



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOO

INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

**ABB liigpingepiirikute
monitoorimise seadme
katsetamine**

**Testing of ABB Wireless
Monitor for Surge
Arresters**

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Andri Kosemaa

Üliõpilaskood: 185812EAAB

Juhendaja: Ivar Kiitam, nooremteadur

Tallinn, 2022

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.

“18” mai 2022

Autor: *(allkirjastatud digitaalselt)*

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö esitatud nõuetele

“18” mai 2022

Juhendaja: *(allkirjastatud digitaalselt)*

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”20... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Andri Kosemaa

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose ABB liigpingepiirikute monitoorimise seadme katsetamine, mille juhendaja on Ivar Kiitam,

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

18.05.2022

¹ Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loominguulise tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

Autor: Andri Kosemaa

Lõputöö liik: Bakalaureusetöö

Töö pealkiri: ABB liigpingepiirikute monitoorimise seadme katsetamine

Kuupäev: 18.05.2022

47 lk

Ülikool: Tallinna Tehnikaülikool

Teaduskond: Inseneriteaduskond

Instituut: Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

Töö juhendaja: nooremteadur Ivar Kiitam

Sisu kirjeldus:

Elektrivõrkudes kasutatakse liigpingepiirikuid, et kaitsta võrgu seadmeid liigpingete eest. Liigpingepiirikute monitoorimisseade mõõdab välistemperatuuri, õhuniiskust, vooluimpulsse ja lekkevoolu ning edastab mõõtetulemused läbi LoRaWAN võrgu pilve. Monitoorimisseadmega on võimalik saada infot võrgus tekkivate liigpingete ja liinide lülitamiste kohta. Seadme poolt kogutud mõõtetulemuste põhjal on võimalik hinnata liigpingepiiriku seisundit.

ABB pakkus Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudile ABB liigpingepiirikute monitoorimisseadme, et seda uurida ja anda tagasisidet seadme tootjale. Antud lõputöö eesmärk on seadet katsetada ning hinnata seadme omadusi, kasutatavust ja anda hinnang selle kasutamisevõimalustele tuleviku elektrivõrkudes.

Märksõnad: liigpinged, liigpingepiirik, piiramatu soojenemine, omaduste halvenemine, monitoorimisseade

ABSTRACT

<i>Author:</i> Andri Kosemaa	<i>Type of the work:</i> Bachelor Thesis
<i>Title:</i> Testing of ABB Wireless Monitor for Surge Arresters	
<i>Date:</i> 18.05.2022	47 lk
<i>University:</i> Tallinn University of Technology	
<i>School:</i> School of Engineering	
<i>Department:</i> Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics	
<i>Supervisor of the thesis:</i> Early stage researcher Ivar Kiitam	
<p><i>Abstract:</i></p> <p>Surge arresters are used in power grids to protect the devices connected to the grid. Wireless surge arrester monitor measures ambient temperature, humidity, leakage current and surges. The device transmits the measurements to the cloud through the LoRaWAN network. With the monitoring device it is possible to get information about overvoltages and line switching in the network. Based on the measurement results collected by the device, it is possible to assess the condition of the surge arrester.</p> <p>ABB provided the Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics with an ABB surge arrester monitoring device to test it and provide feedback to the device manufacturer. The aim of this thesis is to test the device and evaluate the device's properties, usability and to evaluate its use in future power grids.</p>	
<i>Keywords:</i> surges, surge arrester, thermal runaway, degradation, surge arrester monitor	

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema:	ABB liigpingepiirikute monitoorimise seadme katsetamine
Lõputöö teema inglise keeles:	Testing of ABB Wireless Monitor for Surge Arresters
Üliõpilane:	Andri Kosemaa 185812
Eriala:	Elektroenergeetika
Lõputöö liik:	bakalaureusetöö
Lõputöö juhendaja:	Ivar Kiitam
Lõputöö kaasjuhendaja:	-
(ettevõtte, amet ja kontakt)	
Lõputöö ülesande kehtivusaeg: (kehtivusaja annab juhendaja)	2021/2022 2021/2022 Kevad
Lõputöö esitamise tähtaeg:	18.05.2022

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppekava juht (allkiri)

1. Teema põhjendus

ABB on ülikoolile andnud enda toodetava juhtmevaba liigpingepiirikute monitoorimiseseadme (edaspidi: monitor), mis on Eesti elektrivõrkude kontekstis uudne. Seda seadet on tarvilik katsetada, et selle omadusi ja võimekusi hinnata ning analüüsida selle kasutusvõimalusi tuleviku elektrivõrkudes.

2. Töö eesmärk

Töö eesmärgiks on liigpingepiirikute monitori mitmekülgselt katsetada, sh hinnata selle omadusi, võimekusi, kasutusmugavust ja rakenduspotentsiaali.

3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

- Saavutada täielik ülevaade monitori tootjapoolsest spetsifikatsioonist.
- Sidestada monitor ülikooli LoRaWAN võrguga ja viia talitusvalmidusse.
- Katsetada seadme erinevaid funktsioone.
- Viia läbi laboratoorsed katsed monitori ja erinevate liigpingepiirikutega.
- Analüüsida seadme võimekusi ja hinnata selle kasutusperspektiivi tuleviku elektrivõrkudes.

