitamisel, sest see on odav, hästi töödeldav ja võrdlemisi tugev. Terast on kasutatud sajandeid ehituslikel eesmärkidel ning selle käigus on tekkinud ulatuslikud teadmised materjali käitumise kohta eri tingimustes. Enamikes tavalistes ACSR juhtmetes kasutatakse südamikutraatides keskmise tugevusega terast, mille süsinikusisaldus on 0,50 ... 0,85 massiprotsenti. Tõmbetugevus on tavaliselt 1400 MPa, kuid eriti suurt tugevust vajavatel juhtudel kasutatakse terast tõmbetugevusega kuni 1900 MPa. [6]

Terase kasutamise üheks suuremaks puuduseks on selle vähene vastupidavus korrosioonile. Õhuhapniku mõjul toimub ajapikku tavaliste teraste oksüdeerumine, mis ei ole iseeneslikult pidurduv nagu alumiiniumi puhul. Terastraatide korrosioonikindluse tõstmiseks need tsingitakse. Tsingikihi paksus, mis terastraatidele kantakse, sõltub keskkonnast ja eelkõige keskkonna korrodeerivate omaduste tugevusest, kuhu liinijuhe paigaldatakse. Aladel, kus õhk on rohkem saastunud ja selle tõttu esineb suurem korrosioonikoormus, kaetakse terastraadid juhtme eluea pikendamiseks paksema tsingikihiga.

1.2. Õhuliinide geomeetrised parameetrid

ACSR juhtmete kasutusala on kesk- ja kõrgepinge õhuliinid. Õhuliini geomeetrisel mudelil põhjal (joonis 1.2) saab ülevaate probleemidest, mis esinevad kui õhuliinijuhtmete pikkus hakkab muutuma. Õhuliini kahe järjestikuse masti juhtme kinnituskohade vahelise kaugust l nimetatakse visangu pikkuseks. Eesti kõrgepingeliinide kõige pikemad visangud on tavaliselt ca 300...400 m pikad [7]. Liinijuhtme punkti suurimat vertikaalsuunalist vahelise kaugust f selle kinnituskohast ühendavast mõttelisest sirgest nimetatakse juhtme rippeks. Liinijuhtme vähimat vahelise kaugust h maapinnast nimetatakse maagabariidiks. [8]

Juhtme vananemise käigus ja juhtme temperatuuri kasvu korral toimub selle joonmõõtmete suurenemine. Pikenemise tagajärjel suureneb riipe ja väheneb maagabariit. Juhtmete pikenemise korral väheneb nende pingus, mistõttu on võimalik juhtme suurema amplituudiga võnkumine tuule mõjul, mis tekitab traatides materjali väsimist. Liiga väikese maagabariidi korral suureneb oht, et liinil tekib maalühis, mille tagajärjel kahjustub liini all paiknev elusloodus ja sealt läbi suunduvad transpordivahendid või muud objektid. Samuti suureneb elektrilöögi oht inimestele. Kõrgepingeliinide puhul on oht sedavõrd suurem, et maalühise tekkimiseks ei ole vajalik vahetu füüsiline kontakt maapealse objekti ja pingestatud liinijuhtme vahel; piisavalt väikese vahelise kauguse korral toimub õhus läbilööki. Liinil lühise tekkimine on ebasoovitav ka juhtme kahjustumise ja liini kui elektrivõrgu elemendi tööst väljalangemise tõttu.



Joonis 1.2 Õhuliini visangu põhimõtteline skeem ja olulised mõõtmised: H – masti kõrgus, l – visangu pikkus, f – juhtme riipe, h – juhtme maagabariit [8]

1.3. Juhtmematerjalide peamised füüsikalised parameetrid

Järgnevalt on esitatud ACSR juhtmete kahe peamise materjali, alumiiniumi ja terase, tähtsamad füüsikalised parameetrid (tabel 1.1). Järgnevad parameetrid iseloomustavad tüüpilisi õhuliinides kasutatavaid terasesulameid ja tavalist alumiiniumi:

- Tihedus ρ (kg m^{-3})
- Lineaarpaisumistegur α_L ($^{\circ}\text{C}^{-1}$) näitab antud materjalist objekti joonmõõtmete suhtelist pikenemist temperatuuri tõusmisel 1°C võrra
- Erisoojus c ($\text{J kg}^{-1}\text{C}^{-1}$) näitab soojushulka, mis on vaja üle kanda antud materjalist 1 kg massiga objektile, et tõsta selle temperatuuri 1°C võrra
- Erisoojuse temperatuurisõltuvuse tegur β ($^{\circ}\text{C}^{-1}$) näitab materjali erisoojuse suurenemist temperatuuri tõusmisel 1°C võrra
- Alalisvoolu eritakistus temperatuuril 20°C ρ_{DC20} ($\text{n}\Omega \text{ m}$)
- Alalisvoolutakistuse temperatuurisõltuvuse tegur α_{DC} ($^{\circ}\text{C}^{-1}$) näitab takistuse suurenemist temperatuuri tõusmisel 1°C võrra

Tabel 1.1 Alumiiniumi ja terase põhilised füüsikalised parameetrid [9] [10] [11]

Materjal	ρ (kg m^{-3})	α_L ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	β ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	c ($\text{J kg}^{-1}\text{C}^{-1}$)	ρ_{DC20} ($\text{n}\Omega \text{ m}$)	α_{DC} ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)
Alumiinium	2703	$2,3 \cdot 10^{-5}$	$3,8 \cdot 10^{-4}$	897	28,3	$4,03 \cdot 10^{-3}$
Teras	7780	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	481	287	$4,5 \cdot 10^{-3}$

2. Terasalumiiniumjuhtmete vananemise mehhanismid ja tagajärjed

2.1. Lõõmutus

Lõõmutus on peamisi alumiiniumtraatide püsiva kahjustumise põhjustajaid. Lõõmutus ehk metalli mikrostruktuuri muutumine kõrge temperatuuri mõjul põhjustab keerutatud liinijuhtmetes tõmbetugevuse vähenemist. Lõõmutuse käigus toimub järk-järguline metalli ümberkristalliseerumine, mistõttu esialgne külmtöötusega saavutatud suurem tõmbetugevus ajapikku väheneb. Alumiiniumi lõõmutus algab praktiliselt 100 °C juures ning temperatuuri tõusuga muutub intensiivsemaks. Temperatuuril 200 °C on lõõmutuse degradeeriv toime väga kiire. Alumiiniumtraadi jaoks saab lõõmutusest tingitud suhtelist tugevuskadu L_{Al} arvutada empiirilise valemi 2.1 järgi [12]:

$$L_{Al} = 100 - (-0,24\theta_j + 135) \cdot t^{-\frac{1,6}{0,63 \cdot d_{Al}}(0,001\theta_j - 0,095)} \quad (2.1)$$

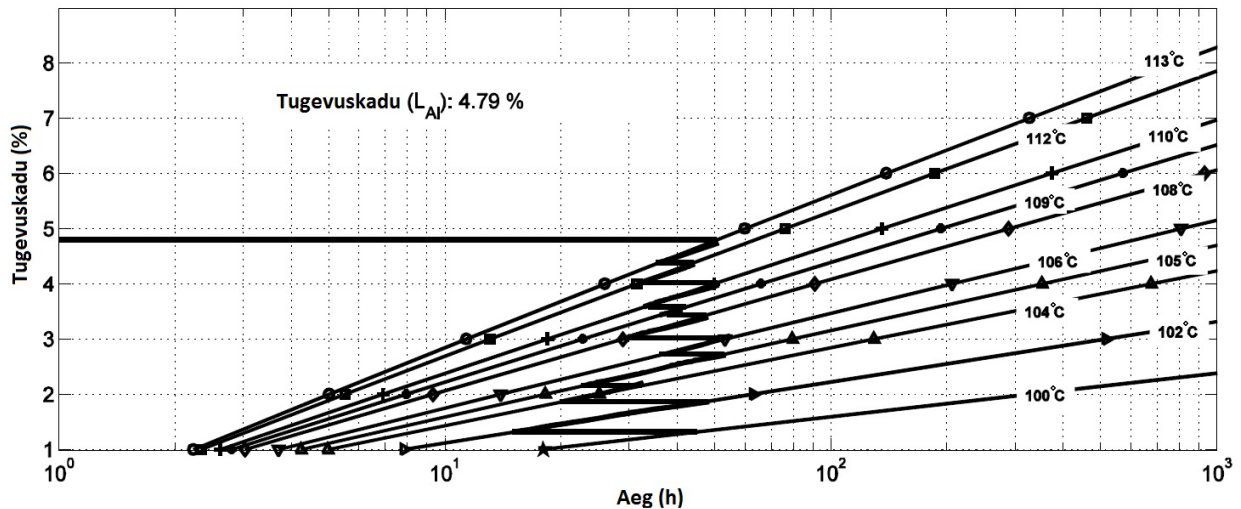
kus θ_j – traadi temperatuur °C;

d_{Al} - alumiiniumtraadi diameeter mm;

t – temperatuuri toimeaeg h.

Lõõmutusel tekkinud tugevuskadu akumuleerub, mistõttu ei tohiks lubada juhtme temperatuuril pikaajaliselt püsida temperatuuril üle 90 °C [6]. Joonisel 2.1 on esitatud erinevatel temperatuuridel toimuva lõõmutuse tulemusel ACSR juhtme alumiiniumtraatides esineva tugevuskao graafikud. Kui on teada kaua aega juhe on mingil temperatuuril talitlenud, saab hinnata kogu resulteeruvat tugevuskadu. Joonisel on tugevuskao määramist illustreeritud horisontaaljoonte abiga.

Terastraatide lõõmutus on õhuliinijuhtmete korral vähemoluline kui alumiiniumtraatide lõõmutus, sest see hakkab toimuma temperatuuril üle 300 °C. Seevastu võib terastraate kaitsev tsingikiht kahjustada saada pikaajalisel talitlemisel temperatuuril üle 200 °C [5]. Soovituslikult ei tohi alumiiniumtraatide temperatuur lühise mõjul ületada lühiajaliselt 200 °C ja terastraatide temperatuur 300 °C [10].



Joonis 2.1 Lõõmutuse tagajärjel tekkiv tugevuskadu alumiiniumtraatides erinevatel temperatuuridel aja järgi ja kogu tugevuskao määramine [12]

Tuleb märkida, et alumiiniumtraatide tugevuse vähenemine moodustab ainult osa kogu juhtme tugevuskao, sest olenevalt juhtme tüübist annavad terastraadid enamuse juhtme tõmbetugevusest. Alumiiniumtraatide tõmbetugevuse vähenemine 20% võrra võib olenevalt juhtme margist vähendada kogu juhtme tõmbetugevust ca 5...10%. Tavaliselt on aktsepteeritav juhtme tõmbetugevuse vähenemine 10% võrra, millega liini projekteerimisel arvestatakse [6].

Temperatuuri tõusul väheneb mehaaniline pinge alumiiniumtraatides nende terasest suurema lineaarpaisumisteguri (tabel 1.1) tõttu. Alumiiniumtraadid võivad kõrgetel temperatuuridel minna tõmbelt üle survele ja väheneb jõud, mis keerutatud juhtme traate koos hoiab. Traadid eemalduvad juhtme südamikust ja nende vahele tekivad õhkvahekihid. Seda nähtust nimetatakse ingliskeelses kirjanduses terminiga *birdcaging* väljapoole paindunud alumiiniumtraatide linnupuuritaolise välimuse tõttu.

2.2. Metallurgiline roome

Roome on plastne deformatsioon, mis toimub metallist detaili koormamisel mehhaanilise jõuga, mille tagajärjel tekkiv normaalpinge ei ületa materjali voolavuspiiri. Kui jõu rakendamise aeg on lühike, taastuvad keha mõõtmed täielikult jõu rakendamisele eelnend mõõtmeteni materjali elastsuse tõttu. Pikaajalisel normaalpinge rakendamisel aga pikeneb keha lisaks oodatavale elastsele deformatsioonile ka plastselt.

Õhuliinijuhtmete pikkus metallurgilise roome tulemusel suureneb, mistõttu suureneb ka juhtmete ripe ja väheneb nende maagabariit. Samas väheneb juhtmete mehaaniline pingsus, mis

omakorda vähendab roome intensiivsust. Roome toimub õhuliinidel ära sisuliselt esimese 10 aasta jooksul pärast püstitamist ja sellest tingitud rippe suurenemine ja maagabariidi vähenemine tuleb alati arvesse võtta elektriliini projekteerimisel [4]. Roome tõttu muutub ka juhtme rippe temperatuurisõltuvuse tunnusjoon. Temperatuur, mille ületamisel terassüdamik hakkab kandma kogu juhtme raskust, langeb alumiiniumtraatide roome tagajärjel [13].

2.3. Juhtme pinna mustumine

On kindlaks tehtud, et juhtme pinna kiirguslik absorptsioonitegur α ja emissioonitegur ε suurenevad elektriliini eluea jooksul [9]. Absorptsioonitegur näitab kui suur osa materjali pinnale langevast soojuskiirgusest neeldub selles. Näiteks pinnal absorptsiooniteguriga 0,9 neeldub 90% ja sellelt peegeldub tagasi keskkonda 10% langevast kiirgusest. Emissioonitegur näitab kui suure võimsusega kiirgab pind mingil temperatuuril elektromagnetilist kiirgust võrreldes samal temperatuuril oleva absoluutselt musta kehaga. Pinna kiirgusemissiooni võimsust iseloomustab Stefan-Boltzmann'i seadusest tuletatud arvutusvalem 2.2. Tähelepanu väärib asjaolu, et pinna kiirgusemissiooni võimsus P_E on võrdeline selle absoluutse temperatuuri neljanda astmega.

$$P_E = \varepsilon \sigma S T^4 \quad (2.2)$$

kus σ – Stefan-Boltzmann'i konstant $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$;

S – kiirgava pinna pindala m^2 ;

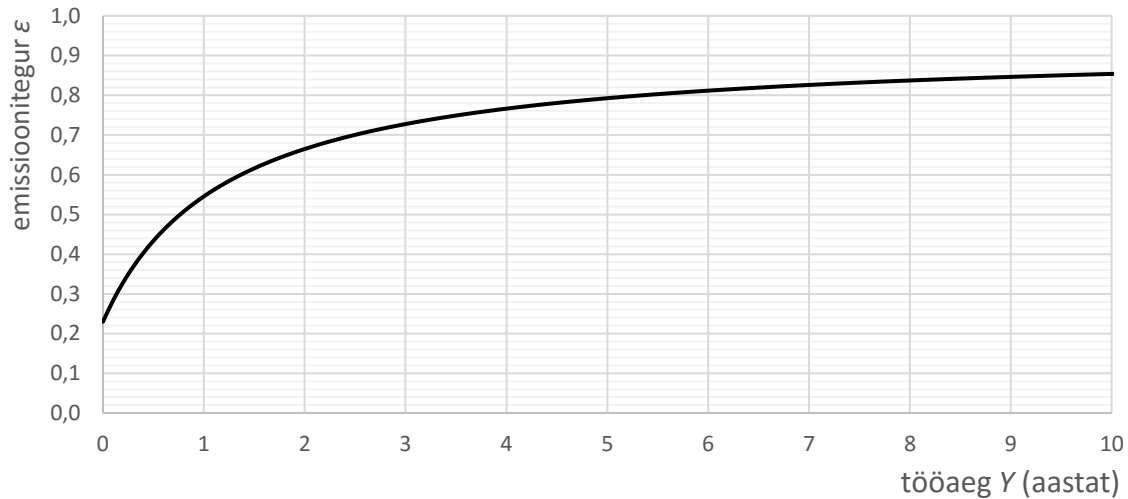
T – pinna absoluutne temperatuur K.

Uute alumiiniumtraatidest väliskihiga õhuliinijuhtmete absorptsiooni- ja emissiooniteguri väärtus on liini eluea alguses vahemikus 0,2...0,3 ja võib aja jooksul tõusta väärtuseni 0,7 või üle selle. Absorptsiooni- ja emissiooniteguri suurenemine on üldiselt korreleeritud ja saastunud õhkkeskkonnas aja jooksul mõlema parameetri väärtused suurenevad. Suurenemise kiirus sõltub eelkõige juhtme asukohas õhus sisalduvate tolmuosakeste kontsentratsioonist ja liini talitluspingest [9]. Emissiooni muutumise ligikaudseks kirjeldamiseks on välja töötatud empiiriline valem 2.3 [12]:

$$\varepsilon = 0,23 + \frac{0,7Y}{1,22 + Y} \quad (2.3)$$

kus Y – liini tööaeg aastates.

Valemi 2.3 järgi arvatud emissiooniteguri muutumist liini vanusest sõltuvalt iseloomustab joonis 2.2, mille järgi on näha, et emissiooni muutumine on suhteliselt kiire liini esimestel tööaastatel, kuid pärast 7...8 aastat selle kasv pidurdub oluliselt.



Joonis 2.2 Õhuliinijuhtme emissiooniteguri muutumine liini esimese kümne tööaasta jooksul empiirilise valemi 2.3 järgi

Antud empiiriline valem sobib ainult juhtme pinna seisundi ligikaudseks hindamiseks, sest on mitmeid tegureid, mis emissiooni suurenemise kiirust mõjutavad, kuid mida antud valem arvesse ei võta. Uuringutes on täheldatud, et kõrbetaolistes ja suure sademete hulgaga ilmastikus paiknevate liinijuhtmete absorptsiooni- ja emissioonitegurid suurenevad väiksema kiirusega. Ameerika Ühendriikide lääneosariikides on mõnede liinide juhtmete absorptsiooniteguri väärtus 0,6 isegi pärast 10 aasta pikkust ekspluatatsioonieaga [14].

Pikkade ülekandeliinide korral ei ole keskkonnatingimused terve liini ulatuses tavaliselt ühesugused ja selle tõttu võivad nii absorptsiooni- kui emissioonitegur varieeruda. Kui eraldi mõõtmisi pole tehtud, võib juhinduda järgnevatest soovistest mõlema parameetri väärtuste valimise kohta:

- Põhja-Ameerikas on arvutustes kasutatud nii absorptsiooni- kui emissiooniteguri väärtust 0,5 või mõlema väärtust vahemikus 0,7...0,9 [9];
- Absorptsiooniteguri väärtuseks võtta 0,8 ja emissiooniteguri väärtus võib olla kuni 0,1 võrra väiksem absorptsioonitegurist [9];
- Lubatavate talitlusvoolude konservatiivsete väärtuste määramisel võib arvutustes võtta absorptsiooniteguri väärtuseks 0,9 ja emissiooniteguri väärtuseks 0,7 [14].

Kiirgustegurite suurenemise kvalitatiivne mõju liini talitlustingimustele oleneb liini töötemperatuurist. Kui liini temperatuur ületab 70 – 80 °C, on absorptsiooni- ja emissioonitegurite suurenemine pigem positiivse mõjuga, sest soojuse kiirguslik äraanne ületab päikesekiirguse neeldumisest põhjustatud soojenemise. Selle asjaolu tõttu kasutavad mõned võrguettevõtted kõrgema lubatava töötemperatuuriga õhuliinidel esimestel aastatel pärast liini ehitamist või uue liinijuhtme paigaldamist väiksemaid lubatavaid kestevvoolu väärtuseid. [14]

2.4. Pinnakaredus ja koroona

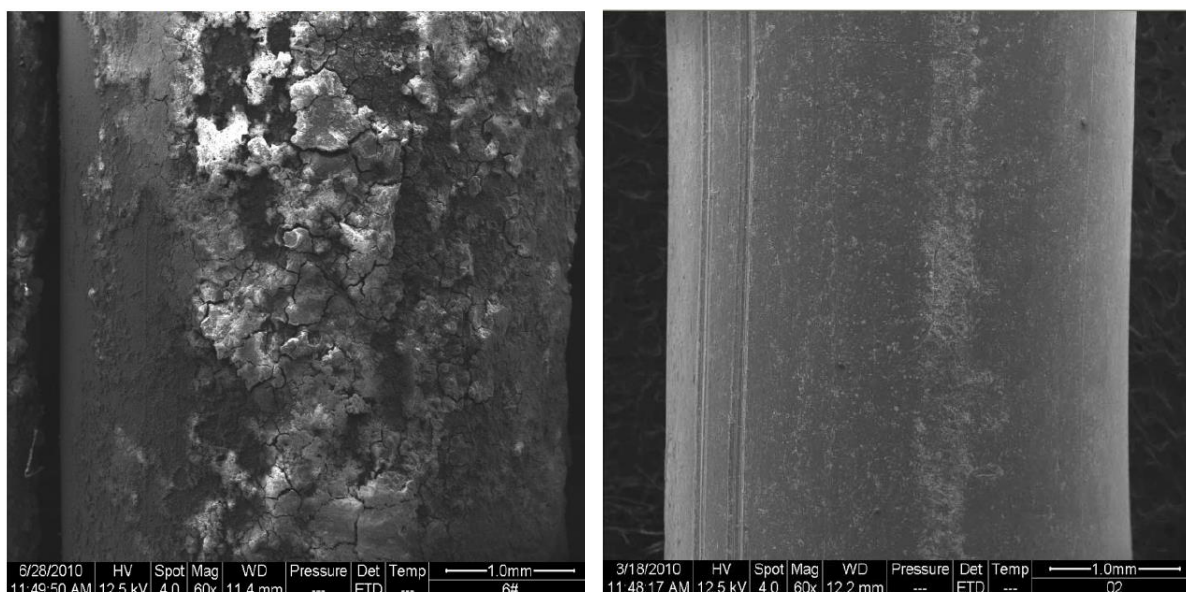
Juhtme pinna saastumine toimub keskkonnas leiduvate lenduvate osakeste ja ainete seostumisel traatide pinnaga. Väävlit sisaldavad saasteained põhjustavad alumiiniumtraatide pinnal väikeste lohkude teket, millesse hakkavad kogunema õhus leiduvad tahked osakesed. Selle tõttu toimub ajapikku traatide välispinnal saasteainete kuhjumise tagajärjel ebatasaste teke ja mõningane alumiiniumi korrosioon. Välisest korrosioonist põhjustatud tugevuskadu vähendab juhtme tõmbetugevust üldiselt väiksemal määral kui seesmine korrosioon. [6] [15]

Varasemates uuringutes on leitud, et peamised lisandainete elemendid, mida traatide pinda katva saastekihi sees leidub, on hapnik, räni, väävel, süsinik, kaalium ja kaltsium. Uuritud juhtmed pärinesid 500 kV kõrgepingeliinilt Lõuna-Hiinas, mis asub suhteliselt lähedal mererannikule ja 20 aastat töös olnud kivisütt põletavale elektriijaamale. Selle tõttu on oodatav, et juhtmete pinnale ladestub soolasid ja väävliühendeid. [15]

Joonisel 2.3 on toodud uue ja vananenud juhtme alumiiniumtraadi pinda võrdlevad mikroskoobi ülesvõtted. Nende järgi on selgelt näha saasteainete kogunemist vananenud juhtme pinnal ja selle ebatasaste suurenemist. Pinna kareduse iseloomustamise üldlevinud viis on mõõta pinnal suure hulga N punktide kõrgust nulljoone suhtes Z ja määrata selle järgi pinna keskmine nivoo \bar{Z} . Seejärel saab arvutada punktide keskmise kauguse järgi pinna keskmise kareduse R_a (võrrand 2.4) või ruutkeskmise kareduse R_{rms} (võrrand 2.5) keskmise nivoo suhtes:

$$R_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Z_i - \bar{Z}| \quad (2.4)$$

$$R_{rms} = \frac{1}{N-1} \sqrt{\sum_{i=1}^N (Z_i - \bar{Z})^2} \quad (2.5)$$



Joonis 2.3 Alumiiniumtraadi pinna suurendus (60 korda). Vasakul 15 aastat töös olnud LGJ400/65 õhuliinijuhtme traat, paremal uue juhtme traat [15]

Karedam juhtme pind peaks soodustama osalahenduste tekkimist, sest väikese kõverusraadiusega ebatasasuste vahetus läheduses on elektrivälja tugevus suurem. Saaste mõju koroonalahenduste tekkele on uuritud allikas [15] ja põhilised tulemused on toodud tabelis 2.1. Selgub, et sõltumata juhtme tüübist on koroonasüttimispinge saastunud pinnaga õhuliinijuhtmetel tunduvalt madalam kui uutel õhuliinijuhtmetel. Osalahenduste süttimise järgi määratakse juhtme Peek'i karedustegur m_P suhtena:

$$m_P = \frac{E_0^c}{E_0^s} \quad (2.6)$$

kus E_0^c – koroonasüttimisväljatugevus juhtme korral;

E_0^s – koroonasüttimisväljatugevus juhtme diameetriga võrdse silindrilise keha korral.

Seega suurema Peek'i karedusteguriga kehad on väiksemate ebatasasustega ja karedustegur väärtusega 1 iseloomustab ideaalselt ümarat juhti.

Vananenud õhuliinijuhtmetel on võrreldes sama margiga uute juhtmetega:

- Suurem pinna keskmine ja ruutkeskmine karedus;
- Madalam koroonasüttimispinge ja süttimise väljatugevus;
- Võrdsel pingel suurem koroonalahenduste intensiivsus;
- Võrdsel pingel suurem osa pinnast haaratud koroonalahendustega.

Tabel 2.1 Koroona süttimispinged, väljatugevused ja pinna karedustegur erinevat tüüpi uutel ja vananenud õhuliinijuhtmetel [15]

	LGJ300/40		LGJ400/65		LGJ500/35	
	Uus	Vana	Uus	Vana	Uus	Vana
Vana juhtme tööaeg (a)	12		15		20	
Keskmine karedus R_a (μm)	0,73	7,46	0,81	20,62	0,89	8,93
Ruutkeskmine karedus R_{rms} (μm)	1,13	9,95	0,97	24,33	1,02	11,50
Koroona süttimispinge (kV)	112,5	98,8	116,0	94,6	125,7	112,0
Koroona süttimise väljatugevus E_0^c (kV/mm)	3,12	2,74	3,02	2,35	2,97	2,56
Peek'i karedustegur m_P	0,841	0,739	0,836	0,649	0,833	0,718
Süttimise väljatugevuse suhteline vähenemine	12,1%		22,4%		13,8%	

2.5. Tsingikihi kulumine

Südamikutraatide pinnale kantud tsingikiht kaitseb terast oksüdeerumise vastu kahel viisil. Esiteks see moodustab füüsilise barjääri, mis ei luba niiskusel ja õhuhapnikul terasega kokku puutuda. Teiseks see moodustab terasega, mis on väiksema elektronegatiivsusega metall, galvaanilise paari ning kaitseb seda elektrokeemilise korrosiooni korral. Elektrokeemilise korrosiooni mõjul oksüdeerub terase kokkupuutes olev tsingikiht enne seda, kui terases sisalduv raud keemiliselt reageerima hakkab.

Välisõhu reageerimisel tsingiga tekivad erinevad oksüdeerimise saadused, esmajoones tsinkoksiid (ZnO). Oksiid reageerib niiskuse olemasolul veega, tekitades tsinkhüdrosiidi ($\text{Zn}[\text{OH}]_2$). See omakorda reageerib õhus leiduva süsihappegaasiga, moodustades tsinkkarbonaadi (ZnCO_3). Tsinkkarbonaat moodustab tsingitud pinnale musta värvusega tiheda, vastupidava ja vees lahustumatu kattekihi, mis kaitseb tsinki edasise oksüdeerumise eest. [16]

Kui tsingikiht kahjustub ja selle all olev teras paljastub, hakkab tsink terast galvaaniliselt kaitsma. Olenevalt keskkonna omadustest võib isegi üsna suures ulatuses tsingikihi kadumise korral teras korrosiooni eest kaitstud olla. Elektrokeemilise korrosiooni korral väheneb tsingikihi paksus kiirusega, mis vastavalt keskkonna korrodeerivate omaduste määrale, kuid kihi kulumise tempo on ligikaudu 10 korda aeglasem kui terase oksüdeerumine ilma igasuguse kaitsva tsingikihita. Kordades väiksema materjalikao kiiruse tõttu ongi terastraatide tsinkimine kokkuvõttes otstarbekas. [16]

Tsingikihi kulumise kiirus sõltub lisaks niiskuse olemasolule ja keskkonna korrodeerivate saasteainete kontsentratsioonile muuhulgas ka temperatuurist. Elektrokeemilise korrosiooni kiirus on suurim 60 – 70 °C juures. [6]

2.6. Alumiiniumtraatide kulumine

Alumiiniumi mass juhtmes võib erinevate mõjurite tagajärjel väheneda. Kui tsingikiht on terase pealt ära kulunud ja määrdekiht piisaval määral kadunud, satuvad kontakti teras ja alumiinium ning keemiliselt aktiivsema metallina hakkab alumiinium elektrokeemilise korrosiooni käigus oksüdeeruma. Alumiiniumi korrosiooniproduktid võivad põhjustada juhtme pundumist. Korrosiooni tagajärjel alumiiniumi ristlõige väheneb, mistõttu langevad ka juhtme elektrijuhtivus ja tõmbetugevus. Pikkamööda suureneb liini koormatuse samale tasemele jäämise korral voolutihedus terassüdamikus ning tekib traatide soojenemine, mis võib piisavalt suure elektrilise koormuse korral põhjustada juhtme ülekuumenemist ja sellele järgneva rikke, mis viib liini mingiks ajast tööst välja. [6]

Tuule mõjul toimub õhuliinijuhtmete võnkumine, milles eristatakse kolme eri tüüpi liikumist: tuulevibratsioon, lõhistatud faasi osajuhtmete ostsilleerimine ja galopeerimine. Võnkumine põhjustab ajapikku traatide väsimist ja tekitab mikropragusid nende struktuuris. Kohtades, kus õhuliinijuhe on liikumatult fikseeritud, näiteks rippisolaatori külge või lõhisfaaside vahelhoidikuga, võivad ajapikku traadid katkeda. Katkenud traadid saavad paikneda välimises kihis, misjuhul potentsiaalne rikkekoht on juba visuaalsel vaatlusel märgatav, või ühes sisemistest kihtidest, misjuhul katkenud traatide kindlaks tegemine võib olla üsna keeruline ja nende tuvastamiseks on vaja eriseadmeid. [6]

Kuigi rakendatakse meetmeid juhtmete võnkenähtuste esinemise ja mõju võimalikult palju vähendamiseks, ei saa neid täielikult ära hoida. Erandiks on juhtmete galopeerimine, mille esinemine on haruldane ning mille tekkimiseks on vaja väga spetsiifilisi ilmastikutingimusi. Võnkumise vähendamiseks ettenähtud liiniarmatuur kulub ajapikku ja ka Eestis on mitmel põhivõrgu liinil märgatud purunenud vibratsioonisummuteid [17].

Juhtmetraatide kulumist põhjustab ka frettingkorrosioon, mis on otseselt seotud liinijuhtmete vibreerimisega. Traatide omavahelise hõõrdumise tulemusena hakkab nende pind kuluma. Mehaanilise pinge all olevate ACSR juhtmete korral võib tuulevibratsiooni olemasolul just frettingkorrosioonist mõjutatud koht olla traadi katkemist põhjustava prao alguspunktiks ja suurem juhtme pingsus kiirendab rikke tekkimist [18]. ACSR juhtmetel on seda eriti näha

kinnitusklambrite lähedalt kogutud juhtmenäidiste uurimisel. Sisemise alumiiniumtraatide kihi ja terastraatide kontaktpinnal on teras suurema pinnakõvaduse tõttu kulutanud silmnähtavad lohud alumiiniumtraatide pinnale.

Õhuliinijuhtmete seisukorrale mõjuvad negatiivselt ka liinidel toimuvad lühised. Kui lühis likvideeritakse releekaitse kiire sekkumisega, ei tõuse õhuliinijuhtme temperatuur kogu pikkuses oluliselt voolu termilise toime tõttu ja juhtmes ei teki lõõmutust (jaotis 2.1). Seevastu lühisekohas võib juhtmete pinna seisukord oluliselt halveneda elektrikaare mõju tõttu. Kaare põlemise ajal soojeneb tugevasti juhtme pind, millele elektrikaar toetub, ja sulatab selles kohas alumiiniumtraate. Kaare toetuspunkti asukohale juhtmel jääb pärast lühist niinimetatud kaarejälg.

3. Õhuliinijuhtmete soojuslikud protsessid

Õhuliinijuhtmetel eristatakse kolme soojusliku käitumise seisukohast erinevat olukorda [10]:

- Soojuslik tasakaal. Juhtme soojenemist ja jahtumist põhjustavad protsessid on tasakaalus ja juhtme temperatuur püsib muutumatuna.
- Soojuslik siirdeprotsess. Juhtme soojenemist ja jahtumist põhjustavad protsessid pole tasakaalus ja juhtme temperatuur muutub aeglaselt protsesside tasakaalu saavutamise suunas. Näiteks kui siirdeprotsessi kutsub esile voolu hüppeline suurenemine juhtmes, siis osa juhtmel eralduvast soojusest hajub ümbritsevasse õhku ning osa suurendab juhtme siseenergiat, põhjustades temperatuuritõusu.
- Adiabaatiline protsess, mis toimub lühise ajal. Juhtme temperatuuri tõusu põhjustab suure väärtusega lühisvool, mis tõstab juhtme temperatuuri kiiresti. Antud protsessi kestus ei ületa reeglina 1 sekundit relekaitse sekkumise tõttu lühise likvideerimiseks, arvestades sealhulgas ka ebaedukaid taaslülitusi. Protsessi loetakse adiabaatiliseks, sest selle lühikese kestuse jooksul ei jõua toimuda märkimisväärset soojusvahetust juhtme ja väliskeskkonna vahel ja arvestatakse, et kogu voolu toimel eraldunud soojus kulub juhtme siseenergia suurendamiseks.

3.1. Soojuslik tasakaal

Valem 3.1 [10] sobib õhuliinijuhtme soojusliku olukorra ülevaatlikuks kirjeldamiseks soojusliku tasakaalu tingimustes. Selles on kajastatud kõik juhtme temperatuuri tõstvate ja langetate protsesside soojuslikud mõjud. Käesolevas töös on õhuliinijuhtmete soojuslikud arvutused nende võrreldavuse eesmärgil esitatud juhtme ühikulise pikkusega lõigu kohta.

$$P_J + P_M + P_S + P_i = P_C + P_r + P_w \quad (3.1)$$

kus P_J – voolu soojuskaod $W m^{-1}$;

P_M – magnetefektidest põhjustatud soojendamine $W m^{-1}$;

P_S – päikesekiirguse soojendamine $W m^{-1}$;

P_i – soojendamine koroonaast $W m^{-1}$;

P_C – konvektiivne soojuskadu $W m^{-1}$;

P_r – kiirguslik soojuskadu $W m^{-1}$;

P_w – vee aurumisest põhjustatud soojuskadu $W m^{-1}$.

3.1.1 Juhtivuslikud soojuskaod

Juhtivuslike soojuskadude all mõistetakse juhtme takistusel voolu toimel eralduvat soojust. Seda sorti kadude võimsust iseloomustab Joule'i – Lenz'i seadusest tuletatud valem 3.2. Erinevate vahelduvvoolu eripärade tõttu on liinijuhtmete ja muud tüüpi elektrijuhtide vahelduvvoolutakistus igal temperatuuril mõnevõrra suurem alalisvoolutakistusest. Vahelduvvoolutakistust on süvitsi käsitletud peatükis 4.

$$P_J = I_{AC}^2 R_{AC} \quad (3.2)$$

kus I_{AC} – vahelduvvoolu efektiivväärtus juhtmes A;

R_{AC} – juhtme vahelduvvoolutakistus $\Omega \text{ m}^{-1}$.

3.1.2 Magnetilised soojuskaod

Magnetilise soojendamise all on mõeldud juhtme terasest südamikutraatide ferromagnetiliste omaduste tõttu übermagneetimisel tekkivaid pöörivoolu- ja hüstereesikadusid. Juhtmetüüpides, millel puudub terastraatidest osa, seda sorti kaod puuduvad, kuid ACSR õhuliinijuhtmetes on nende arvestamine täpsetes arvutustes vajalik.

3.1.3 Päikesekiirguse neeldumine

Päikesekiirguse neeldumist juhtme pinnal iseloomustab valemi 3.1 liige P_S . Õhuliinijuhtmete puhul on sellele vastav võimsusvoog juhtme ühikulise pikkusega lõigu kohta arvutatav järgmiselt:

$$P_S = \alpha E_\Sigma D \quad (3.3)$$

kus E_Σ – üldine kiiritustihedus W m^{-2} ;

D – juhtme välisdiameeter m.

Valem 3.3 on mõnevõrra lihtsustatud, sest tegelikult jõuab juhtme pinnale kolme tüüpi kiirgust:

- Otsekiirgus, mis jõuab päikesest otse juhtmeni;
- Difuusne kiirgus, mis on hajunud atmosfääris leiduvatelt osakestelt ja tuleb igast suunast taevas;
- Maapinnalt peegeldunud kiirgus.

Otsekiirgus on nimetatud allikatest kõige suurema mõjuga juhtme soojendamisel ja kui võtta arvesse üldist kiiritustihedust juhtme asukohas, ei teki sellega arvutamisel suurt viga. Praktikas on kiirguse mõõtmine komponentide kaupa keerukas ja vastavad seadmed väga kallid võrreldes

globaalse kiiritustiheduse mõõturiga, mille abil saab komponente eristamata üldise kiiritustiheduse määrata. [9]

Vaatamata sellele, et juhtme übermõõt on π korda suurem diameetrist ja korraga mõjutab päikese otsekiirgus poolt juhtme pinnast, on võrrandis võetud juhtme kiirgust vastuvõtvaks mõõduks selle diameeter. Põhjuseks on juhtme ümarast kujust tingitud olukord, milles osa kiirgust tabab juhtme pinda väiksema nurga all ja selle soojendav mõju juhtmele on selle tõttu väiksem.

Eesti oludes võib päikesekiirguse maksimaalseks kiiritustiheduseks lugeda ligikaudu 900 W m^{-2} [19] [20]. Sellised kiirgusolud esinevad suvel keskpäeva ajal selge ilmaga. Kiirguse absorptsioonitegur α sõltub juhtme pinna seisukorrast ja selle parameetri võimalikke väärtuseid on põhjalikumalt käsitletud jaotises 2.3.

3.1.4 Konvektiivne soojuskadu

Konvektsioon jaguneb loomulikuks konvektsiooniks, mis toimub tuulevaiksetes oludes, ja sundkonvektsiooniks, mis toimub õhu forsseeritud liikumisel soojusvahetuses osaleva objekti suhtes. Konvektsiooni analüütiline määramine on üsna keerukas ja erinevates allikates on esitatud mõnevõrra erinevad lähenemised konvektiivse soojusülekanne arvutamisele. CIGRÉ tehnilises brošüüris [10] toodud meetodika põhineb paljude soojusülekanne iseloomustavate hüdrodünaamika dimensioonita arvude kasutamisel. IEEE õhuliinide soojuslikku käitumist käsitleva standardi kõige uuemas versioonis [9] on konvektiivse soojusülekanne arvutamiseks esitatud tuuletunnelikatsete põhjal funktsiooni sobitamise kaudu tuletatud võrrandid.

3.1.5 CIGRÉ konvektsiooni arvutusmetoodika

Soojusülekanne võimsuse leidmiseks vajalikud hüdrodünaamilised arvud tuletatakse erinevatest õhkkeskkonda ja soojusvahetuses osalevat keha iseloomustavatest parameetritest [10]. Esiteks Nusselt'i arv, mis arvutatakse üldjuhul järgnevalt:

$$Nu = \frac{h_C D}{\lambda_f} \quad (3.4)$$

kus h_C – konvektiivse soojusülekanne koefitsient $\text{W m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$;

λ_f – õhu soojusjuhtivus $\text{W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

Reynolds'i arv, mis arvutatakse järgnevalt:

$$Re = \frac{\rho_r V D}{\nu_f} \quad (3.5)$$

kus ρ_r – suhteline õhu tihedus $\rho_r = \rho_\delta / \rho_0$, kus ρ_0 on õhu tihedus merepinnal ja ρ_δ on õhu tihedus vaadeldavas kohas;

V – tuule kiirus m s^{-1} ;

ν_f – õhu kinemaatiline viskoossus $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$.

Grashof'i arv, mis arvutatakse järgnevalt:

$$Gr = \frac{D^3 (\theta_s - \theta_a) g}{(\theta_f + 273) \nu_f^2} \quad (3.6)$$

kus θ_s – juhtme pinna temperatuur $^\circ\text{C}$;

θ_a – ümbritseva keskkonna temperatuur $^\circ\text{C}$;

g – raskuskiirendus $9,807 \text{ m s}^{-2}$;

$\theta_f = 0,5(\theta_s + \theta_a)$ on juhtme ja ümbritseva õhu piirkihi temperatuur $^\circ\text{C}$.

Prandtl'i arv, mis arvutatakse üldjuhul järgnevalt:

$$Pr = \frac{c_p \mu}{\lambda_f} \quad (3.7)$$

kus c_p – õhu isobaariline erisoojus $\text{J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$;

μ – õhu dünaamiline viskoossus $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$;

Prandtl'i arvu saab arvutada ka empiirilisel vastavalt valemile 3.8:

$$Pr = 0,715 - 2,5 \cdot 10^{-4} \theta_f \quad (3.8)$$

Konvektiivse soojusülekanne võimsus leitakse juhtme korral järgnevalt:

$$P_C = \pi \lambda_f (\theta_s - \theta_a) Nu \quad (3.9)$$

Seejuures erineb Nusselt'i arv sund- ja loomuliku konvektsiooni korral. Selle arvu väärtused saab arvutada vastavalt kasutades valemeid 3.10 ja 3.14.

$$Nu = B_1 Re^n \quad (3.10)$$

kus B_1 ja n on konstandid, mille väärtused sõltuvad juhtme pinna omadustest ja Reynolds'i arvu väärtusest vastavalt tabelile 3.1.

Juhtme pinna karedustegur R_f arvutatakse selle välisdiameetri ja välise kihi traadi diameetri d_{Al} järgi vastavalt valemile 3.11:

$$R_f = \frac{d_{Al}}{2(D - d_{Al})} \quad (3.11)$$

Tabel 3.1 Konstantide B_1 ja n määramine erinevate juhtme pinna kareduste ja Reynolds'i arvu väärtuste korral [10]

Pinna tüüp	Reynolds'i arv Re		B_1	n
	alates	kuni		
Kõik keerutatud juhtmed	10^2	$2,65 \cdot 10^3$	0,641	0,471
Keerutatud juhe, $R_f \leq 0,05$	$2,66 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^4$	0,178	0,633
Keerutatud juhe, $R_f > 0,05$	$2,66 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^4$	0,048	0,800

Sundkonvektsiooni korral on vaja arvestada lisaks veel tuule suunaga juhtme telje suhtes, sest see mõjutab oluliselt soojusülekanne intensiivsust. Nusselt'i arvu sõltuvust tuule suunast iseloomustab valem 3.12:

$$Nu_\delta = Nu_{90} [A_1 + B_2 (\sin \delta)^{m_1}] \quad (3.12)$$

kus δ – nurk tuule suuna ja juhtme pikitelje vahel;

$A_1=0,42$; $B_2= 0,68$ ja $m_1=1,08$ kui $0^\circ < \delta < 24^\circ$;

$A_1=0,42$; $B_2= 0,58$ ja $m_1=0,90$ kui $24^\circ < \delta < 90^\circ$.

Väikese tuulekiiruse korral ($V < 0,5 \text{ m s}^{-1}$) tuleks kasutada korrigeeritud Nusselt'i arvu väärtust Nu_{cor} , sest sellisel juhul puudub eelistatud tuule suund.

$$Nu_{cor} = 0,55 Nu_{90} \quad (3.13)$$

Loomuliku konvektsiooni korral sõltub Nusselt'i arv Grashof'i arvu ja Prandtl'i arvu korrutise väärtusest:

$$Nu = A_2 (Gr \cdot Pr)^{m_2} \quad (3.14)$$

kus konstandid A_2 ja m_2 sõltuvad korrutise $Gr \cdot Pr$ väärtusest vastavalt tabelile 3.2.

Õhu kinemaatilist viskoossust ja soojusjuhtivust saab määrata vastavalt empiiriliste valemite 3.15 ja 3.16 abil:

$$v_f = 1,32 \cdot 10^{-5} + 9,5 \cdot 10^{-8} \theta_f \quad (3.15)$$

$$\lambda_f = 2,42 \cdot 10^{-2} + 7,2 \cdot 10^{-5} \theta_f \quad (3.16)$$

Tabel 3.2 Konstantide A_2 ja m_2 sõltuvus Rayleigh' arvu $Gr \cdot Pr$ väärtusest [10]

$Gr \cdot Pr$		A_2	m_2
alates	kuni		
10^2	10^4	0,850	0,188
10^4	10^6	0,480	0,250

Väikese tuulekiiruse korral alla $0,5 \text{ m s}^{-1}$ on soovituslik arvutada konvektiivne soojusülekanne kolmel erineval viisil ja valida nende hulgast suurima väärtusega tulemus:

- 1) Sundkonvektsioon valemite 3.12 ja 3.9 järgi, arvestusega, et tuule suund on 45° juhtme telje suhtes;
- 2) Sundkonvektsioon 3.13 ja 3.9 järgi;
- 3) Loomulik konvektsioon 3.14 järgi.

3.1.6 IEEE konvektsiooni arvutusmetoodika

Allikas [9] on lähenetud konvektiivse soojusülekanne arvutamisele teisiti. Sundkonvektsiooni soojuskao arvutamiseks väikestel tuulekiirustel on soovitatud kasutada valemit 3.17:

$$P_C = K_{nurk} (1,01 + 1,35 \cdot Re^{0,52}) k_f (\theta_s - \theta_a) \quad (3.17)$$

kus K_{nurk} – tuule suuna tegur;

k_f – õhu soojusjuhtivus piirikihi temperatuuril $\theta_f \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

Suurtel tuulekiirustel annab täpsema tulemuse valem 3.18:

$$P_{Cf} = K_{nurk} \cdot 0,74 \cdot Re^{0,6} k_f (\theta_s - \theta_a) \quad (3.18)$$

Soovituslik on arvutada konvektiivse soojusülekanne võimsus kasutades nii valemit 3.17 kui ka 3.18 ja valida nendest suurem.

Tuule suuna teguri väärtus sõltub tuule suuna ja juhtme telje vahelisest nurgast:

$$K_{nurk} = 1,194 - \cos \delta + 0,194 \cos 2\delta + 0,368 \sin 2\delta \quad (3.19)$$

Loomuliku konvektsiooni võimsuse arvutamiseks tuleks kasutada valemit:

$$P_{cn} = 3,645 \cdot \rho_0^{0,5} D^{0,75} (\theta_s - \theta_a)^{1,25} \quad (3.20)$$

3.1.7 Kiirguslik soojuskadu

Kiirgusliku soojuskaod võimsus sõltub juhtme diameetrist, pinna seisukorrast ja keskkonna temperatuurist vastavalt võrrandile 3.21, mis tuletatakse võrrandist 2.2.

$$P_r = \pi D \varepsilon \sigma [(\theta_s + 273)^4 - (\theta_a + 273)^4] \quad (3.21)$$

Juhtme välise kihi traatide ümbritsevale keskkonnale avatud pindala on mõnevõrra suurem juhtme mudelina käsitletava silindri diameetri kaudu arvatud külgpinnast. Seejuures ei ole efektiivne kiirgav pind oluliselt suurem, sest traatide külgpinnalt lähtuv kiirgus on osaliselt blokeeritud kõrval asuvate traatide poolt.

3.1.8 Soojusülekanne koroonalahendustest ja aurumisest

Praktilistes arvutustes võib ignoreerida koroonast põhjustatud soojenemist (P_i), sest selle komponendi väärtus on suur eelkõige vihmajärgu ja härmatise esinemisel, misjuhul on vee aurumisest, tugevast tuulest ja madalast välistemperatuurist põhjustatud soojuskaod palju suuremad ja sellistel tingimustel ei tõuse õhuhüliinijuhtme temperatuur tavapärase talitluse käigus ohtlikult kõrgeks.

Samuti ignoreeritakse vee aurumisest põhjustatud jahtumist (P_w), sest see muutub oluliseks ainult juhul, kui juhe saab märjaks näiteks vihmajärgu tõttu. Veepiiskade olemasolu juhul ümbritsevas õhus ei mõjuta oluliselt jahutustingimusi. [10]

3.2. Soojuslik siirdeprotsess

Siirdeprotsessi käigus ei ole juhe soojuslikus tasakaalus ja selle tõttu ei saa valemit 3.1 rakendada juhtme soojusliku käitumise uurimiseks. Osa soojust kulub juhtme siseenergia muutmisele ja seda protsessi kirjeldab diferentsiaalvõrrand 3.22, milles on juba arvestatud eelnevates jaotistes mainitud lihtsustusi, st koroon ja aurumise mõju juhtme soojuslikus käitluses on ignoreeritud.

$$C \frac{d\theta_j}{dt} = P_J + P_M + P_S - P_C - P_r \quad (3.22)$$

kus C – juhtme soojusmahtuvus $J \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ m}^{-1}$;

θ_j – juhtme temperatuur $^\circ\text{C}$;

t – aeg s.

Antud võrrand eeldab seda, et temperatuur kogu juhtme ulatuses on ühesugune. Samas tuleb arvestada, et voolu hüppelisel suurenemisel on enamus soojust pärit voolust põhjustatud kadudest alumiiniumtraatides ja soojust ülekande terasest südamikutraatidele võtab aega. Aeglase protsesside korral võib arvestada kogu juhtme soojusmahtuvust, mis moodustub alumiinium- ja terastraatide soojusmahtuvusest:

$$C = c_{Al}m_{Al} + c_{Fe}m_{Fe} \quad (3.23)$$

kus c_{Al} – alumiiniumi erisoojus $\text{J kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$;

m_{Al} – alumiiniumtraatide mass kg m^{-1} ;

c_{Fe} – südamikutraatide erisoojus $\text{J kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$;

m_{Fe} – südamikutraatide mass kg m^{-1} .

Kui vaadeldav ajavahemik on suhteliselt lühike, siis tuleks arvestada ka soojusülekanne kiirust, mis toimub alumiiniumtraatide ja südamiku vahel ajakonstandiga, mis jääb suurusjärku 10...20 s olenevalt juhtme margist. Soojuslik ajakonstant defineeritakse antud siirdeprotsessi korral ajana, mille jooksul temperatuur saavutab 63,2% muutusest siirdeprotsessi alg- ja lõpptemperatuuri vahel (tuleneb seosest $0,632 \approx 1 - e^{-1}$). [9]

3.3. Adiabaatiline soojenemine

Adiabaatilise protsessi kutsutakse esile lühis, mis põhjustab juhtme väga kiire soojenemise voolu aktiivkadude tõttu. Lühikese kestuse tõttu jäetakse väliskeskkonnaga toimuva soojusvahetuse mehhanismid vaatlemata ja arvestatakse, et:

$$c_{Al}m_{Al} \frac{d\theta_j}{dt} = P_j \quad (3.24)$$

Adiabaatilise protsessi täpset analüütilist kirjeldamist raskendavad erinevad asjaolud, kõige olulisemad on:

- Voolutugevuse muutumine lühise alguses;
- Juhtme takistuse sõltuvus temperatuurist;
- Voolutiheduse ebahühtlane jaotumine juhtme alumiiniumtraatide kihtide vahel.

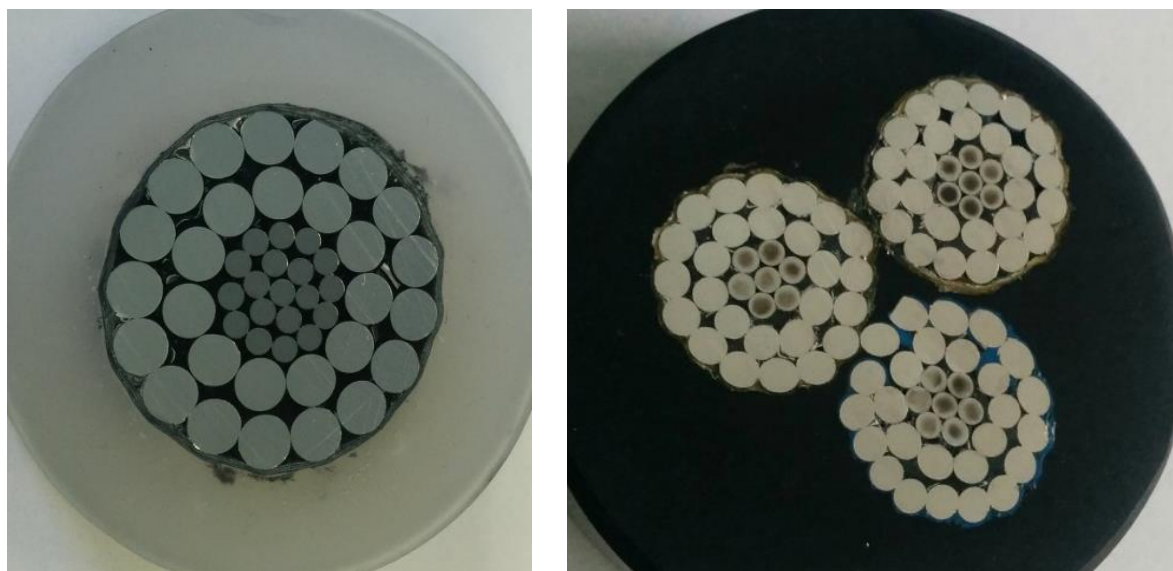
Praktikas tehakse arvutustes lihtsustusi, mille kohta on lähemalt kirjutatud eelkõige lühisvoole käsitlevates standardites. Antud töös adiabaatilist soojenemist lähemalt ei käsitleta.

4. Vananenud õhuliinijuhtmete soojusmahtuvus

4.1. Juhtmete üldiseloostus

Vananenud juhtmed, mida antud töö käigus uuriti, on Nõukogude Liidus toodetud terasalumiiniumjuhtmed margiga AC-400 ja AC-120. Mõlemad vastavad tänapäevasele ACSR tüüpi juhtmele ehituse ja omaduste poolest ja arv juhtmemargi nimes viitab selle alumiiniumtraatide summaarsele ristlõike suurusele.

Esimene uuritav juhe AC-400 pärineb 330 kV liinilt L354 Tsirguliina-Valmiera, kust see eemaldati 2015. aastal. Juhe paigaldati liinile aastal 1960 ehk töös on see olnud ligikaudu 55 aastat. Juhe koosneb 28 alumiiniumtraadist, mis paiknevad kahes kihis 19 terastraadist koosneva südamiku ümber. Juhtme ristlihv on esitatud joonisel 4.1 vasakul.



Joonis 4.1 Vananenud õhuliinijuhtmete ristlihvid. Vasakul AC-400, paremal AC-120 [21]

Teine uuritav juhe AC-120 pärineb 110 kV liinilt L188 Valgu-Vigala, kust see eemaldati 2015. aastal. Juhe paigaldati aastal 1976 ehk töös on see olnud ligikaudu 39 aastat. Juhe koosneb 26 alumiiniumtraadist, mis paiknevad kahes kihis 7 terastraadist koosneva südamiku ümber. Juhtme ristlihv on esitatud joonisel 4.1 paremal. Juhtmete mehaanilised ja geomeetriselised põhiparameetrid, sealhulgas alumiinium- ja terastraatide mõõtmed, arv ja jagunemine kihtide vahel ning andmed keerutuse sammu ja suuna kohta alumiiniumtraatide kihtides on toodud tabelis 4.1.

Tabel 4.1 Uuritavate vananenud juhtmete põhiparameetrid [21]

	AC-400	AC-120
Juhtme diameeter D , mm	28,5	15,5
Alumiiniumtraatide diameeter d_{Al} , mm	4,18	2,45
Alumiiniumtraatide arv N_{Al}	28 (11+17)	26 (10+16)
Terastraatide diameeter d_{Fe} , mm	2,12	1,85
Terastraatide arv N_{Fe}	19	7
Mass pikkusühiku kohta m_j , g m ⁻¹	1683	484
Arvutuslik Al ristlõige, mm ²	384	122
Arvutuslik terase ristlõige, mm ²	67	19
Sisemise Al kihi keerutuse samm λ_1 , cm	31	20
Sisemise Al kihi keerutussuund	vasak	vasak
Välise Al kihi keerutuse samm λ_2 , cm	31	20
Välise Al kihi keerutussuund	parem	parem

4.2. Soojusmahtuvuse määramise meetodika

Kehade soojusmahtuvuse määramine põhineb nende erisoojuse ja massi omavahelisel korrutamisel või soojusmahtuvuse otsesel mõõtmisel kehale ülekantud teatud suurusega soojushulga jagamisel selle poolt põhjustatud temperatuuritõusuga. Juhtmete soojusmahtuvuse otsene määramine ei ole rahuldava täpsusega võimalik juhtme iseloomuliku kuju tõttu ja samuti erineva tiheduse ja erisoojusega materjalide sisalduse tõttu.

Mainitud kitsenduste tõttu on loobutud antud töö käigus soojusmahtuvuse otsesest mõõtmisest ja antud parameeter määratakse arvutuslikult, võttes arvesse juhtme traatide mõõtmeid, keerutust ja tsingikihi ning määrde mõju või selle puudumist. Seejuures on alumiiniumist ja terasest komponentide soojusmahtuvuse eristamine oluline näiteks lühisvoolu mõju arvestamiseks juhtme temperatuurile.

4.3. Visuaalne analüüs

Mõlemal uuritaval juhtmel on selgelt nähtavad vananemise tunnused. Pinnakihi traatide välispind on tuhmunud ning väiksema valguse peegeldavusega kui uutel, kasutamata õhuliinijuhtmetel. Juhtme külge, mis liinil paiknes maapinna pool, on kaetud suures ulatuses musta kihiga (joonis 4.2), mis ilmselt on moodustunud juhtme traatide vahelt ajapikku välja valgunud määrde keemilise muundumise saadustest ja õhus esinenud saasteainetest. Juhtme ülemisel küljel musta värvusega alad praktiliselt puuduvad. Juhtme osal, mis töösolemise ajal paiknes vibratsioonisummuti kinnitusklemmi all, on toimunud ulatuslik pinna mustumine, välja arvatud traatide ja kinnitusklemmi kontaktpindadel (joonis 4.3). Mustumise märke on lisaks märgata välise alumiiniumtraatide kihi traatide külgedel, traatide kokkupuuteala lähedal (joonis 4.4).



Joonis 4.2 Vananenud õhuliinijuhe AC-400

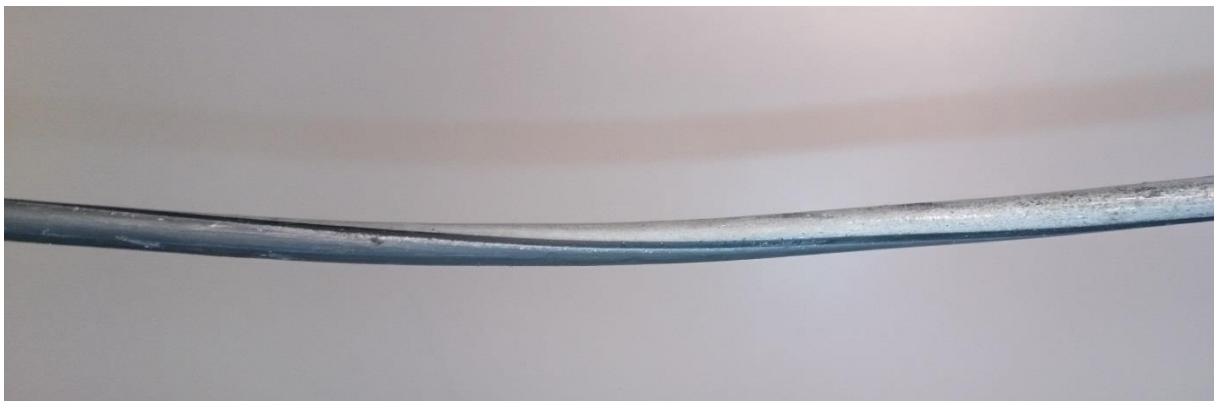
Mitmel pool juhtme välispinnal esineb väikeseid kriimustusi. Märgata võib ka suuremaid pinnadefekte, mis viitavad juhtme muljumisele. Tõenäoliselt on juhe kannatada saanud transpordi, liini ehituse ja mahavõtmise käigus. Sisemise alumiiniumtraatide kihi siseküljel, kokkupuutekohtades terastraatidega, on näha mitmetel alumiiniumtraatidel pikisuunalised

vaokujulised pinnadefektid. Ilmselt on tegu juhtme vibratsiooniga tekkinud fretingkorrosiooniga. Juhtme ristlõike uurimisel selgus ka asjaolu, et alumiiniumtraatide ristlõike kuju erineb märgatavalt ideaalsest ringist. Tegu võib olla tootmise eripäraga. Silmnähtavaid pragusid ja katkenud traate uuritud katsekehal ei esinenud.



Joonis 4.3 Vananenud õhuliinijuhe AC-400 vibratsioonisummuti kinnitusklemialune ala

Juhtme kihtide eemaldamisel selgus, et südamikutraatide ümber on säilinud mõningane määrdekiht. Määrdes esines tahkeid osakesi, mis on arvatavasti traatide omavahelise hõõrdumise tulemusena eraldunud ja määrdesse sattunud. Määre on omadustelt väga viskoosne, sarnanedes liitiummäärdega, kuid selle koostist täpsemalt ei uuritud.



Joonis 4.4 Vananenud õhuliinijuhtme AC-400 välise kihi alumiiniumtraadi tüüpiline pinna saastumismuster

4.4. Soojusmahtuvuse arvutused

Traatide massi ja sellest lähtuvalt ka juhtme soojusmahtuvuse täpsemaks määramiseks on vaja arvestada traatide paiknemisest keerutatud juhtmes tingitud lisapikkust. Kui vaadelda ainult

ühthe alumiiniumtraati juhtmes, moodustab see kuju poolest heeliksi, mistõttu väliste kihtide alumiiniumtraatide pikkus 1 m juhtmelõigu kohta on mõnevõrra suurem kui 1 m. Lisapikkust arvestab pikkustegur k_i , mida saab arvutada järgmiselt [2]:

$$k_i = \sqrt{1 + \left(\frac{\pi D_i}{\lambda_i}\right)^2} \quad (4.1)$$

kus D_i – i -nda kihi keskmine diameeter m.

Juhtme soojusmahtuvuse C arvutamiseks vastavalt võrrandile 3.23 on vaja teada selle komponentide masse ja erisoojuseid. Juhtmete massi leidmiseks saab kasutada traatide ruumalasid ja tihedusi, mistõttu soojusmahtuvuse arvutamiseks oleks vaja kasutada mõlemast materjalist traatide arvu arvestavat võrrandit 4.2. Seejuures on alumiiniumtraatide korral rakendatud võrrandi 4.1 järgset pikkustegurit. Südamikutraatide puhul on keerutamisest tulenev lisapikkus tühiselt väike kihtide väikese keerutuse diameetri tõttu ja selle võib arvestamata jätta.

$$C = \sum_{i=1}^{N_{Al}} k_i \pi \left(\frac{d_{Al}}{2}\right)^2 \rho_{Al} c_{Al} + N_{Fe} \pi \left(\frac{d_{Fe}}{2}\right)^2 \rho_{Fe} c_{Fe} \quad (4.2)$$

Valemi rakendamisel selgub, et AC-400 juhtme alumiiniumtraatide kogumass on 1063 g m^{-1} ja soojusmahtuvus $953 \text{ J } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ m}^{-1}$. Terastraatide kogumass on 522 g m^{-1} ja soojusmahtuvus $251 \text{ J } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ m}^{-1}$. Kogu juhtme mass on arvutuslikult 1585 g m^{-1} ja soojusmahtuvus $1204 \text{ J } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ m}^{-1}$. Siinkohal tuleks pöörata tähelepanu asjaolule, et juhtme massi määramisel kaaluga mõõdetud tulemus on 99 g võrra ehk 6,2% suurem. See on põhjustatud osaliselt sellest, et juhtme südamikutraadid on määratud kaitsva suure viskoossusega määrdega. Lisaks sellele on aja jooksul traatide küljest eraldunud metalliosakesi, mis esiteks vähendavad traatide läbimõõte ja teiseks suurendavad määrde koostisesse eraldunud tahkete osakeste massi. Ülejäänud erinevuse võib omistada traatide ebaühtlasest diameetrist tulenevatele erinevustele ja mõõtevigadele.

Kordusmõõtmiste põhjal tehti kindlaks, et südamiku mass moodustab AC-400 juhtme massist 34,4% ja AC-120 juhtme massist 32,6%. Seega täpsustatud andmetel AC-400 juhtme alumiiniumtraatide kogumass on 1104 g m^{-1} ja soojusmahtuvus $990 \text{ J } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ m}^{-1}$. Terastraatide kogumass on 579 g m^{-1} ja soojusmahtuvus $278 \text{ J } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ m}^{-1}$. Kogu juhtme soojusmahtuvus on $1268 \text{ J } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ m}^{-1}$.

4.5. Tsingikihi mõju juhtme soojusmahtuvusele

Lisaks alumiiniumile, terasele ja määrdetele leidub juhtmes ka tsinki terastraatide kattekihis. Järgnevalt on esitatud analüüs tsingi mõjust juhtme soojusmahtuvusele.

Vananenud juhtmetega tehtud katsetest on teada, et tsingikihi paksus on ligikaudu $h_{Zn}=10\ \mu\text{m}$ [22]. Tsingi tihedus tahkes olekus on $\rho_{Zn}=7133\ \text{kg m}^{-3}$ [23] ja erisoojus $377\ \text{J kg}^{-1}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ [24]. Seega tsingi mass m_{Zn} juhtmes on:

$$m_{Zn} = N_{Fe}\pi d_{Fe}h_{Zn}\rho_{Zn} = 19 \cdot \pi \cdot 2,12 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-5} \cdot 7,133 \cdot 10^3 \approx 9,03 \cdot 10^{-3}\ \text{kg m}^{-1}$$

ehk ligikaudu $9\ \text{g m}^{-1}$. Samas tuleks arvestada, et tsingikiht sisaldab ka korrosiooniprodukte (jaotis 2.5), mille tihedus ja erisoojus on väiksemad kui tsingil või terasel (tabel 4.2). Erisoojuse ja tiheduse korrutamisel saab erisoojuse ruumala järgi ρ_V , mis iseloomustab materjali ruumalaühiku soojusmahtuvust.

$$\rho_V = \rho c \quad (4.3)$$

Tsingi ja selle korrosiooniproduktide erisoojus ruumala järgi on madalam kui terasel (tabel 4.2), seega tsingikihi soojusmahtuvus on mõnevõrra väiksem kui sama ruumalaga terase soojusmahtuvus, moodustades sellest ligikaudu 75%. Kui jätta arvestamata tsingikihi olemasolu ja lugeda, et südamikutraadid koosnevad kogu ulatuses terasest, on tulemuseks saadav soojusmahtuvuse hinnang mõnevõrra suurem tegelikust väärtusest. Samas arvestades, et tsingikiht on soojuslike omaduste poolest väga sarnane terasele ning tsingi kogumass moodustab alla 1% juhtme kogumassist, võib soojusmahtuvuse arvutamisel eristamata jätta terase ja tsingi, tegemata seejuures olulist viga juhtme südamikutraatide soojusmahtuvuse määramisel.

Tabel 4.2 Terase, tsingi ja tsingi korrosiooniproduktide tihedus, erisoojus ja erisoojus tiheduse järgi [23] [25] [26] [27] [28]

Aine	Tihedus (kg m^{-3})	Erisoojus ($\text{J kg}^{-1}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)	Erisoojus tiheduse järgi ($\text{kJ m}^{-3}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)
teras	7780	481	3742
Zn	7133	377	2689
ZnO	5605	495	2774
ZnCO ₃	4400	636	2798

4.6. Määrde mõju juhtme soojusmahtuvusele

Määrde olemasolu juhtmes tuleks sarnaselt tsingile arvesse võtta ja analüüsida kui olulisel määral see soojusmahtuvusele mõju avaldab. Juhet määratakse vastavalt vajadusele erinevatel viisidel ja määrimise eesmärk on juhtmele lisakaitset anda korrosiooni vastu. Tootmise käigus määratakse olenevalt vajadusest ainult terassüdamik, südamik ja osa alumiiniumtraate või juhtme kõik kihid. Uuritavatel juhtmete kohta puuduvad andmed tootmisel teostatud määrimise kohta, määrdekiht on säilinud ainult terassüdamiku ümber.

Liinilt kogutud AC-400 näidistega tehtud katsetes on leitud, et määrdekihi mass on ligikaudu 5 g m^{-1} [22] ehk tunduvalt alla 1% juhtme kogumassist. Kuigi orgaaniliste ainete erisoojus on enamasti mõnevõrra suurem terase erisoojusest, ei saa määre väikese koguse tõttu märkimisväärset mõju avaldada kogu juhtme soojusmahtuvusele. Vahetult pärast paigaldamist, kui määrde mass on kümnetes grammides meetri kohta, võib väga täpsetes arvutustes osutada otstarbekaks arvestada selle mõju soojusmahtuvusele.

Kui vananenud juhtmetel arvestada tsingikihi ja määrde summaarset mõju juhtme soojusmahtuvusele, selgub, et kummagi arvestamata jätmisel tekkiv viga kompenseerib teise arvestamata jätmisest tekkinud vea ära. Tsingi arvestamata jätmise ülehindab juhtme soojusmahtuvust ja määrde arvestamata jätmise alahindab soojusmahtuvust. Seejuures kummagi mõju üksikult võetuna on praktiliselt tühine. Järeldust, et vananenud ACSR õhuliinijuhtmete korral ei oma määrde ega tsingi sisaldus märkimisväärset mõju juhtme soojusmahtuvusele toetab ka asjaolu, et üheski kasutatud kirjanduse allikas ei käsitletud määrde ega tsingikihi mõju juhtme soojusmahtuvusele.

4.7. Erisoojuse temperatuurisõltuvuse mõju juhtme soojusmahtuvusele

Tuginedes asjaolule, et nii alumiiniumi kui terase erisoojus sõltub temperatuurist, ei saa anda ühest väärtust juhtme soojusmahtuvusele. Eespool esitatud soojusmahtuvuse väärtused eeldavad konstantset erisoojust, kuid kui tugineda allikas [10] toodud alumiiniumi ja terase parameetritele (erisoojus 20 °C juures $897 \text{ J kg}^{-1} \text{ °C}^{-1}$ ja $481 \text{ J kg}^{-1} \text{ °C}^{-1}$ vastavalt) oleksid soojusmahtuvuse väärtused temperatuurisõltuvust arvestades järgmised:

1) AC-400

- Südamikutraadid $C_{Fe}(\theta) = 278 + 2,78 \cdot 10^{-2} (\theta - 20) \text{ J °C}^{-1} \text{ m}^{-1}$
- Alumiiniumtraadid $C_{Al}(\theta) = 990 + 0,376 (\theta - 20) \text{ J °C}^{-1} \text{ m}^{-1}$
- Kogu juhe $C(\theta) = 1269 + 0,404 (\theta - 20) \text{ J °C}^{-1} \text{ m}^{-1}$

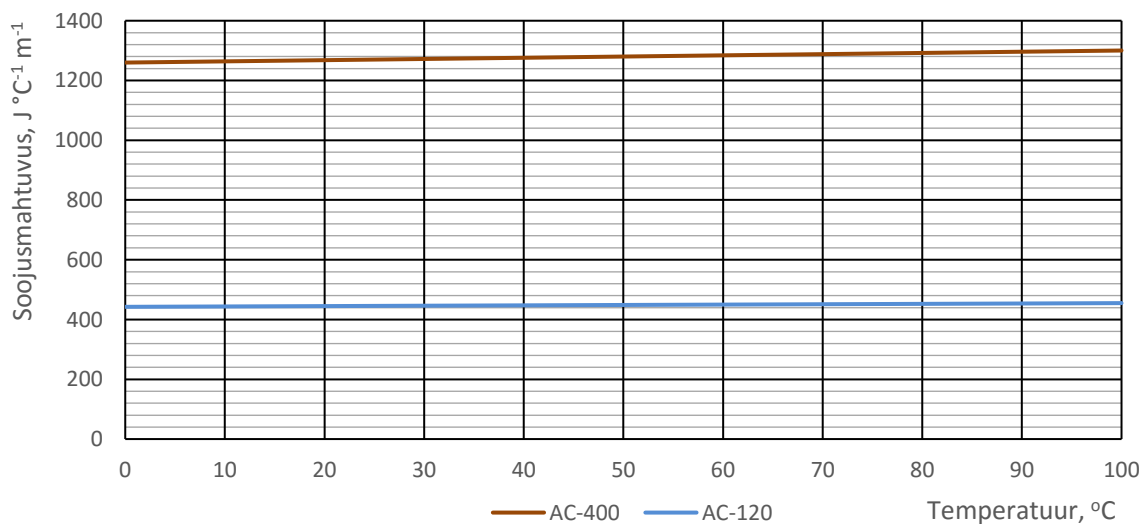
2) AC-120

- Südamikutraadid $C_{Fe}(\theta) = 80 + 8,01 \cdot 10^{-3} (\theta - 20) \text{ J } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ m}^{-1}$
- Alumiiniumtraadid $C_{Al}(\theta) = 285 + 0,108 (\theta - 20) \text{ J } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ m}^{-1}$
- Kogu juhe $C(\theta) = 365 + 0,116 (\theta - 20) \text{ J } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ m}^{-1}$

Kui võrrelda soojusmahtuvusi erinevatel temperatuuridel, selgub, et õhuliini tavatalitlusele vastavas temperatuurivahemikus ja kuni 100 °C juures need oluliselt ei muutu (joonis 4.5). Enamus soojusmahtuvuse muutusest on tingitud alumiiniumtraatidest nende suurema massi ja erisoojuse temperatuurisõltuvuse teguri tõttu (tabel 4.3).

Tabel 4.3 Õhuliinijuhtmete teras- ja alumiiniumtraatide soojusmahtuvus ning kogu soojusmahtuvus eri temperatuuridel

AC-400						
Temperatuur (°C)	0	20	40	60	80	100
Teras (J °C ⁻¹ m ⁻¹)	277	278	279	279	280	280
Alumiinium (J °C ⁻¹ m ⁻¹)	982	990	998	1005	1013	1020
Kogu juhe (J °C ⁻¹ m ⁻¹)	1260	1268	1276	1284	1292	1300
AC-120						
Temperatuur (°C)	0	20	40	60	80	100
Teras (J °C ⁻¹ m ⁻¹)	80	80	80	80	80	81
Alumiinium (J °C ⁻¹ m ⁻¹)	363	365	367	370	372	374
Kogu juhe (J °C ⁻¹ m ⁻¹)	443	445	447	450	452	455



Joonis 4.5 Uuritud õhuliinijuhtmete kogu soojusmahtuvuse temperatuurisõltuvus

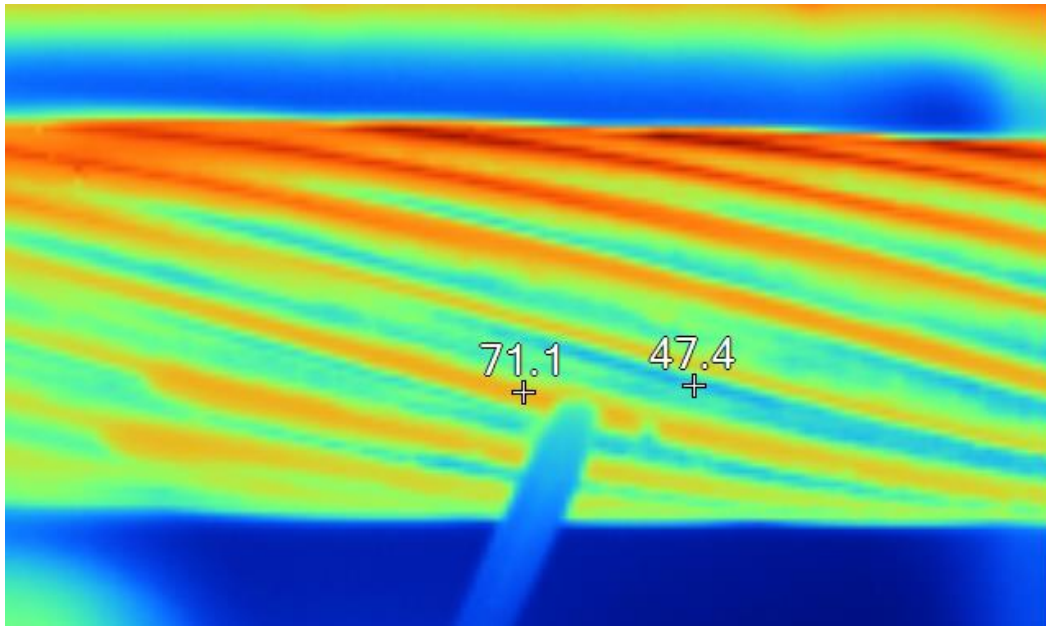
5. Vananenud juhtmete absorptsiooni- ja emissiooniteguri mõõtmine

Juhtmete soojuslike parameetrite mõõtmine on võrdlemisi keeruline erinevate soojusülekandeprotsesside samaaegsuse tõttu. Konvektsioon ja soojuskiirgus esinevad alati koos ning nende panust juhtmete jahtumisse tuleb arvutuste kaudu hinnata. Konvektsiooni mõju elimineerimiseks tuleks näiteks katseid teha vaakumkambris, mille ehitamine oleks ressursimahukas ja aeganõudev. Kiirgusliku soojusülekande elimineerimine soojusvahetusest ei ole praktiliselt üldse võimalik.

Seevastu on palju kergem eraldada juhtme temperatuuri tõstvate protsesside mõju. Näiteks kui juhet ei läbi elektrivool ja seda mõjutada elektromagnetilise kiirguse allikaga, soojeneb see ainult kiirguse mõjul. Sarnaselt saab juhtmest suure voolu läbijuhtimisel eristada selle takistusest põhjustatud soojenemist. Juhtme paigutamisel kõrge pingega alla saaks uurida koroonast põhjustatud soojenemist.

Kiirguslike absorptsiooni- ja emissioonitegurite mõõtmiseks on välja pakutud erinevat liiki katsetusi. Emissiooniteguri mõõtmise üks tüüpikatse põhineb termograafilisel meetodil. Selleks tuleb mõõta isotermilise keha temperatuuri termomeetri, termopaari või muu sarnase instrumendiga ja samaaegselt selle pinda termokaameraga jälgida. Termokaamera kuvab selle kaudu mõõdetava pinna temperatuuri lähtuvalt sensorisse sisenevast elektromagnetkiirgusest. Reaalsete kehade emissioonitegur on ühest väiksem ja erineb olenevalt pinna materjalist, mistõttu termokaamera näidu täpsustamiseks on vaja sisestada mõõdetava pinna emissiooniteguri väärtus. Kui erinevate emissiooniteguri väärtuste proovimisel leitakse selline, mille puhul termokaamera mõõtetulemus ja termomeetri mõõtetulemus ühtivad, on see õige emissiooniteguri väärtus. [29]

Toatemperatuurilähedasel temperatuuril metallide temperatuuri mõõtmisel selline meetod ei anna täpseid tulemusi, sest metallidel on suhteliselt väike emissioonitegur ja need peegeldavad väga hästi ümbritsevast keskkonnast lähtuvat kiirgust [30]. Kui proovida juhtme pinnatemperatuuri mõõta termokaameraga, selgub, et näiliselt on väga lähedal asuvate juhtme pinnapunktide temperatuur märkimisväärselt erinev (joonis 5.1). Selle tõttu vajab juhtmete absorptsiooni- ja emissioonitegurite määramine teistmoodi lähenemist. Järgnevalt on kirjeldatud kiirgustegurite määramise meetodikat, katseseadet, katse tulemusel määratud parameetrite väärtusi ja tulemuste analüüsi.



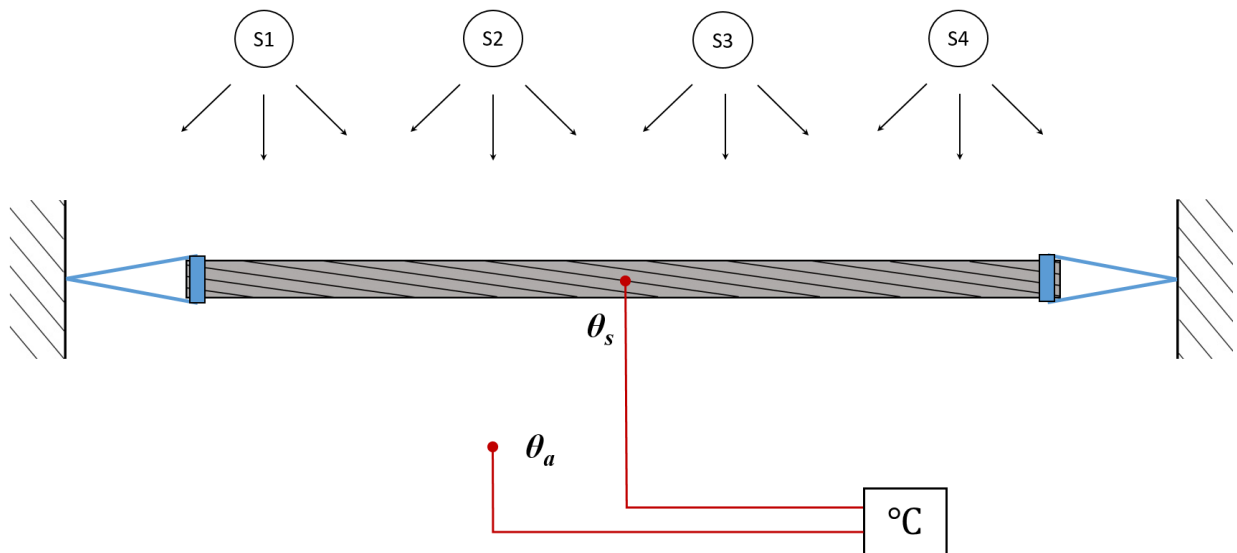
Joonis 5.1 Termokaamera abil määratud õhuliinijuhtme temperatuur traatide vahel (vasakpoolne näit) ja traatide peal (parempoolne näit), °C

5.1. Katseseade

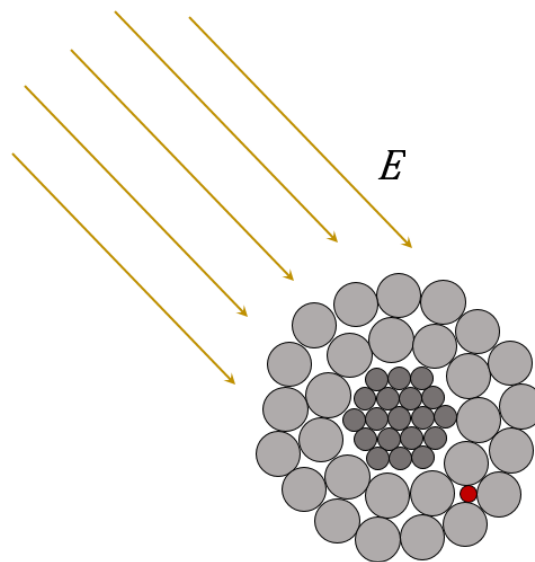
Ligikaudu 1 m pikkune juhtmelõik kinnitati horisontaalselt liikumatute tugipindade külge mõlemast otsast väikese soojusjuhtivusega paela abil. Juhtet pingutati, kuni see saavutas vaevumärgatava rippe ja oli kogu ulatuses paralleelne maapinnaga.

Juhtme soojendamiseks kasutati valgusallikatena nelja 500 W võimsusega halogeenlampi (S1...S4), millega on võimalik simuleerida sisetingimustes päikesekiirgusele sarnast kiirgusvoogu. Juhtme kaugus valgusallikatest valiti selliselt, et keskmine kiiritustihedus vastaks Eestis looduslikult esinevale suurimale päikesekiirguse intensiivsusele ja jääks sellest mõnevõrra suuremaks, et temperatuurierinevused paremini esile tuua (jaotis 3.4). Lambid asusid katsetatavast juhtmest ca 50 cm kaugusel.

Juhtme temperatuuri mõõdeti termopaari abil, mis sisestati juhtme välimiste alumiiniumtraatide vahele soojendavate lampide suhtes vastasküljele (joonis 5.3). Teine termopaar paigutati väljapoole lampide poolt valgustatavat ala ja see mõõtis katselabori õhutemperatuuri, et saaks jälgida juhtme temperatuuri ümbritseva keskkonna suhtes ja teha kindlaks, et ümbritseva katselabori temperatuur katse käigus oluliselt ei muutuks. Termopaarid ühendati multimeetrite Protek 4000 mõõtesisenditesse ja multimeetrid ühendati andmete salvestamise eesmärgil arvutiga, kasutades RS232 sideliidest. Tarkvaraliselt määrati termopaaride mõõtmiste ajasammuks 10 s, et registreerida temperatuuri muutumine piisava ajalise resolutsiooniga, samas vältides liigset andmete hulka.



Joonis 5.2 Juhtme pinna absorptsiooni- ja emissiooniteguri mõõteseadise põhimõtteline skeem



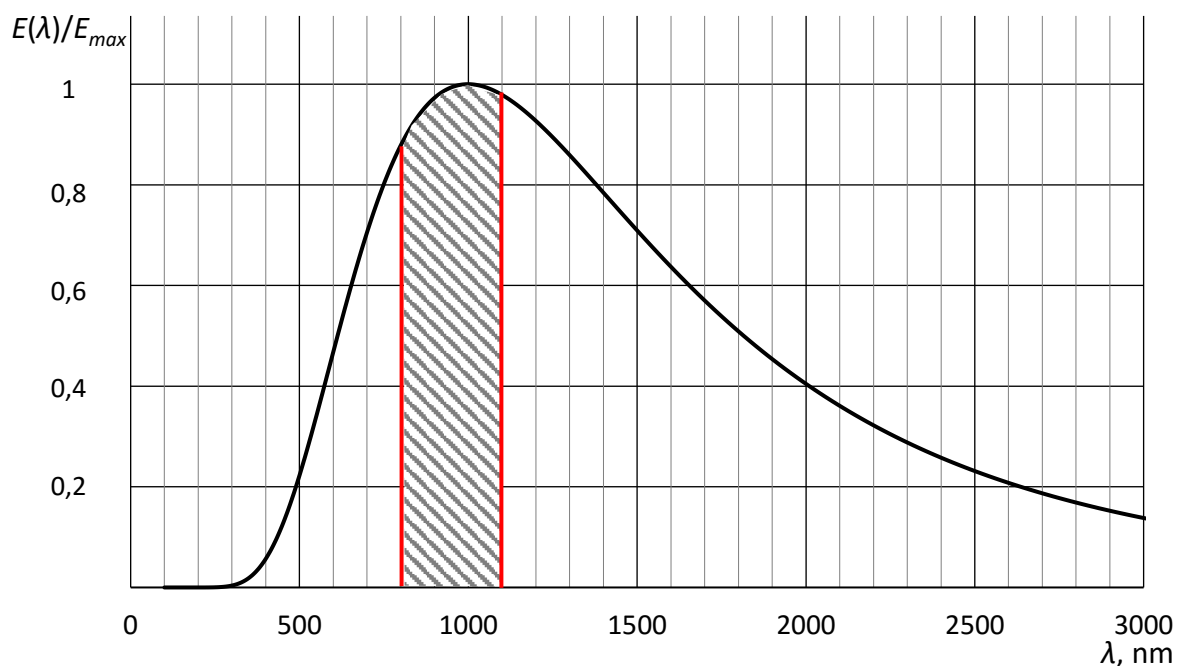
Joonis 5.3 Vaade juhtme ristlõikele piki juhtme telge. Punasega on märgitud ligikaudne termopaari mõõteotsa asukoht. E – juhtmele langev kiirgus valgusallikatest.

Juhtmele langeva elektromagnetkiirguse omaduste määramiseks kasutati valguse analüsaatorit JETI specbos 1201, millega saab mõõta valguskiirguse parameetreid spektri nähtavas osas ja fotomeeter-radiomeetrit PRC Krochmann Type 211, millega saab mõõta erinevate andurite abil erinevat tüüpi elektromagnetkiirguste parameetreid. Antud katses kasutati infrapunaandurit, mis mõõdab kiiritustihedust E_{Σ} (W m^{-2}) lainepikkuse vahemikus 800...1100 nm. Infrapunakiirguse kiiritustihedust E_{IR} mõõdeti 7 erinevas kohas piki juhtme asukohta ja leiti keskmine kiiritustihedus (tabel 5.1).

Tabel 5.1 Infrapunakiirguse kiiritustiheduse mõõtmise tulemused katsetatava õhuliinijuhtme asukohas

Nr.	1	2	3	4	5	6	7	Keskmine
E_{IR} (W m ⁻²)	206	229	253	243	268	245	215	237

Valgusanalüsaatoriga määrati kiirgusallikana kasutatavate halogeenlampide valguse temperatuuriks 2900 K. Selle järgi tuletati kogu halogeenlambi kiirgusspekter nähtava valguse ja infrapunakiirguse lainepikkuste piirkonnas, teades, et lambi kiirgus vastab musta keha kiirgusspektrile temperatuuriga 2900 K (joonis 5.4).



Joonis 5.4 Halogeenlambi kiirgusspekter temperatuuriga 2900 K ja selle infrapunaanduriga mõõdetud osa (viirutatud ala)

Spekter arvutati Planck'i seaduse järgi, mis iseloomustab musta keha kiirguse spektraalset energiatihedust $E(\lambda, T)$ (W m⁻³):

$$E(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1} \quad (5.1)$$

kus λ – lainepikkus nm;

T – absoluutne temperatuur K;

h – Planck'i konstant $6,626 \cdot 10^{-34}$ J s;

c – valguse kiirus vaakumis $299\,792\,458\text{ m s}^{-1}$;

k_B – Boltzmann'i konstant $1,381 \cdot 10^{-23}\text{ J K}^{-1}$.

Musta keha spekter sobitatakse teadaoleva kiiritustihedusega infrapunaanduri mõõtepiirkonnas. Kogu spektriulatust arvestava kiiritustiheduse saab valguse temperatuuri teades välja arvutada seose 5.2 kaudu päratu integraaliga:

$$E_{\Sigma} = \int_0^{\infty} \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} d\lambda \quad (5.2)$$

Kuna infrapunaanduri mõõtepiirkonnas oli kiiritustihedus teada, avaldub kogu kiiritustihedus järgmiselt:

$$E_{\Sigma} = \overline{E_{IR}} \frac{\int_0^{\infty} \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} d\lambda}{\int_{8 \cdot 10^{-7}}^{1,1 \cdot 10^{-8}} \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} d\lambda} \quad (5.3)$$

Lihtsuse mõttes ei leitud vajaminevaid väärtuseid mitte otsese integreerimise teel, vaid numbriliselt, kasutades esitatud funktsioonide tiheda diskreetimissammuga arvridasid. Lihtsustus põhineb määratud integraali definitsiooni (võrrand 6.4) rakendamisel. Selle kohaselt lõigul $[a;b]$ pideva funktsiooni $f(x)$ Riemann'i summa piirväärtus funktsiooni tükelduse suurima vahemiku Δi lähenemisel nullile on selle funktsiooni määratud integraal (punkt t_i on vahemikust Δi valitud).

$$\lim_{\max \Delta i \rightarrow 0} \sum_{i=1}^n f(t_i) \Delta i = \int_a^b f(x) dx \quad (5.4)$$

Näiteks saab võrrandis 5.2 kogu kiiritustiheduse tuletada piisava täpsusega ka võrrandi 5.5 kaudu:

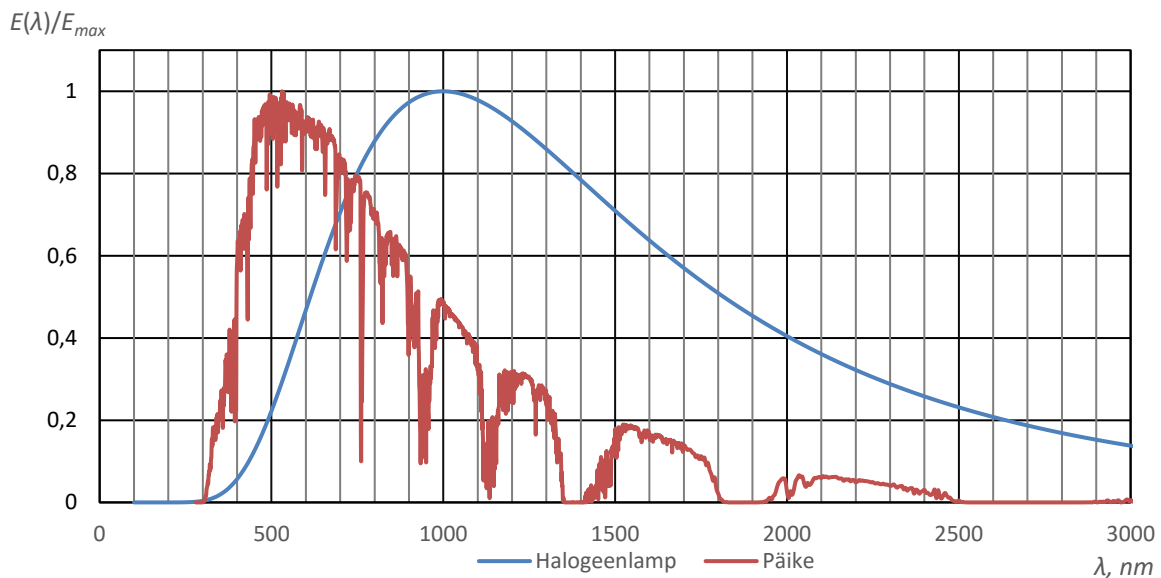
$$E_{\Sigma} = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{2\pi hc^2}{\lambda_i^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \Delta \lambda \quad (5.5)$$

Kogu kiiritustihedus juhtme asukohas on seega:

$$E_{\Sigma} = \overline{E_{IR}} \frac{\sum_{i=1}^{5 \cdot 10^{-6}} \frac{2\pi hc^2}{\lambda_i^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \Delta \lambda}{\sum_{i=8 \cdot 10^{-7}}^{1,1 \cdot 10^{-8}} \frac{2\pi hc^2}{\lambda_i^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \Delta \lambda} = 237 \frac{7,75 \cdot 10^{14}}{1,56 \cdot 10^{14}} = 1174 \text{ Wm}^{-2} \quad (5.6)$$

Antud valemis on kogu spektri arvutamisel arvesse võetud lainepikkusi alates 100 nm, sest vastavalt joonisel 5.4 esitatud spektrile ei kiirga halogeenlamp alla 300 nm lainepikkustel praktiliselt üldse. Ülemiseks piiriks on valitud 5000 nm, sest alates sellest lainepikkusest läheneb spektraalne energiatihedus nullile.

Päikesekiirguse spekter sarnaneb musta keha kiirgusega temperatuuril ca 5800 K [31]. Päikese spektris on seejuures osad lainepikkused puudu või vähendatud intensiivsusega, sest need neelduvad atmosfääris leiduvate gaaside molekulides [19]. Võrreldes halogeenlambi spektriga on päikesekiirguse spektri maksimum E_{max} väiksemal lainepikkusel vastavalt Wien'i nihkeseadusele [32] ning spektri energiatihedus on koondunud väiksematele lainepikkustele (joonis 5.5). Teatavad erinevused kiirgusspektrites esinevad, kuid kõike arvesse võttes on halogeenlamp küllalt kuluefektiivne viis kiirguse mõjul toimuva soojenemise laboratoorseks uurimiseks.



Joonis 5.5 Halogeenlambi valguse ja maapinnale jõudva päikesekiirguse [33] spektraalne jaotus

5.2. Katse protseduur

Arvutused lähtuvad põhimõttest, et juhul, kui juhtme temperatuur ei muutu, on seda soojendav soojusvoog ja jahutav soojusvoog võrdsed. Juhet soojendab lambist lähtuv kiirgus ja jahutab juhtme enda soojuskiirgus ja konvektiivne soojusülekanne ümbritseva õhuga. Konvektsiooni intensiivsus sõltub mitmetest teguritest, millest üks on tuule kiirus ja tuule suund. Kuna soojenemine toimus praktiliselt liikumatu õhuga ruumis, arvestati loomuliku konvektsiooniga ehk tuule mõju puudumisega.

Soojusülekande seaduspärasuste kohaselt toimub suurema temperatuurierinevusega kehade vahel intensiivsem soojusülekanne. Juhtme temperatuuri muutused antud katse käigus toimused aja jooksul, mis jäi märkimisväärselt pikemaks 1 minutist, mistõttu arvutustes on eeldatud, et juhe on isothermiline (juhtme kõikide komponentide temperatuur on igal ajahetkel võrdne).

Katse algab termopaaride mõõtmiseks ettevalmistamisega ja nende paigutamisega vastavatele kohtadele juhtme traatide vahele ja ümbritsevasse keskkonda. Käivitatakse temperatuurimõõtmised ja seejärel lülitatakse sisse halogeenlambid. Lampide kiirguse mõjul hakkab uuritava juhtme temperatuur tõusma, kuni jõuab soojusliku tasakaaluni. Pärast tasakaalu saavutamist lülitatakse lambid välja ja juhe jahtub toatemperatuurini. Infot juhtme absorptsiooni- ja emissioonitegurite kohta annavad järgmised katse käigus kogutavad andmed:

- Temperatuuri tõusu kiirus juhtme soojenemise alguses. Soojenemise algfaasis, kui juhe pole saavutanud ümbritseva õhu suhtes veel märkimisväärset temperatuurivahet, on soojusülekande intensiivsus väike ja selle võib arvestamata jätta. Sellest järeldub, et kui temperatuuri kasvu kiirus on kahel sarnasel juhtmel erinev, on kiirema temperatuurikasvuga juhtmel suurem absorptsioonitegur. Kui ühe juhtme absorptsioonitegur α_I on teada, saab teise juhtme absorptsiooniteguri α_{II} määrata järgmiselt:

$$\alpha_{II} = \frac{k_{II}}{k_I} \alpha_I \quad (5.7)$$

kus k_I – esimese juhtme temperatuuri kasvu kiirus ($^{\circ}\text{C s}^{-1}$);

k_{II} – teise juhtme temperatuuri kasvu kiirus ($^{\circ}\text{C s}^{-1}$);

- Temperatuur soojuslikus tasakaalus. Arvestades, et soojusliku tasakaalu korral on juhtme soojenemist ja jahtumist põhjustavad protsessid kvantitatiivselt võrdsed, saab arvutuslikult määrata absorptsiooniteguri või emissiooniteguri. Võrrand 3.3 omandab antud juhul kuju (5.8):

$$\alpha E_{\Sigma} D = \pi D \varepsilon \sigma [(\theta_s + 273)^4 - (\theta_a + 273)^4] + P_C \quad (5.8)$$

Seejuures võib konvektiivse soojusülekande P_C väljaarvutamiseks kasutada erinevaid meetodikaid. Tähelepanu tuleb seejuures pöörata, et kui kõik teised parameetrid on teada, jääb võrrandisse kaks tundmatut α ja ε , mis ongi otsitavad. Sellel põhjusel tuleb üks nendest enne valemi 5.8 rakendamist määrata ja teine välja arvutada sellele vastavalt $\alpha = f(\varepsilon)$ või $\varepsilon = f(\alpha)$.

- Temperatuuri languse kiirus juhtme jahtumise jooksul. Kui juhtmed jahtuvad, toimub konvektiivne ja kiirguslik soojusülekanne ümbritsevasse keskkonda. Kui võrrelda kahe sarnase juhtme (mis erinevad ainult emissiooniteguri poolest) jahtumise graafikut, siis suurema emissiooniteguriga juhtme graafik on järsema langusega võrdse temperatuuri korral. Konvektiivne jahtumine on mõlemal juhtmel igal temperatuuril sama, eeldusel, et ümbritseva keskkonna temperatuur on sama. Emissiooniteguri kvantitatiivne määramine jahtumise järgi oleks üsna keerukas, sest tulemus sõltub oluliselt konveksiooni arvutamiseks valitud meetodikast. Lisaks on konvektiivse soojusülekanne osakaal jahtumisprotsessidest madalatel temperatuuridel suurem kiirgusliku soojusülekanne osakaalust.

Tulenevalt eeltoodud kitsendustest on vaja katsemetoodika kontrollimiseks lisaks katsetatavatele juhtmetele viia läbi katsed teadaoleva absorptsiooni- ja emissiooniteguri väärtusega kontrollkatsekehaga. Antud töös toimiti selliselt, et esmalt viidi katse läbi mõlema uuritava juhtme ca 1 m pikkuse lõiguga ning seejärel kaeti mõlemad juhtmed õhukese musta värvikihiga ja korrati soojendus tsüklit. Musta värvi kohta on teada, et selle absorptsioonitegur $\alpha \approx 0,95$ ja emissioonitegur $\varepsilon \approx 0,95$ [34]. Seega on võimalik värvitud ja värvimata juhtme temperatuuri tõusude abil määrata vananenud juhtme absorptsioonitegur. Kuna absorptsioonitegur on teada, saab tuletada võrrandist 5.8 emissiooniteguri arvutamise valemi:

$$\varepsilon = \frac{\alpha E_{\Sigma} D - P_C}{\pi D \sigma [(\theta_s + 273)^4 - (\theta_a + 273)^4]} \quad (5.9)$$

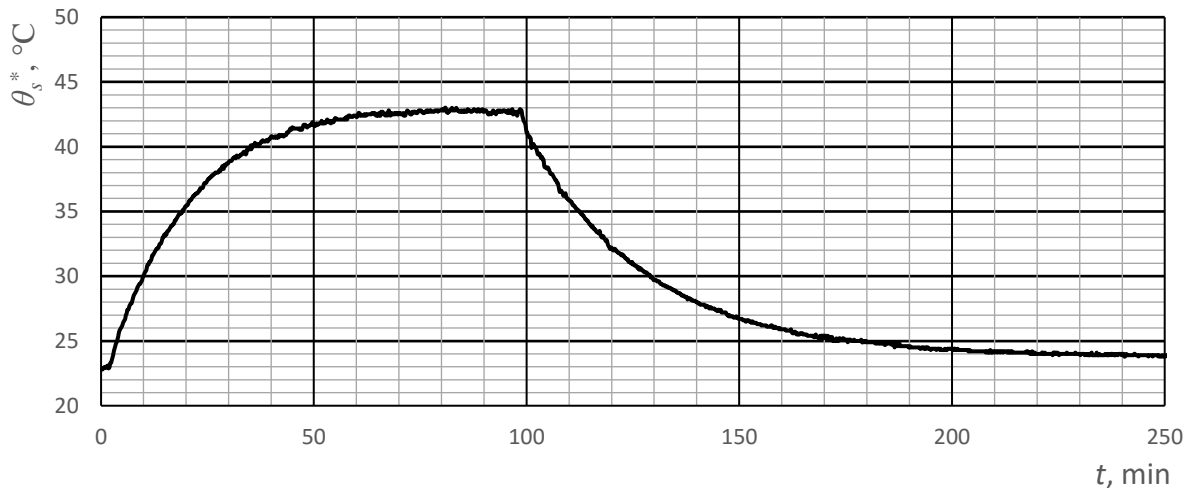
Katsemeetodi kontrollimiseks saab võrrelda mustaks värvitud juhtmega võrrandi 5.9 kasutamisega saadud emissiooniteguri selle teadaoleva väärtusega.

5.3. Katse tulemused

Eksperimendi käigus registreeriti mõlema juhtme temperatuuri aegsõltuvuse graafikud. Üks katsetsükkel koosnes toatemperatuuril oleva juhtme soojendamise lampide abil soojusliku tasakaalu saavutamiseni ning pärast lampide väljalülitamist juhtmete toatemperatuurini jahtumiseni. AC-400 juhtmega teostatud katse temperatuurigraafik on esitatud joonisel 5.6. Kuivõrd katselabori temperatuur lampide põlemise ajal mõnevõrra kasvas, on temperatuuri muutumine katsetulemuste järeltöötusega kompenseeritud. Soojusvahetuse seisukohast on oluline juhtme ja ümbritseva keskkonna temperatuuri vahe. Esitatud graafik iseloomustab ainult juhtme ületemperatuuri õhu suhtes, kusjuures ümbritseva keskkonna temperatuuriks on arvestatud juhtme temperatuur mõõtmiste alghetkel:

$$\theta_s^*(t) = \theta_s(t) - \theta_a(t) + \theta_s(0) \quad (5.10)$$

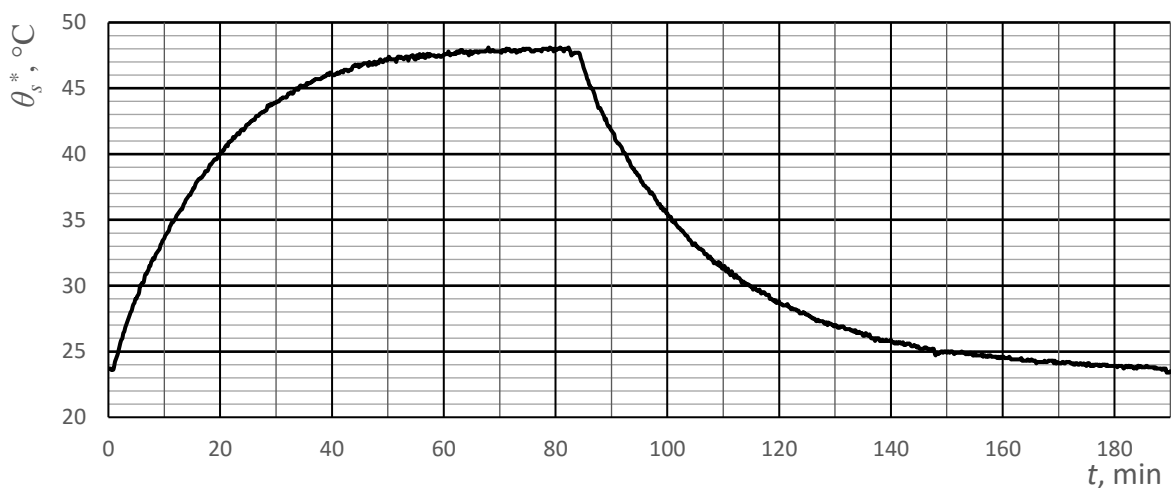
Graafikult on näha, et lambid lülitati sisse ajahetkel $t=2$ min ja juhe saavutas soojusliku tasakaalu ca 80 min möödudes katse algusest. Lambid lülitati välja ajahetkel $t=98$ min ja juhtme temperatuur stabiliseerus uuesti ligikaudu 240 min möödumisel katse algusest.



Joonis 5.6 Juhtme AC-400 temperatuuri aegsõltuvuse graafik soojenemistsükli katses

Soojenemiskatse tulemused:

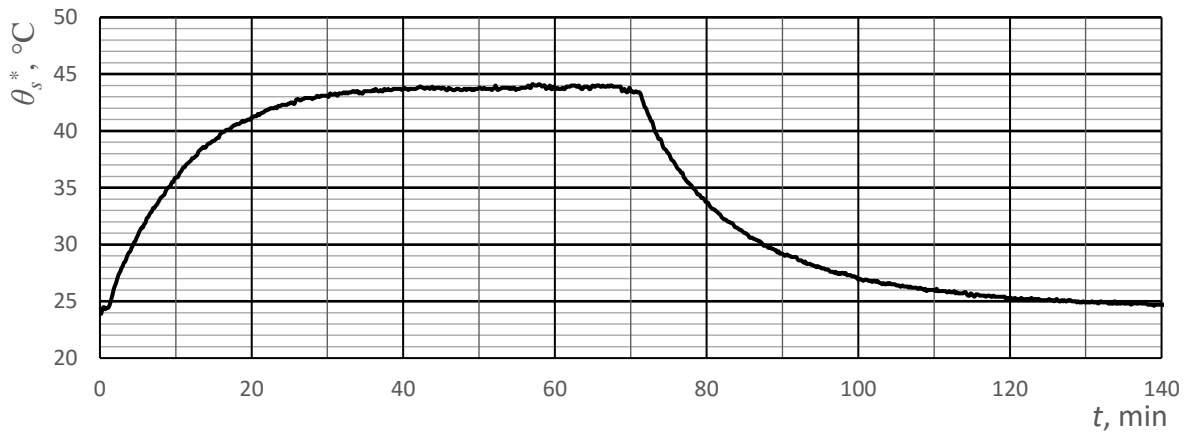
- Keskkonna temperatuur: 22,8 °C
- Juhtme püsiseisundi temperatuur: 42,7 °C
- Temperatuuri keskmine muutumise kiirus soojenemise algfaasis: 0,0190 °C s⁻¹
- Temperatuuri keskmine muutumise kiirus jahtumisel 40 °C juures: -0,0101 °C s⁻¹



Joonis 5.7 Mustaks värvitud juhtme AC-400 temperatuuri aegsõltuvuse graafik soojenemistsükli katses

Soojenemiskatse tulemused:

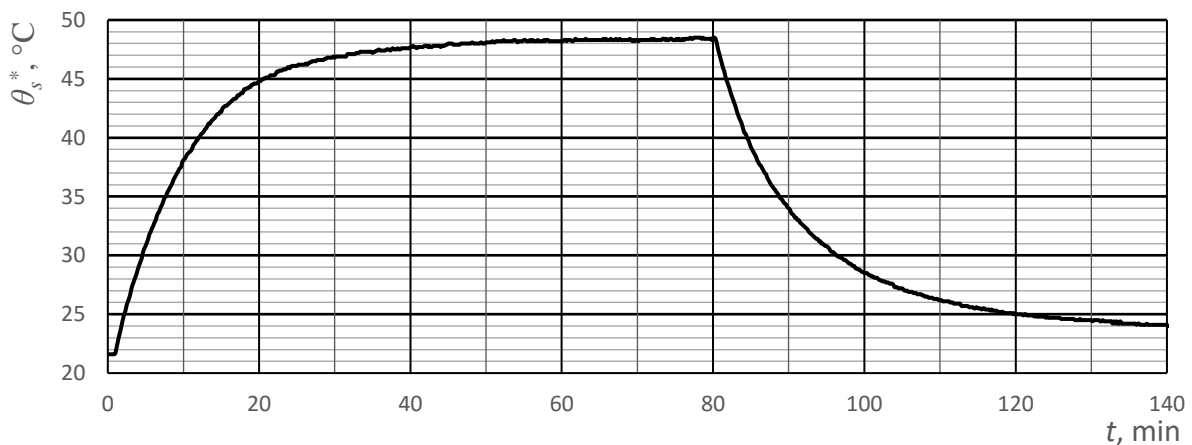
- Keskkonna temperatuur: 23,4 °C
- Juhtme püsiseisundi temperatuur: 48,1 °C
- Temperatuuri keskmine muutumise kiirus soojenemise algfaasis: 0,0271 °C s⁻¹
- Temperatuuri keskmine muutumise kiirus jahtumisel 40 °C juures: -0,0130 °C s⁻¹



Joonis 5.8 Juhtme AC-120 temperatuuri aegsõltuvuse graafik soojenemistsükli katses

Soojenemiskatse tulemused:

- Keskkonna temperatuur: 23,9 °C
- Juhtme püsiseisundi temperatuur: 44,1 °C
- Temperatuuri keskmine muutumise kiirus soojenemise algfaasis: 0,0349 °C s⁻¹
- Temperatuuri keskmine muutumise kiirus jahtumisel 40 °C juures: -0,0195 °C s⁻¹



Joonis 5.9 Mustaks värvitud juhtme AC-120 temperatuuri aegsõltuvuse graafik soojenemistsükli katses

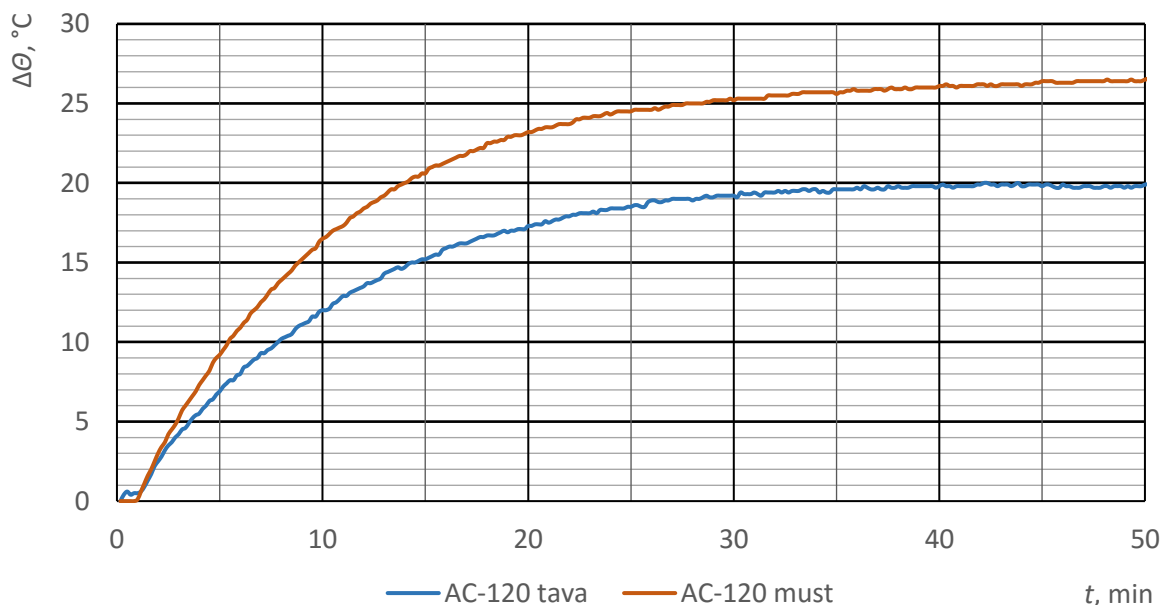
Soojenemiskatse tulemused:

- Keskkonna temperatuur: 23,8 °C
- Juhtme püsiseisundi temperatuur: 48,5 °C
- Temperatuuri keskmine muutumise kiirus soojenemise algfaasis: 0,464 °C s⁻¹
- Temperatuuri keskmine muutumise kiirus jahtumisel 40 °C juures: -0,0238 °C s⁻¹

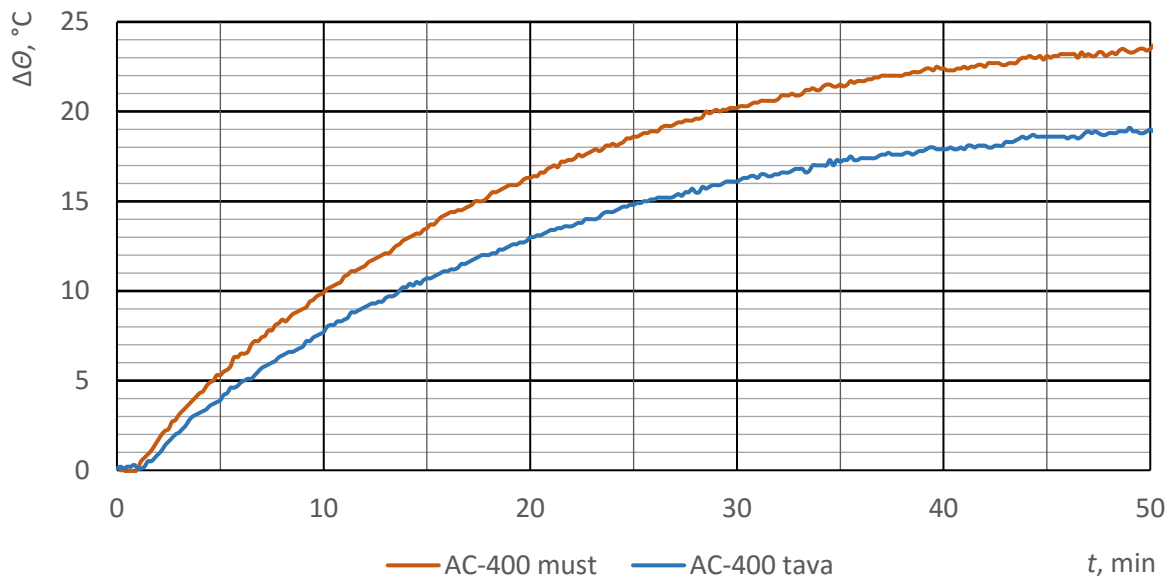
5.4. Katsekehade soojenemise ja jahtumise võrdlus

Järgnevalt on esitatud ühel graafikul koos tavalise juhtme ja värvitud juhtme temperatuuri muutumine soojenemise ja jahtumise kestel. Seeläbi tekib parem ülevaade katsetulemustest ja saab kvalitatiivselt hinnata absorptsiooni- ja emissioonitegurite väärtuseid ning tekitada võrdusalus arvutuste tulemustega. Järgnevatel soojenemise graafikutel on y-teljel kajastatud juhtmete ületemperatuuri ümbritseva keskkonna suhtes $\Delta\theta$, et erinevate juhtmete temperatuuri muutumine oleks lihtsasti võrreldav.

Mõlema uuritud juhtmemargi korral ilmneb, et mustaks värvitud juhtme soojenemise kiirus katse alguses on suurem ja see saavutab kõrgema temperatuuri. Mustaks värvitud juhtmete lõpptemperatuurid on 5...7 °C kõrgemad võrreldes tavaliste juhtmetega. Sellest lähtudes peaks olema oodatav, et tavaliste juhtmete absorptsioonitegurid on märgatavalt väiksemad 1-st.

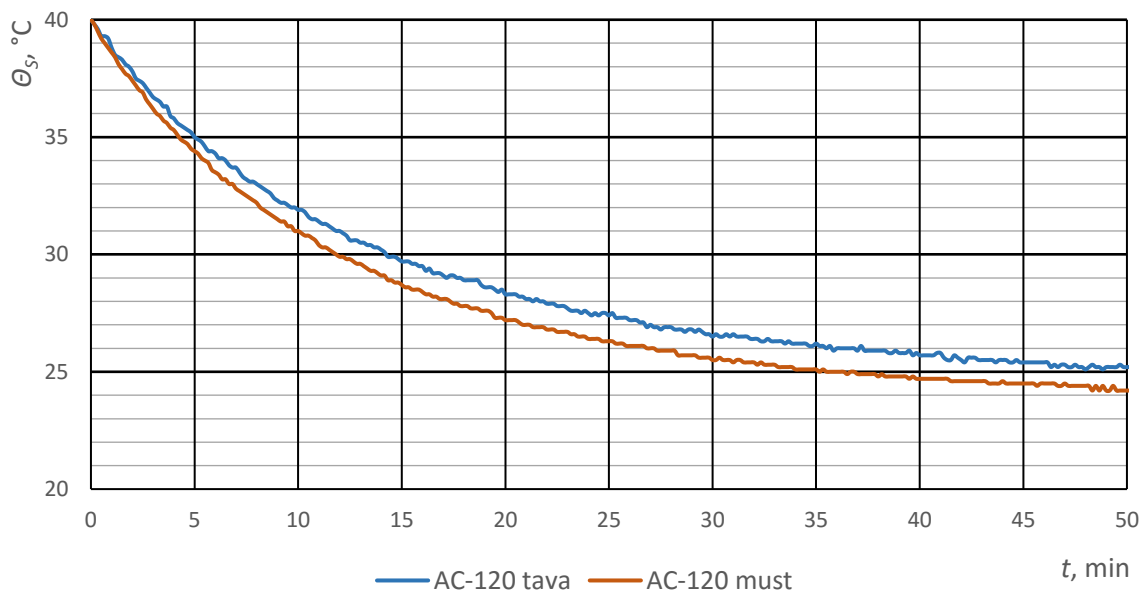


Joonis 5.10 Tavalise ja mustaks värvitud AC-120 juhtme soojenemiskatse temperatuuri tõusude võrdlus

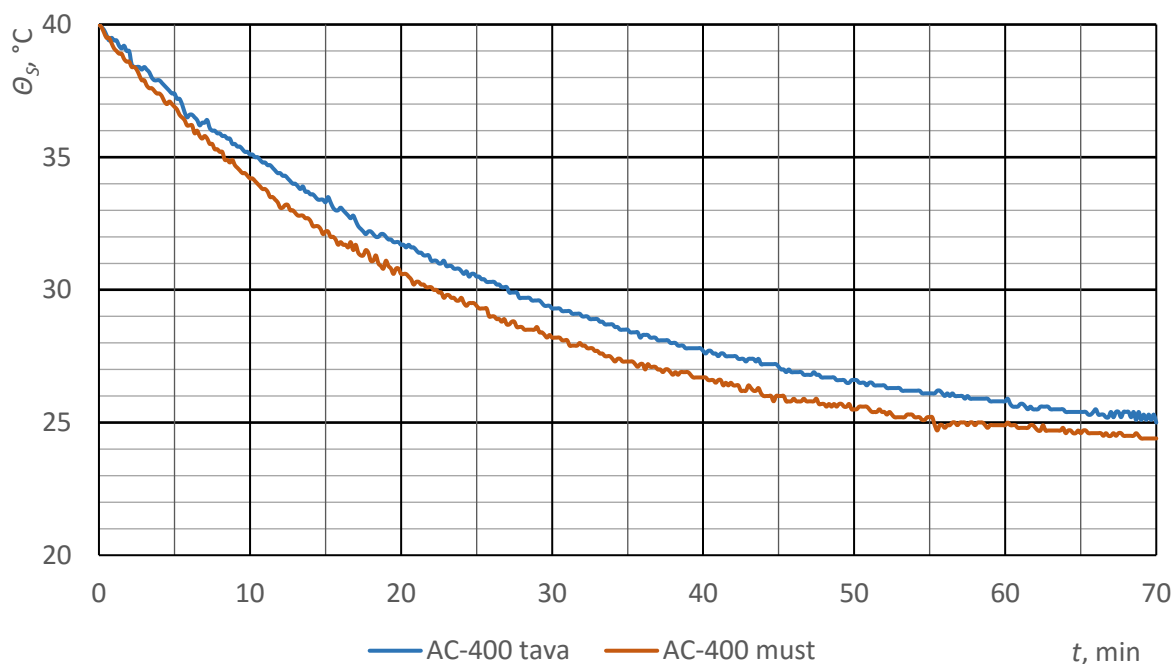


Joonis 5.11 Tavalise ja mustaks värvitud AC-400 juhtme soojenemiskatse temperatuuri tõusude võrdlus

Jahtumisprotsesside võrdlemisel on oluline vaadelda temperatuuri muutumise kiirust võrdsel temperatuuril. Arvestades, et kõik uuritavad juhtmed saavutasid temperatuuri vähemalt 42 °C, on sobiv võrrelda juhtmete jahtumist 40 °C juures. Võrdse konvektiivse soojuskao tõttu igal temperatuuril erineb jahtumise tempo kiirgusliku soojuskao erinevuse tõttu.



Joonis 5.12 Tavalise ja mustaks värvitud AC-120 juhtme soojenemiskatse temperatuuri languste võrdlus alates 40 °C



Joonis 5.13 Tavalise ja mustaks värvitud AC-400 juhtme soojenemiskatse temperatuuri languste võrdlus alates 40 °C

Joonistel 5.12 ja 5.13 esitatud jahtumise graafikutelt ilmneb, et nii AC-120 kui AC-400 juhtme korral on mustaks värvitud juhtme jahtumist kirjeldav joon madalamal. Sellest järeldub, et mustaks värvitud juhe jahtub kiiremini ja seetõttu peab värvimata juhtme emissioonitegur olema märgatavalt väiksem 1-st. Kõik ülejäänud jahtumise kiirust määravad parameetrid on nii värvitud kui värvimata juhtme korral läbiviidud katses võrdsed.

5.5. Absorptsiooni- ja emissiooniteguri arvutused

AC-400 juhtme korral on absorptsioonitegur vastavalt valemile 5.7:

$$\alpha = \frac{0,0190}{0,0271} \cdot 0,95 = 0,67 \quad (5.11)$$

Emissiooniteguri määramiseks on vaja esmalt arvutada konvektiivse soojusülekanne intensiivsus soojusliku tasakaalu korral. CIGRÉ meetodika järgi arvutades on konvektsioonile vastava võimsusvoo määramiseks vajalike parameetrite väärtused järgmised:

$$\theta_f = \frac{42,7 + 22,8}{2} = 32,75 \text{ °C} \quad (5.12)$$

$$v_f = 1,32 \cdot 10^{-5} + 9,5 \cdot 10^{-8} \cdot 32,75 = 1,63 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2\text{s}^{-1} \quad (5.13)$$

$$\lambda_f = 2,42 \cdot 10^{-2} + 7,2 \cdot 10^{-5} \cdot 32,75 = 2,656 \cdot 10^{-2} \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1} \quad (5.14)$$

$$Pr = 0,715 - 2,5 \cdot 10^{-4} \cdot 32,75 = 0,7068 \quad (5.15)$$

$$Gr = \frac{0,0285^3(42,7 - 22,8) \cdot 9,807}{(32,75 + 273) \cdot (1,63 \cdot 10^{-5})^2} = 55540 \quad (5.16)$$

$$Gr \cdot Pr = 55540 \cdot 0,7068 = 39260 \quad (5.17)$$

Seega tabeli 3.2 järgi $A_2 = 0,480$ ja $m_2 = 0,250$.

$$Nu = 0,480 \cdot 39260^{0,250} = 6,756 \quad (5.18)$$

Konvektiivse soojusülekanne võimsus on seega:

$$P_C = \pi \cdot 2,656 \cdot 10^{-2}(42,7 - 22,8) \cdot 6,756 = 11,22 \text{ Wm}^{-1} \quad (5.19)$$

IEEE meetodika järgi arvutamiseks on täiendavalt vaja teada õhu tihedust juhtme ja ümbritseva keskkonna piirkihis. Katsetulemustele vastavad õhutihedused on valitud allika [9] tabeli H.1 järgi. Konvektiivse soojusülekanne võimsus antud juhtme korral:

$$P_C = 3,645 \cdot 1,155^{0,5} \cdot 0,0285^{0,75}(42,7 - 22,8)^{1,25} = 11,42 \text{ Wm}^{-1} \quad (5.20)$$

Ilmneb, et erinevate meetodikatega arvutatud konvektsiooni võimsused on üsna sarnased, erinevus on mõne protsendi piires. Kui võtta aluseks IEEE meetodika järgi arvutatud konvektsiooni võimsus, on emissioonitegur:

$$\varepsilon = \frac{0,67 \cdot 1174 \cdot 0,0285 - 11,42}{\pi \cdot 0,0285 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8}[(42,7 + 273)^4 - (22,8 + 273)^4]} = 0,94 \quad (5.21)$$

Ehk antud juhul peaks olema emissioonitegur väga lähedal ühele. Katsete meetodika täpsust saab kontrollida, kui viia arvutused läbi mustaks värvitud juhtmetega ja kontrollida, kas emissioonitegurid tulevad oodatavatesse väärtuste vahemikesse. Vastava arvutuskäigu tulemused on toodud tabelis 5.2.

Ilmneb, et antud arvutuskäigu puhul peaks mustaks värvitud AC-400 juhtme emissioonitegur olema 1,14. See aga ei ole võimalik, sest emissioonitegur ei saa olla suurem ühest ja on teada, et antud juhul teguri väärtus peaks olema 0,95. Ka AC-120 korral on mõningane erinevus teoreetilisest emissiooniteguri väärtusest märgatav, kuid oluliselt väiksemal määral. Arvutuste järgi peaks ε väärtus olema 0,97, kuid on teada, et ka mustaks värvitud AC-120 emissiooniteguri tegelik väärtus on *ca* 0,95.

Tabel 5.2 Soojenemiskatse tulemuste põhjal arvutatud emissioonitegurid ja olulisemad vahetulemused

	α	θ_f (°C)	Pr	Gr	Nu	P_S (W m ⁻¹)	P_c^1 (W m ⁻¹)	P_c^2 (W m ⁻¹)	ε
AC-120	0,71	34	0,7065	8902	4,40	12,99	7,44	7,35	0,87
AC-120 must	0,95	36,15	0,7060	10545	4,54	17,29	9,45	9,42	0,97
AC-400	0,67	32,75	0,7068	55540	6,76	22,28	11,22	11,42	0,94
AC-400 must	0,95	35,75	0,7061	65939	7,05	31,79	14,65	14,89	1,14

¹ - CIGRÉ meetodika järgi arvutatud

² - IEEE meetodika järgi arvutatud

Arvutustulemuste teooriast lahknemise kõige tõenäolisem põhjus on konvektiivse soojusülekanne ebaõige arvestamine. Lähtuti eeldusest, et juhe jahtub ainult loomuliku konvektsiooni mõjul, kuid mõningane õhu liikumine katselaboris tõenäoliselt ikkagi toimus, näiteks sundventilatsiooni tõttu või lampide soojendava mõju tõttu kogu katselaborile. Seejuures õhu liikumine ruumis ei olnud tajutav ja piisavalt tundlike mõõteseadmete puudumise tõttu õhu liikumise kiirust ei määratud. Konvektsiooni arvutamise meetodikat käsitlevates allikates on samuti rõhutatud, et väikestel tuule kiirustel on konvektiivse soojusülekanne täpne arvutamine keerukas, sest oluline mõju on nii forsseeritud kui loomulikul konvektsioonil.

Arvutuste täpsustamiseks viiakse soojusbilansi võrrandisse sisse mõlema juhtme jaoks konvektsiooni arvutamise parandustegur k_p

$$P_S = P_r^* + p_k P_C \quad (5.22)$$

kus P_r^* – korrigeeritud kiirguslik jahtumine eeldusega, et $\varepsilon=0,95$;

AC-400 puhul on parandusteguri väärtuseks mustaks värvitud juhtme tulemuste järgi:

$$p_k = \frac{P_S - P_r^*}{P_C} = \frac{31,79 - 14,05}{14,89} = 1,19 \quad (5.23)$$

AC-120 puhul on parandusteguri väärtuseks:

$$p_k = \frac{P_S - P_r^*}{P_C} = \frac{17,29 - 7,67}{9,42} = 1,02 \quad (5.24)$$

Korrigeeritud emissioonitegur arvestab konvektsiooni parandustegurit vastavalt võrrandile 5.25:

$$\varepsilon^* = \frac{P_S - p_k P_C}{\pi D \sigma [(\theta_s + 273)^4 - (\theta_a + 273)^4]} \quad (5.25)$$

Arvutuste tulemusel saadakse korrigeeritud emissiooniteguri väärtuseks AC-400 puhul $\varepsilon^*=0,75$ ja AC-120 puhul $\varepsilon^*=0,85$. Katse tulemused on kokkuvõtlikult esitatud tabelis 5.3.

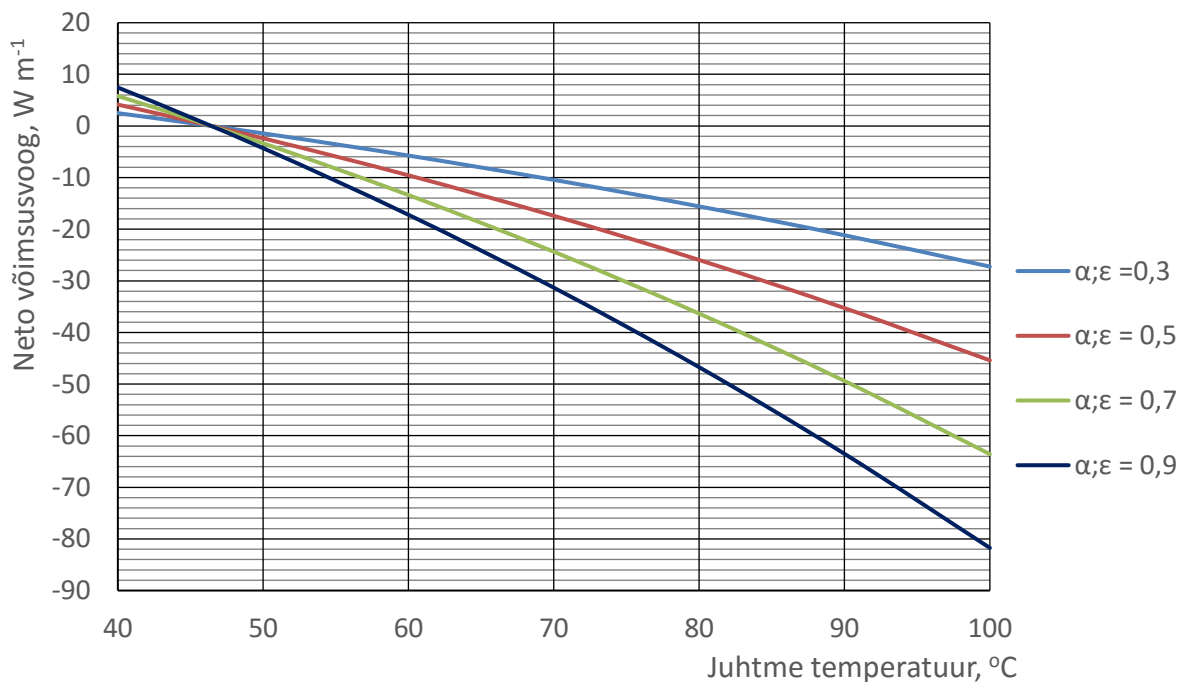
Tabel 5.3 Vananenud juhtmete katseliselt leitud soojuskiirguse absorptsiooni- ja emissioonitegurid

Juhtme mark	Absorptsioonitegur	Emissioonitegur
AC-120	0,71	0,85
AC-400	0,67	0,75

Absorptsiooni- ja emissiooniteguriga seoses tuleks veel märkida, et tegurite suurenemine parandab juhtme jahutustingimusi. Selles on lihtne veenduda, kui arvutada kiirguslik netovõimsusvoog $P_{R,net}$ (võrrand 5.26) kiirgustegurite erinevatel väärtustel.

$$P_{R,net} = P_S - P_r \quad (5.26)$$

Joonisel 5.14 toodud graafikutest võib järeldada, et juhtme mustumisel suureneb kõrgematel juhtme talitlustemperatuuridel kiirgusliku soojuskao võimsus.



Joonis 5.14 Kiirguslikust soojenemisest ja jahtumisest põhjustatud netovõimsusvoo sõltuvus AC-400 juhtme temperatuurist erinevatel absorptsiooni- ja emissioonitegurite väärtustel (päikesekiirguse kiiritustihedus 900 W m^{-2} , välistemperatuur 25 °C)

6. Vananenud juhtmete vahelduvvoolutakistus

6.1. Vahelduvvool ACSR õhuliinijuhtmetes

ACSR juhtmete vahelduvvoolutakistuse määramine on keerulisem võrreldes ainult alumiiniumist või muust ferromagnetiliste omadusteta materjalist juhi vahelduvvoolutakistuse määramisega. Samas on vahelduvvoolutakistuse teadmine oluline, sest elektrivoolust põhjustatud soojuskadude arvutamisel on alalisvoolutakistuse kasutamisel oht juhtme temperatuuri alahindamiseks. Otstarbekam on kasutada vahelduvvoolutakistust, et hinnata juhtme talitlustemperatuuri realistlikumalt. Vahelduvvoolutakistuse määramiseks on vajalik järgnevaid juhete iseloomustavaid suurusid teada ja efekte arvestada:

- Alalisvoolutakistus. See sõltub juhtme temperatuurist ja mõõtmetest. Mitme kihiga keerutatud juhtmete korral on välimiste kihtide traatide pikkus suurem juhtme pikkusest traatide heeliksiitaolise kuju tõttu ja traatide võrdse ristlõike korral on ka nende alalisvoolutakistus juhtme pikkusühiku kohta suurem.
- Temperatuur. Takistus suureneb elektrijuhtides temperatuuri tõusmisel.
- Pinnaefekt. Vahelduvvoolu korral väheneb voolutihedus traatide ristlõike sisepiirkonnas. See on põhjustatud elektromagnetilisest induksioonist ja sageduse kasvuga pinnaefekti mõju suureneb. Keerutatud juhtme korral on samuti välimistes alumiiniumtraatide kihtides voolutihedus suurem. Pinnaefekti tõttu on võrgusagedusel 20 – 50 mm diameetriga juhtmete takistus suurusjärgus 1% kuni 10% suurem alalisvoolutakistusest [2].
- Kaod terastraatides. Pöörisvoolud ja hüsterees terastraatides suurendavad kadusid juhtmes ja põhjustavad temperatuuritõusu. Südamiku magnetilistest omadustest põhjustatud takistuse suurenemine võib olla suurusjärgus 5...20% alalisvoolutakistusest ühe ja kolme alumiiniumtraatide kihiga ACSR juhtmetel. Paarisarvulise alumiiniumtraatide kihtide arvu korral on lisatakistus oluliselt väiksem. [2]
- Trafoefekt. Terastraatide magnetiliste omaduste tõttu indutseeritakse alumiiniumtraatidesse lisavoolud. Trafoefekt väljendub kolme alumiiniumtraatide kihiga juhtmes, kus voolutihedus on keskmises kihis suurem kui välimises või sisemises kihis. [6]

- Juhtme mehhaaniline pinge. On kindlaks tehtud, et terase suhteline magnetiline läbitavus konstantse magnetvälja tugevuse juures väheneb mehaanilise pinge kasvamisel vahemikus 0 ... 290 MPa. Seda nähtust nimetakse Villari efektiks ja selle tagajärjel, arvestades võrrandit 6.1, vahelduvvoolutakistus juhtme mehaanilise pinge suurenemisel väheneb. [2]

Juhtmete takistuse määramise täpsust vähendavad mõningad juhtme ehitusest tulenevad eripärad, nimelt [2]:

- Juhtmete ühendamisel saab elektrilise kontakti saavutada ainult välimise traatide kihi kaudu kui ei kasutata eriotstarbelisi kompressioonklambreid.
- Ühenduspindade suurus nii ühe kui ka eri kihtide traatide vahel ja elektrilise kontakti olemasolu sõltub muuhulgas traatide pinna oksüdeerumise määrast ja juhtme mehaanilisest pingest.
- Suure voolutiheduse korral ei ole ACSR juhe isotermiline. Esineb mõne kraadi suurune radiaalsuunaline temperatuurivahe juhtme pinna ja südamiku vahel ning osadel juhtudel esinevad ka pikisuunalised temperatuurierinevused.

Samuti on avastatud, et ACSR juhtmete puhul sõltub vahelduvvoolutakistus ka voolutugevusest. Südamiku magnetiliste omaduste tõttu suureneb voolutiheduse kasvuga juhtmes ka selle vahelduvvoolutakistus [6]. Südamiku kadudest põhjustatud lisanduva takistuse arvutamiseks saab kasutada võrrandit 6.1, mis ei võta arvesse trafoefekti [2]:

$$\Delta R_m = 2\pi f \mu_r \mu_0 A_{Fe} N_{ef} \tan \gamma \quad (6.1)$$

kus f – vahelduvvoolu sagedus Hz;

μ_r – südamiku suhteline magnetiline läbitavus;

μ_0 – vaakumi magnetiline läbitavus $H \cdot m^{-1}$;

A_{Fe} – südamiku ristlõikepindala m^2 ;

N_{ef} – mõjuv keerdude arv pikkusühiku kohta m^{-1} ;

γ – faasinurk koguvoolu ja alumiiniumjuhtmetes indutseeritud pinge vahel.

Mõjuv keerdude arv pikkusühikule N_{ef} kirjeldab alumiiniumtraatide kihtide keerutusest tulenevat summaarset mõju terassüdamikule. Antud parameeter on oluline terassüdamikus tekkiva telgsuunalise magnetvälja tugevuse määramiseks ja seda saab arvutada võrrandiga 6.2. Magnetvälja tugevusest sõltub südamiku ferromagnetiliste omaduste mõju tugevus.

$$N_{ef} = \frac{\sum_{i=1}^j \frac{N_i}{\lambda_i} (-1)^i}{N_{Al}} \quad (6.2)$$

kus N_i – traatide arv i -ndas kihis;

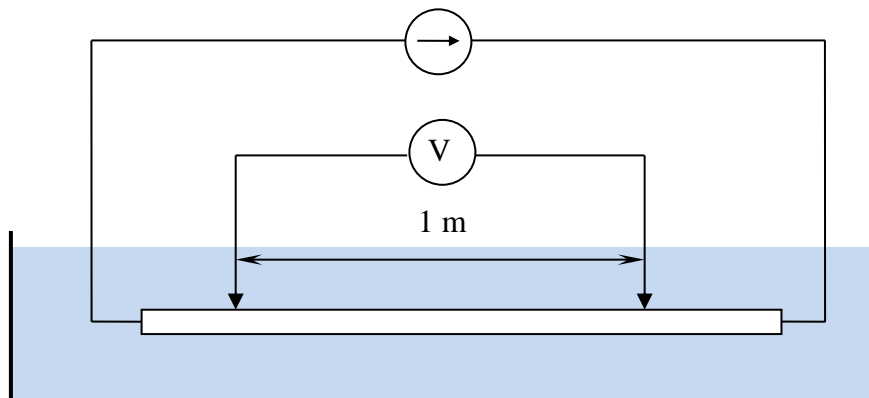
j – alumiiniumtraatide kihtide arv;

λ_i – keerutuse sammu pikkus i -ndas kihis m ;

N_{Al} – kõikide alumiiniumtraatide arv.

6.2. Vananenud juhtmete alalisvoolutakistuse määramine

Aktiivtakistus terasalumiiniumjuhtmetel määrati pinge ja voolu mõõtmise kaudu. Mõlemalt õhuliinijuhtmelt eraldati alumiiniumtraadid, mille takistus määrati üksikhaaval. Selleks märgiti ca 1,1 m pikkusele õhuliinijuhtmele täpselt 1 m pikkune lõik. Juhtmest eraldati alumiiniumtraadid, mis ühendati alalisvooluallika külge. Traadile märgitud kaugusele, mis vastab 1 m juhtmelõigule, paigutati üksteisest voltmeetri mõõteotsad. Traat koos mõõteotsadega asetati kahte veeanumasse: esmalt ca 6 °C temperatuuriga vette ja seejärel ca 45 °C temperatuuriga vette. Pärast lühiajalist ootamist temperatuuride ühtlustumiseks juhiti traadist läbi vool tugevusega ca 30 A ja registreeriti traadil voltmeetri mõõteotsade vahel tekkinud pinge. Katse viidi läbi vesikeskkonnas, et tagada katsekeha ühtlane temperatuur mõõtmiste vältel. Joonisel 6.1 on esitatud katseseadme põhimõtteline skeem.



Joonis 6.1 Alalisvoolutakistuse mõõtmise põhimõtteline katseskeem

Vee eritakistus on oluliselt suurem alumiiniumi eritakistusest, mistõttu see katsetulemustele märkimisväärset mõju ei avalda. Mõõtmistega registreeriti traati läbiva voolu tugevus, tekkinud pinge 1 m lõigul ja vee temperatuur mõlemas anumal lugemi võtmise hetkel. Traadi takistus

arvutati kahel erineval temperatuuril Ohm'i seadusest lähtuvalt. Võrrand 6.3 kirjeldab alalisvoolutakistuse taandamist eri temperatuuridele:

$$R_2 = R_1[1 + \alpha_{DC}(\theta_2 - \theta_1)] \quad (6.3)$$

kus R_1 – takistus külmemas vees Ω ;

R_2 – takistus soojemas vees Ω ;

θ_1 – külmema vee temperatuur $^{\circ}\text{C}$;

θ_2 – soojema vee temperatuur $^{\circ}\text{C}$.

Võrrandist 6.4 saab avaldada takistuse temperatuurisõltuvuse teguri:

$$\alpha_{DC} = \frac{\frac{R_2}{R_1} - 1}{\theta_2 - \theta_1} \quad (6.4)$$

Traatide takistus taandati 20°C -le ja arvutati kogu juhtme takistus rööpselt paiknevate takistite ekvivalenteerimise valemi järgi:

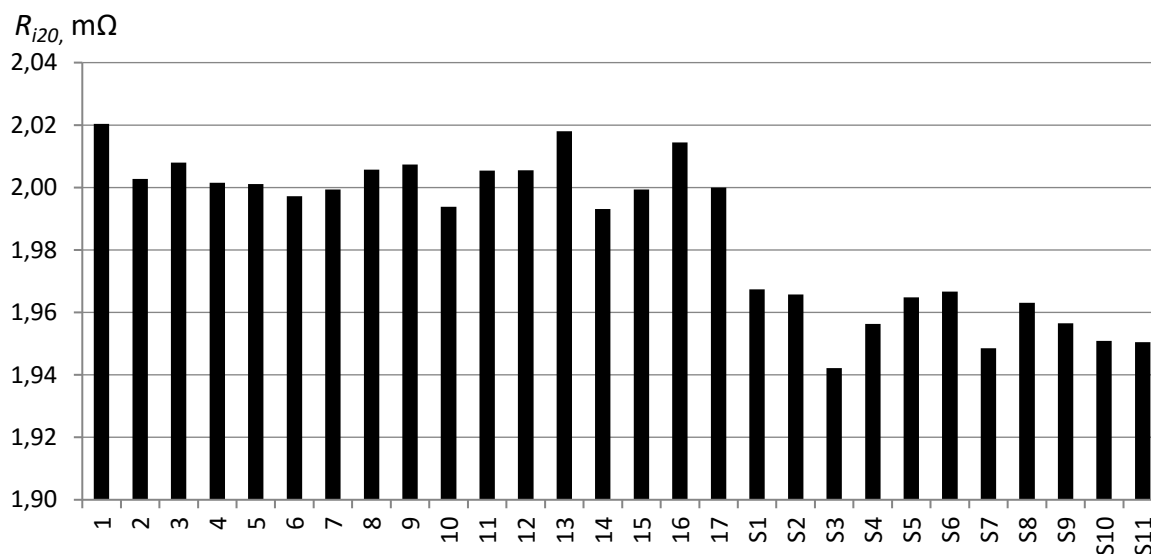
$$R_{j20} = \left[\sum_{i=1}^{N_{Al}} \frac{1}{R_{i20}} \right]^{-1} \quad (6.5)$$

kus R_{j20} – kogu juhtme takistus 20°C juures Ω ;

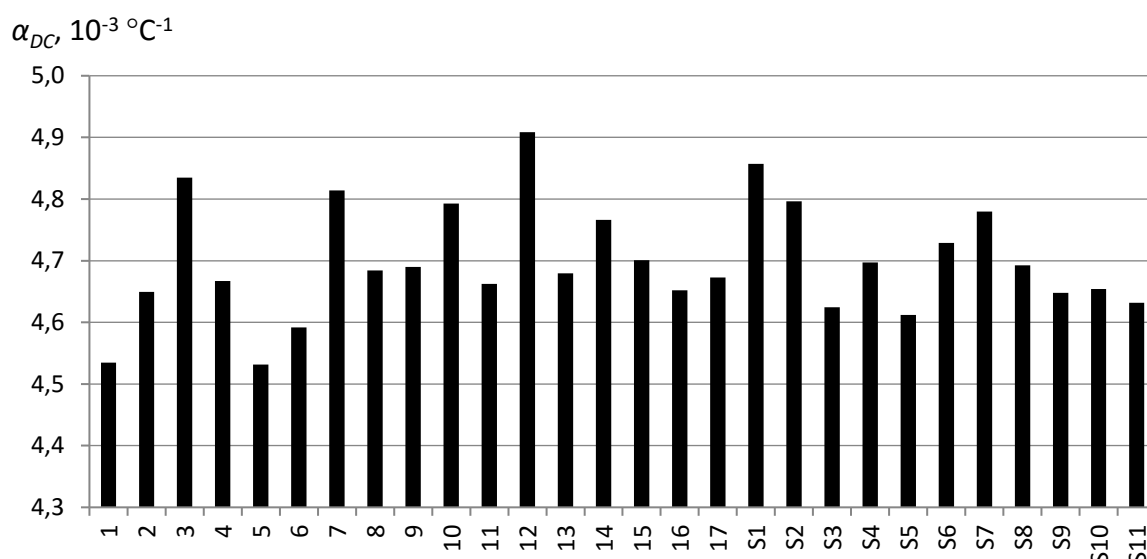
R_{i20} – i -nda juhtmetraadi takistus 20°C juures Ω .

Mõõtetulemused ning arvutatud takistuse väärtused ja temperatuurisõltuvuse tegurid on toodud lisas 1. Temperatuurile 20°C taandatud traatide takistusi on kujutatud joonisel 6.2. Erinevate traatide järgi arvutatud temperatuurisõltuvuse tegurid on kujutatud joonisel 6.3. On märgata, et sisemise kihi traatide takistused on mõnevõrra väiksemad välise kihi traatide takistusest. See on põhjustatud asjaolust, et traatidele märgitud 1 m vahe mõõdeti mööda tervikliku juhtme pinda. Juhtmete heeliksitaolise kuju tõttu on nende pikkus suurem kui 1 m, kusjuures välimise kihi traadid on omakorda pikemad sisemise kihi traatidest. Temperatuurisõltuvuse teguri graafikul puudub märgatav erinevus sisemise ja välimise kihi traatide vahel.

Pärast kiudude sirgendamist mõõdeti sisemise kihi traadi pikkuseks esialgu märgitud 1 m vahes 1,014 m. Välise kihi traadi pikkus 1 m märkide vahel on 1,034 m. Välised kiud on sisemistest 2,0% pikemad ja nende takistus 20°C juures on keskmiselt 2,4% suurem. Juhtme reaalne alalisvoolutakistus vastab siiski arvutuslikult saadud takistusele, sest elektrivool kulgeb piki traate ja läbib 1 m juhtme lõigul traadi, mitte juhtme, pikkusele vastava teepikkuse.



Joonis 6.2 Vananenud juhtme AC-400 alumiiniumkiudude takistused 20 °C juures. Juhtme sisemise alumiiniumtraatide kihi järjenumbril ees on "S".



Joonis 6.3 juhtme AC-400 alumiiniumkiudude takistuse temperatuurisõltuvuse tegurid. Juhtme sisemise alumiiniumkiudude kihi järjenumbril ees on "S".

Katse tulemusel on AC-400 juhtme alalisvoolutakistus $0,0709 \text{ } \Omega \text{ km}^{-1}$ temperatuuril 20 °C. Juhtme takistuse temperatuurisõltuvuse tegur on $4,7 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, mis on mõnevõrra suurem kirjanduses antud alumiiniumi temperatuurisõltuvuse tegurist (tabel 1.1). Analoogse katse läbiviimisel AC-120 juhtmega saadi tulemuseks, et alalisvoolutakistus on $0,236 \text{ } \Omega \text{ km}^{-1}$ temperatuuril 20 °C ja takistuse temperatuurisõltuvuse tegur on $4,7 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

Takistuste arvutamisel ei arvestatud terastraatidega, sest nende takistus on suurusjärgu võrra suurem alumiiniumtraatide takistusest ja mõjutab kogu juhtme takistust marginaalselt. Kontrolliks mõõdeti terastraatide takistust ja AC-400 puhul on ühe terastraadi alalisvoolutakistus 20 °C juures 55,5 mΩ m⁻¹ ehk ca 28 korda suurem kui alumiiniumtraadil. Terastraadi takistus vahelduvvoolule on alumiiniumiga võrreldes veelgi suurem selle suure magnetilise läbitavuse tõttu, mis võimendab pinnaefekti traatides.

6.3. Vahelduvvoolutakistuse ja alalisvoolutakistuse suhe

Välja on töötatud mitmeid erineva detailsusastmega meetodeid vahelduvvoolutakistuse määramiseks [2]. Osad põhinevad empiirilistel uuringutel, osad juhtme geomeetrilistel omadustel ja juhtmematerjalide elektrijuhtivust mõjutavate parameetrite arvestamisel. Eriti täpsete arvutusmeetodite rakendamiseks on muuhulgas vajalik info terassüdamikuga magnetiliste omaduste kohta, täpsemalt selle suhtelise magnetilise läbitavuse sõltuvust magnetväljatugevusest $\mu_r=f(H)$. Antud parameetrit sisaldab ka võrrand 6.1. Täpsete arvutusmeetodite kasutamine on vajalik eelkõige kolme alumiiniumtraatide kihtide arvuga ACSR juhtmete korral, kus suurte voolutugevuste korral tekkiv teljesuunaline magnetväli on eriti tugev ja magnetiliste efektide mõju märkimisväärne. Arvestades, et käesolevas uuringus vaadeldakse ainult kahe alumiiniumtraatide kihiga juhtmed, võib kasutada mõnevõrra lihtsustatud arvutusmeetodit.

Vahelduvvoolutakistuse ja alalisvoolutakistuse omavahelise seose määramise üks alternatiivseid võimalusi on vaadelda voolust põhjustatud soojuskadusid [10]. Oletades, et juhtme temperatuur on muude sarnaste tingimuste korral nii vahelduv- kui alalisvoolu korral võrdne, on ka voolust põhjustatud soojuskaod võrdsed. Lähtuvalt võrrandist 3.2, mis kehtib nii alalis- kui vahelduvvoolu korral, võib sellist olukorda kirjeldada järgnevalt:

$$I_{DC}^2 R_{DC} = I_{AC}^2 R_{AC} \quad (6.6)$$

Võrrandist 6.6 saab omakorda avaldada vahelduv- ja alalisvoolutakistuse suhte:

$$\frac{R_{AC}}{R_{DC}} = \left(\frac{I_{DC}}{I_{AC}}\right)^2 \quad (6.7)$$

Empiirilisel on leitud võrrandid, mis kirjeldavad erinevat tüüpi terassüdamikuga juhtmete korral käsitletud alalis- ja vahelduvvoolu suhet [10]. Ühe või kahe alumiiniumtraatide kihiga ACSR juhtme korral, mille nominaalne ristlõige on suurem kui 175 mm², kehtib:

$$I_{AC} = \frac{I_{DC}}{\sqrt{1,0045 + 9 \cdot 10^{-8} I_{DC}}} \quad (6.8)$$

Ühe või kahe alumiiniumtraatide kihiga ACSR juhtme korral, mille ristlõige on väiksem kui 175 mm², tuleb arvestada lisaks arvutuslikku alalisvoolutihedust J_{DC} (A/mm²):

$$J_{DC} = \frac{I_{DC}}{A_{Al}} \quad (6.9)$$

kus A_{Al} – alumiiniumtraatide ristlõige mm².

Juhul, kui $J_{DC} < 0,742$, võib lugeda, et $I_{DC} = I_{AC}$ ja seetõttu $R_{DC} = R_{AC}$.

Kui $0,742 < J_{DC} \leq 2,486$, siis:

$$I_{AC} = \frac{I_{DC}}{\sqrt{1 + 0,02(25,62 - 133,9J_{DC} + 288,6J_{DC}^2 - 334,5J_{DC}^3 + 226,5J_{DC}^4 - 89,73J_{DC}^5 + 19,31J_{DC}^6 - 1,744J_{DC}^7)}} \quad (6.10)$$

Kui $2,486 < J_{DC} \leq 3,398$, siis:

$$I_{AC} = \frac{I_{DC}}{\sqrt{1 + 0,02(2,978 - 22,02J_{DC} + 24,87J_{DC}^2 - 11,64J_{DC}^3 + 2,973J_{DC}^4 - 0,4135J_{DC}^5 + 0,02445J_{DC}^6)}} \quad (6.11)$$

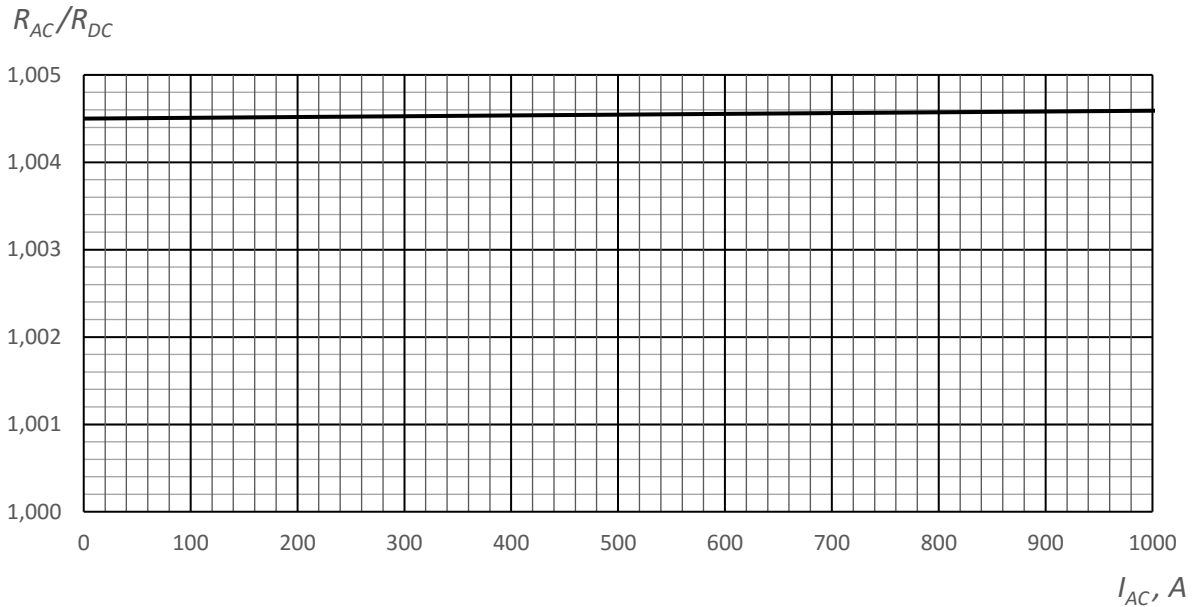
Kui $J_{DC} > 3,908$, siis:

$$I_{AC} = \frac{I_{DC}}{\sqrt{1,1}} \quad (6.12)$$

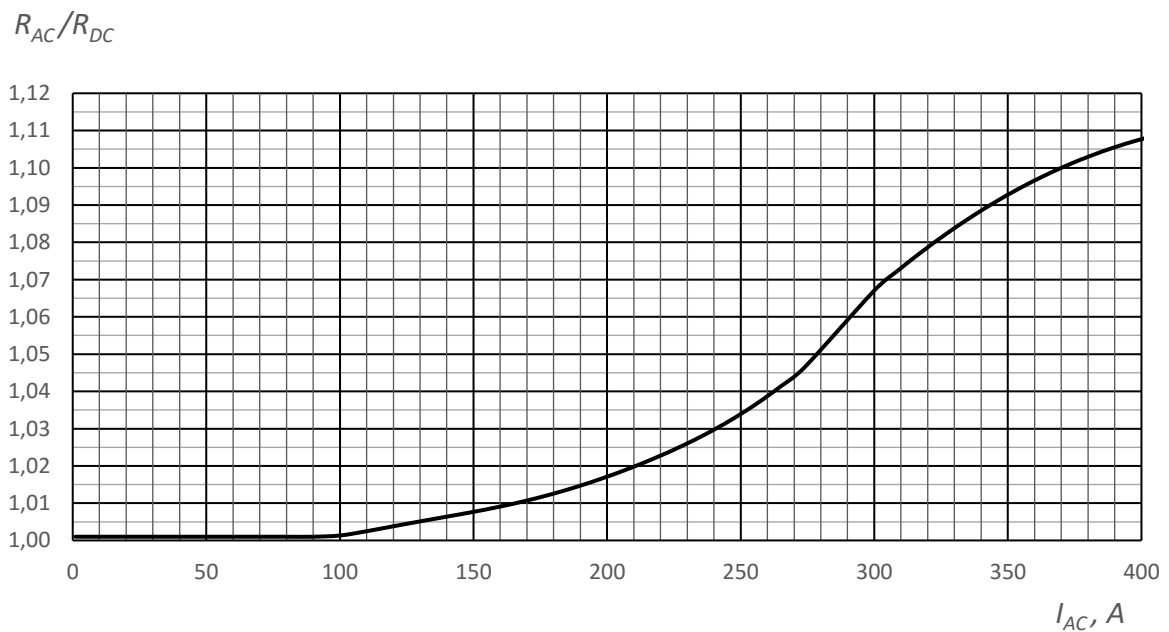
Rakendades võrrandit 6.8 juhtme AC-400 korral, saab vahelduv- ja alalisvoolutakistuste suhte, mis on esitatud joonisel 6.4. Sõltuvus voolutugevusest on väga nõrk ja vahelduvvoolutakistuse väärtus on voolutugevusel 0...1000 A ca 0,46% suurem alalisvoolutakistusest.

AC-120 juhtme väiksema ristlõike tõttu on selle puhul vaja kasutada võrrandeid 6.9 kuni 6.12. Selle tulemusena saadav vahelduvvoolutakistuse karakteristik (joonis 6.5) on võrdlemisi erinev AC-400 arvutatud karakteristikust. Väikese voolutugevuse juures on alalis- ja vahelduvvoolutakistused võrdsed ja suurtel voolutugevustel on vahelduvvoolutakistus ca 10% suurem.

Antud juhul on näha märkimisväärsed erinevused kahe juhtme vahelduv- ja alalisvoolutakistuse suhtes. Juhtmete tegelik vahelduvvoolutakistuse sõltuvus koormusvoolust peaks kuju poolest vastama pigem joonisel 6.5 toodud sõltuvusele, kus on näha ferromagnetilise südamikü müüri mõju ja selle küllastumist. Samas peaks vahelduvvoolutakistus olema ka väga väikestel koormusvoolu väärtustel mõnevõrra suurem alalisvoolutakistusest pinnaefekti tõttu.



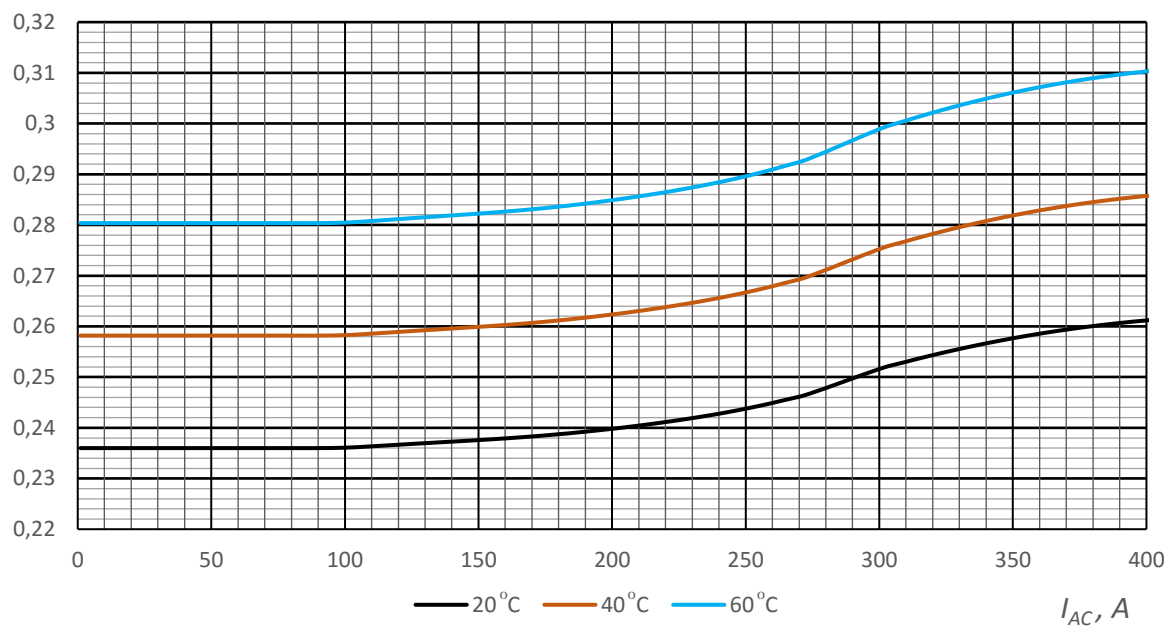
Joonis 6.4 AC-400 juhtme vahelduvvoolutakistuse ja alalisvoolutakistuse suhe



Joonis 6.5 AC-120 juhtme vahelduvvoolutakistuse ja alalisvoolutakistuse suhe

Antud vahelduv- ja alalisvoolutakistuste suhete alusel saab tuletada juhtmete vahelduvvoolutakistuse temperatuuril 20 °C. Juhtme AC-400 puhul oleks see igal voolutugevusel 0,0712 Ω km⁻¹. Juhtme AC-120 puhul kirjeldab vahelduvvoolutakistuse sõltuvust koormusvoolust erinevatel juhtme temperatuuridel joonis 6.6.

$R_{AC}, \Omega \text{ km}^{-1}$



Joonis 6.6 Juhtme AC-120 vahelduvvoolutakistuse sõltuvus koormusvoolust erinevatel juhtme temperatuuridel

Kokkuvõte

Vananenud õhuliinijuhtmete kirjeldamiseks määrati kõik soojusliku käitumise modelleerimiseks vajalikud parameetrid. Teoreetiliselt peaks käsitletud parameetritest õhuliinijuhtme tööperioodil märkimisväärselt muutuma ainult kiirgusabsorptsiooni- ja emissiooni tegurid. Takistuse muutumine saab olla põhjustatud ainult olulistest muutustest juhtme alumiiniumtraatide ristlõikes, näiteks korrosiooni ja vibratsiooni mõjul. Juhtmete soojusmahtuvus ei tohiks teoreetiliselt liini talitluse käigus muutuda. Märkimisväärsed muutused võivad toimuda liinijuhtmete eksploatatsiooni esimestel aastatel määrdekihi kulumise tõttu.

Varasemalt ei olnud juhtmete soojusmahtuvust arvutustes ulatuslikult kasutatud, sest soojusliku tasakaalu olekus ei mõjuta soojusmahtuvus juhtme püsitemperatuuri. Soojusmahtuvusest sõltub ühest püsiolekust teise siirdumise kiirus. Töös kasutatud soojuslikku käitumist kirjeldavatest võrranditest selgub, et soojusmahtuvus muutub oluliseks juhtme temperatuuri mõjutavate tegurite järsul muutumisel. Sellest on kasu näiteks õhuliinide dünaamiliste koormuspiiride määramisel. Juhtmete temperatuuri piirangut arvestades saab liini ainult lühiajaliselt üle koormata, vältides selle temperatuuri liigset tõusu. Soojusmahtuvus on samuti väga oluline juhtme temperatuuri arvutamiseks lühise olukorras.

Töös leiti soojusmahtuvuse väärtus nii AC-120 juhtmele kui AC-400 juhtmele ning eraldi kummagi juhtme alumiiniumist ja terasest traatidele. Leiti, et tsingikihi ja määrde panus kogu juhtme soojusmahtuvusse on tühine ja nendest ühe arvestamata jätmise kompenseerib osaliselt teise arvestamata jätmisest tekkiva vea. Määrde massi arvestamisel võib olla praktiline väärtus ainult liini koormuse dünaamikast põhjustatud temperatuurimuutuste modelleerimisel uute liinijuhtmete puhul, mille määrdekiht pole veel jõudnud oluliselt kuluda ja mille mass moodustab märgatava osa juhtme massist. Samas määrde arvestamata jätmisel tehtav viga põhjustab siirdeprotsessi ajakonstandi alahindamise ja temperatuuri muutumise kiiruse ülehindamise ehk tehtav viga on konservatiivse suunaga. Soojusmahtuvuse suhteliselt nõrga temperatuurisõltuvuse tõttu võib tavaolukorras kasutada AC-120 jaoks väärtust $450 \text{ J } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ m}^{-1}$ ja AC-400 jaoks väärtust $1280 \text{ J } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ m}^{-1}$. Lühise olukorras tuleks arvestada soojusmahtuvuse sõltuvust temperatuurist vastavalt peatükis 4 esitatud seostele.

Kiirgusabsorptsiooni- ja emissioonitegurid peaksid teoreetiliselt suurenema liini talitlemise ajal väärtusest 0,2...0,3 väärtuseni 0,9. Uuritud juhtmetel täheldati mõlema parameetri kasvu, AC-

120 juhtmel mõnevõrra suuremal määral kui AC-400 korral. Suuremad kiirgustegurite väärtused põhjustavad liini intensiivsemat soojenemist päikesepaistelisel ilmadel ja intensiivsemat jahtumist ilmastikuoludest sõltumata. Erinevatest kirjandusallikatest ja ka antud töö käigus läbiviidud arvutustest selgub, et pinna mustumine tegelikult parandab juhtme soojuslikku seisundit. Suurenenud absorptsiooniteguri väärtusega kaasnev lisanduv soojendav võimsusvoog päikesekiirgusest on õhuliini kõrgematel temperatuuridel ülekompenseeritud suurenenud kiirgusemissiooni põhjustatud jahtumise poolt. See kehtib mõlema teguri võrdse väärtuse korral, kuid nagu selgus mõõtmistest, on emissiooniteguri väärtus vananenud juhtmetel isegi mõnevõrra suurem absorptsiooniteguri väärtusest, parandades veelgi juhtme jahutustingimusi.

Mõlemad uuritud juhtmed on juba aastakümneid töös olnud, mistõttu võib arvata, et need on oma lõpliku absorptsiooni- ja emissiooniteguri saavutanud. Põhjuseks, miks nende väärtus on väiksem 0,9-st, võib pidada suhteliselt vähese saastekoormusega olusid, milles liinid on talitlenud. Väga saastunud piirkondades võib juhtme pind olla märkimisväärselt rohkem mustunud, uuritud juhtmete pind oli pealmisel küljel oksüdeerunud alumiiniumpinna helehalli värvusega. Veel üks põhjus, mis võib seletada emissiooniteguri mõnevõrra suuremat väärtust võrreldes absorptsiooniteguriga, on juhtme pinna mustumine alumiselt küljelt. Päikesekiirgus ja katses kasutatud lampide kiirgus ei mõjuta praktiliselt juhtme suuremal määral mustunud alumist külge ja absorbeerub vähem mustunud pealmisel küljel. Seevastu kiirgusemissioon toimub kogu juhtme pinnal, nii vähem mustunud pealmisel kui rohkem mustunud alumisel küljel.

Vananenud juhtmete vahelduvvoolutakistus määrati lihtsustatud meetodikat kasutades. Tulemuste kohaselt on vahelduvvoolutakistus praktiliselt võrdne alalisvoolutakistusega. Vahelduvvoolutakistuse täpsem määramine on märgatavalt keerulisem kui alalisvoolutakistuse määramine, sest peale temperatuuri sõltub ACSR juhtme takistus võrgusagedusel lisaks alumiiniumtraatide kihtide arvust, terastraatide materjali magnetilistest omadustest, alumiinium- ja terastraatide ristlõike suurusest, kihtide keerutussammust, voolutugevusest juhtmes ja terastraatide mehhaanilisest pingest. Keerukust lisab ka asjaolu, et erinevalt alalisvoolutakistusest ei saa vahelduvvoolutakistuse mõõtmisel üksikute traatide tulemuste põhjal otseselt välja arvutada vahelduvvoolutakistust.

Empiirilised valemid, millega käesolevas töös takistus arvutati, ei võtnud kõiki eeltoodud aspekte arvesse, mistõttu tuleb nende abil saadud tulemustesse suhtuda teatava

reservatsiooniga. AC-400 korral tundub, et vahelduvvoolutakistus peaks ületama alalisvoolutakistust voolutugevusel kuni 1000 A ainult ca 0,5%, kuid selline vahe võib tekkida juba ainuüksi vahelduvvoolu pinnaefektist. Suurematel voolutugevustel võib saadud väärtuste kasutamine põhjustada juhtme aktiivtakistuse alahindamist. AC-120 juhtme vahelduvvoolutakistuse karakteristik on teooriat arvestades tõepärasem, kuid see tõenäoliselt alahindab takistuse väärtust väikeste voolutugevuste korral.

Uurimistöö tulemused on kokkuvõtlikult esitatud tabelis 7.1. Detailsemalt on tulemused soojusmahtuvuse kohta toodud peatükis 4, absorptsiooni- ja emissiooniteguri kohta peatükis 5 ja vahelduvvoolutakistuse kohta peatükis 6.

Tabel 7.1 Vananenud õhuliinijuhtmete soojuslikud ja elektrilised parameetrid temperatuuril 20 °C (vahelduvvoolutakistus AC-120 juhtmel voolutugevusel 300 A ja AC-400 juhtmel voolutugevusel 800 A)

Õhuliinijuhtme parameeter	AC-120	AC-400
Alumiiniumtraatide soojusmahtuvus, J °C ⁻¹ m ⁻¹	365	990
Terastraatide soojusmahtuvus, J °C ⁻¹ m ⁻¹	80	278
Kiirgusabsorptsioonitegur	0,71	0,67
Kiirguseemissioonitegur	0,85	0,75
Vahelduvvoolutakistus, Ω km ⁻¹	0,252	0,0712

Käesoleva töö tulemustele toetudes on võimalik välja pakkuda mitmeid edasisi uurimisteemasid. Üks võimalus on teha käsitletud parameetrite täpsemaks määramiseks korduskatseid. Suhteliselt laia uurimisteema tõttu ei viidud käesoleva töö raames läbi kordusmõõtmisi, mistõttu puuduvad hinnangud uuritud parameetrite väärtuste määramatustele. Parameetrite väärtuste usaldusväärsus kasvaks sõltumatute kordusmõõtmiste läbiviimisega oluliselt. Samuti tuleks uurida katsekehasid, mis on kogutud liinide eri lõikudelt, sest ühe katsekeha uurimisel saadud tulemused, eelkõige kiirgustegurite väärtused, ei pruugi esindada õhuliini terves ulatuses.

Kiirgusabsorptsiooni ja -emissiooni katset tuleks korrata täiustatud katsetingimustes, näiteks saaks absorptsioonitegurit määrata kõrgema temperatuuriga kiirgusallika abil, mille spekter sarnaneb suuremal määral maapinnale jõudva päikesekiirguse spektriga. Võrdlusmomendi tekitamiseks võib õhuliinijuhtmete vahelduvvoolutakistust määrata kasutades mõnda allikas [2] kirjeldatud meetodikat. See omakorda eeldaks juhtmematerjalide põhjalikumalt uurimist,

eelkõige juhtmetes kasutatud terase peamagneetimiskõvera määramist. Villari efekti mõju arvestamiseks tuleks uurida ka terastraatide suhtelise magnetilise läbitavuse sõltuvust tõmbel tekkivast mehhaanilisest normaalpingest. Samuti tuleks määrata vananenud õhuliinijuhtmete pinnal esineva saaste keemiline koostis ja uurida vananenud juhtmete koroonalahenduste karakteristikuid.

Ajakohase teabe olemasolu elektriliini komponentide füüsikaliste parameetrite kohta on elektrivõrgu optimaalse käitamise põhilisi eelduseid. Tehtud töö annab ülevaate vananenud õhuliinijuhtmete olukorda mõjutavatest teguritest. Selle tulemustele põhinedes saab edaspidi mitmekülgset läheneda kavandatud talitusperioodi lõpule lähenevate terasalumiiniumjuhtmetega õhuliinide seisundi hindamisele.

Kirjandus

- [1] Y. Tsimberg, K. Lotho, C. Dimnik, N. Wrathall ja A. Mogilevsky, „Determining Transmission Line Conductor Condition and Remaining Life,“ *IEEE PES T&D Conference and Exposition*, Chicago, 2014.
- [2] CIGRE, *345: Alternating Current Resistance of Helically Stranded Conductors*, 2008.
- [3] CME Wire and Cable, Inc., „BareNRG; ACSR, Aluminum Conductor Catalog Item,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.cmewire.com/catalog/sec03-bac/bac-07-acsr.php>. [Kasutatud 15 03 2017].
- [4] The Aluminum Association, *Aluminum Electrical Conductor Handbook*. Third edition, Washington, D.C., 1989.
- [5] Electric Power Research Institute, „Demonstration of Advanced Conductors for Overhead Transmission Lines,“ Palo Alto, California, 2008.
- [6] CIGRE, *CIGRE Green Book on Overhead Lines*, K. O. Papailiou, Toim., Pariis: PARISIANOU S.A., 2014.
- [7] A. Oitsalu, H. Klemmer ja T. Raudsepp, *HLS 330/110 kV elektriliini trassi asukoha määramine: ekspert hinnang trassile jäävate õhuliinide seisukorrale*, Tallinn: Ramboll Eesti AS, 2013.
- [8] M. Meldorf, H. Tammoja, Ü. Treufeldt ja J. Kilter, *Jaotusvõrgud*, Tallinn: TTÜ kirjastus, 2007.
- [9] IEEE, *IEEE Std 738-2012: Standard for Calculating the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors*, New York, 2012.
- [10] CIGRE, *207: Thermal Behaviour of Overhead Conductors*, 2002.
- [11] L. L. Grigsby, *Electric Power Generation, Transmission, and Distribution*, Third Edition, CRC Press, 2016.
- [12] M. M. I. Bhuiyan, P. Musilek, J. Heckenbergerova ja D. Koval, „Evaluating Thermal Aging Characteristics of Electric Power Transmission Lines,“ *23rd Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)*, Calgary, 2010.

- [13] M. Muhr, S. Pack ja S. Jaufer, „Elongation of Overhead Line Conductors Under Combined Mechanical and Thermal Stress,“ *International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*, Peking, 2008.
- [14] CIGRE, 299: *Guide for Selection of Weather Parameters for Bare Overhead Conductor Ratings*, 2006.
- [15] X. Bian, D. Yu, L. Chen, J. M. K. MacAlpine, L. Wang, Z. Guan ja F. Chen, „Influence of Aged Conductor Surface Conditions on AC Corona Discharge With a Corona Cage,“ *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, kd. 18, nr 3, pp. 809-818, 2011.
- [16] American Society for Testing and Materials International, „How Metallic Coatings Protect Steel,“ 04 2006. [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://www.astm.org/SNEWS/APRIL_2006/dallynside_apr06.html. [Kasutatud 11 03 2017].
- [17] J. Valtin, V. Voltri, P. Raesaar, P. Taklaja ja I. Kiitam, *Lep15071 "Elering AS alajaamade ja liinide 2015-2019 aasta investeringute ekspertiis"*, Tallinn: TTÜ, 2015.
- [18] M. Zhao, Q. Zhou ja X. Zhao, „The Fretting Fatigue Analysis between Strands of ACSR,“ *International Conference on Electrical and Control Engineering (ICECE)*, Yichang, Hiina, 2011.
- [19] V. Russak, A. Kallis ja H. Tooming, *Eesti kiirguskliima teatmik*, Tallinn: OÜ Stilett Trükikoda, 2003.
- [20] EMD International A/S, *energyPRO 4.4.340*, Aalborg, 2017.
- [21] P. Taklaja, P. Peetsalu, P. Jürgenson, M. Saarna, L. Kurissoo ja I. Kiitam, „Aruanne: Vananevate juhtmete füüsikalised omadused,“ TTÜ, Tallinn, 2016.
- [22] S. Sepper, L. Kurissoo, P. Peetsalu ja P. Jürgenson, „A6 Terastraadi tsingikatte massi ja ühtluse määramine. Määrde massi määramine,“ TTÜ, Tallinn, 2017.
- [23] National Center for Biotechnology Information, U.S. National Library of Medicine, „ZINC | Zn | CID 23994 - structure, chemical names, physical and chemical properties, classification, patents, literature, biological activities, safety/hazards/toxicity information, supplier lists, and more,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/zinc#section=Chemical-and-Physical-Properties>. [Kasutatud 15 04 2017].
- [24] Engineers Edge, LCC, „Specific Heat Capacity of Metals Table Chart | Engineers Edge | www.engineersedge.com,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval:

- http://www.engineersedge.com/materials/specific_heat_capacity_of_metals_13259.htm.
[Kasutatud 15 04 2017].
- [25] V. A. Coleman ja C. Jagadish, „Basic Properties and Applications of ZnO,“ *Zinc Oxide Bulk, Thin Films and Nanostructures*, Elsevier Science, 2006, p. 600.
- [26] National Center for Biotechnology Information, „ZINC CARBONATE | CO₃Zn - PubChem,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/zinc_carbonate#section=Chemical-and-Physical-Properties. [Kasutatud 25 04 2017].
- [27] MatWeb, LLC, „Zinc Carbonate, ZnCO₃,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=07db367f05784713ae637b1454bd2680>. [Kasutatud 25 04 2017].
- [28] National Oceanic and Atmospheric Administration, „ZINC CARBONATE | CAMEO Chemicals | NOAA,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://cameochemicals.noaa.gov/chris/ZCB.pdf>. [Kasutatud 16 04 2017].
- [29] European Virtual Institute for Thermal Metrology, „Emissivity and Other Infrared-Optical Properties Measurement Methods,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.evitherm.org/files/813/directradiometrictechniques.pdf>. [Kasutatud 25 04 2017].
- [30] Optris GmbH, *Non-contact Temperature Measurement on Metal Surfaces via Infrared*, Berliin, 2011.
- [31] National Aeronautics and Space Administration (NASA), „Sun - By the Numbers | Planets - NASA Solar System Exploration,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://solarsystem.nasa.gov/planets/sun/facts>. [Kasutatud 11 04 2017].
- [32] Encyclopædia Britannica, Inc., „Wien's law | physics | Britannica.com,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.britannica.com/science/Wiens-law>. [Kasutatud 15 04 2017].
- [33] National Renewable Energy Laboratory, „Solar Spectral Irradiance,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am1.5/>. [Kasutatud 13 04 2017].
- [34] R. E. Bolz, *CRC Handbook of Tables for Applied Engineering Science*, London: CRC Press, 1973, p. 1184.

Lisad

L.1. Õhuliinijuhtme AC-400 alalisvoolutakistuse mõõtmise katse tulemused

L.1. AC-400 alalisvoolutakistus

Tabel L.1.1 Vananenud juhtme AC-400 alumiiniumtraatide takistuse katse mõõtetulemused ja nende põhjal arvatud alalisvoolutakistused. Juhtme sisemise alumiiniumtraatide kihi järjenumbri ees on "S".

	traadi nr	Madalam temperatuur			Kõrgem temperatuur			Alalisvoolutakistus			
		I (A)	U (mV)	θ_1 (°C)	I (A)	U (mV)	θ_2 (°C)	R_1 (mΩ)	R_2 (mΩ)	α_{DC} ($10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)	R_{i20} (mΩ)
Välimine alumiiniumtraatide kiht	1	30,17	57,39	6,3	30,17	67,41	44,8	1,902	2,234	4,535	2,020
	2	30,17	56,83	6,4	30,17	66,95	44,7	1,884	2,219	4,649	2,003
	3	30,17	56,69	5,8	30,17	67,05	43,6	1,879	2,222	4,835	2,008
	4	30,17	56,46	5,1	30,17	66,5	43,2	1,871	2,204	4,667	2,002
	5	30,17	56,46	4,7	30,17	66,08	42,3	1,871	2,190	4,532	2,001
	6	30,17	56,35	4,9	30,17	65,95	42,0	1,868	2,186	4,592	1,997
	7	30,17	56,31	5,2	30,17	66,15	41,5	1,866	2,193	4,814	1,999
	8	30,17	56,59	5,2	30,17	66,08	41,0	1,876	2,190	4,684	2,006
	9	30,17	56,68	5,4	30,17	68,27	49,0	1,879	2,263	4,690	2,007
	10	30,17	56,32	5,8	30,17	67,9	48,7	1,867	2,251	4,793	1,994
	11	30,17	56,77	5,9	30,17	67,86	47,8	1,882	2,249	4,662	2,005
	12	30,17	56,59	5,9	30,17	68,09	47,3	1,876	2,257	4,909	2,006
	13	30,17	57,09	5,8	30,17	67,99	46,6	1,892	2,254	4,680	2,018
	14	30,17	56,42	6,2	30,17	67,23	46,4	1,870	2,228	4,766	1,993
	15	30,17	56,67	6,3	30,17	67,06	45,3	1,878	2,223	4,701	1,999
	16	30,17	57,21	6,6	30,17	67,27	44,4	1,896	2,230	4,652	2,014
	17	30,17	56,86	6,9	30,17	66,77	44,2	1,885	2,213	4,673	2,000
Sisemine alumiiniumtraatide kiht	S1	30,01	55,97	8,7	30,01	64,37	39,6	1,865	2,145	4,857	1,967
	S2	30,01	56,01	8,9	30,01	64,15	39,2	1,866	2,138	4,796	1,966
	S3	30,01	55,39	8,7	30,01	63,1	38,8	1,846	2,103	4,624	1,942
	S4	30,01	55,70	8,5	30,01	65,25	45,0	1,856	2,174	4,697	1,956
	S5	30,01	56,02	8,6	30,01	65,27	44,4	1,867	2,175	4,612	1,965
	S6	30,01	56,05	8,8	30,01	65,3	43,7	1,868	2,176	4,729	1,967
	S7	30,01	55,53	8,9	30,01	64,66	43,3	1,850	2,155	4,780	1,949
	S8	30,01	55,97	8,8	30,01	64,9	42,8	1,865	2,163	4,693	1,963
	S9	30,01	55,81	8,8	30,01	64,37	41,8	1,860	2,145	4,648	1,957
	S10	30,01	55,72	9,1	30,01	64,2	41,8	1,857	2,139	4,654	1,951
	S11	30,01	55,77	9,3	30,01	64,01	41,2	1,858	2,133	4,632	1,950