4. Lähteandmed

Lähteandmed saadakse uuritava seadme dokumentatsioonist ja teistest kirjandusallikatest. Vajadusel hangitakse toetavaid andmeid tootjalt ja/või elektrivõrguettevõtelt.

5. Uurimismeetodid

Uurimismeetodika sisaldab kirjanduse analüüsi, laboratoorseid katseid ja katseandmete analüüsi. Andmete analüüsimisel kasutatakse eelkõige tabelarvutustarkvara.

6. Graafiline osa

Töö graafiline osa paikneb peamiselt töö põhiosas. Töö lisadesse paigutatakse vajadusel katseprotokollid, seadme detailne spetsifikatsioon jms.

7. Töö struktuur

- Liigpingepiirikute monitori detailne kirjeldus
- Ülevaade liigpingepiirikutest
- Monitori testimist käsitlev osa
 - o Monitori sidefunktsioonide testimine
 - o Ohutus liigpingepiirikutega katsetamisel
 - o Liigpingepiirikute lekkevoolu mõõtevõimekuse testimine
 - o Liigpingeimpulsside mõõtevõimekuse testimine
- Tulemuste analüüs ja hinnang monitorile

8. Kasutatud kirjanduse allikad

- Monitori dokumentatsioon
- Liigpingepiirikuid käsitlevad standardid ja tootjapoolsed juhendmaterjalid
- Kõrgpingetehnika teemaline kirjandus
- LoRaWAN sidevõrku käsitlevad materjalid

9. Lõputöö konsultandid

Tootjapoolne tugisik, vajadusel.

10. Töö etapid ja ajakava

Monitori dokumentatsiooniga tutvumine (23.12.2021)

Teemaga seonduva teoreetilise materjali läbitöötamine (01.02.2022)

Monitori seadistamine ja talitusvalmidusse viimine (15.02.2022)

Monitori katsetamine (01.03.2022)

Lõputöö esialgse versiooni esitamine juhendajale (15.03.2022)

Lõputöö teise versiooni esitamine juhendajale (01.04.2022)

Lõputöö eelkaitsmine (15.04.2022)

Lõputöö lõppversiooni esitamine (15.05.2022)

SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE	4
ABSTRACT	5
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE	6
SISUKORD.....	8
EESSÕNA	9
LÜHENDITE JA SÜMBOLITE LOETELU	10
SISSEJUHATUS	11
1. ÜLEVAADE LIIGPINGETEST	13
1.1 Ajutised liigpinged	13
1.2 Lülitusliigpinged	14
1.3 Välguliigpinged	15
2. METALLOKSIIDPIIRIKUD	17
2.1 ZnO piiriku tööpõhimõte ja ehitus.....	17
2.2 Metalloksiidpiirikute parameetrid	20
2.3 ZnO piirikute soojenemine.....	21
2.4 ZnO piirikud lühistalitusel	25
2.5 ZnO piirikute omaduste halvenemise hindamine lekkevoolu põhjal	26
3. ÜLEVAADE ABB LIIGPINGEPIIRIKUTE MONITOORIMISSEADMEST	28
3.1 Monitoorimisseadme tööpõhimõte	28
3.2 Monitoorimisseadme töökorda seadmine	30
3.3 Monitoorimisseadme infovahetus.....	31
3.4 Ülevaade liigpingepiirikute monitoorimisseadmetest	34
4. ABB MONITOORIMISSEADME KATSETAMINE JA MÕÕTETULEMUSTE ANALÜÜS	36
4.1 Lekkevoolu mõõtmine.....	36
4.2 Vooluimpulsside mõõtmine	38
4.3 Tulemuste analüüs	41
4.4 Monitoorimisseadmele hinnangu andmine	42
KOKKUVÕTE	45
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	46

EESSÕNA

ABB pakkus ülikoolile õppetöös kasutamiseks liigpingepiirikute monitoorimisseadme, et seda katsetada ja sellele hinnang anda. Minu juhendaja pakkus mulle lõputöö teemaks seadme katsetamise. Tundsin, et oleks huvitav tutvuda antud seadmega, seda katsetada ja sellele lõpuks ka hinnang anda. Töö eesmärgiks oli anda hinnang seadme võimekustele, kasutusmugavusele ja rakenduspotentsiaalile.

Otsustasin katsetada seadme omadusi erinevate katsetega ning analüüsida mõõtetulemusi. Andsin hinnangu seadme võimekustele ja rakenduspotentsiaalile arvestades katsetulemusi, seadme parameetreid ja seadme kasutamise kogemust. Lisaks võrdlesin seadet turul olemasoleva analoogse monitoorimisseadmega. Impulssvoolu katsed teostati Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudi kõrgepingelaboris. Lekkevoolu katsed teostati erinevates TalTech-i energeetikamaja laborites.

Sooviksin tänada vanemteadur Mairo Leierit ja ABB kontaktisikuid Harold Martinez-Salazari ja Ektor Sotiropouloosi, kes aitasid seadme töökorda seadmisega ja jooksvate küsimustega.

Soovin tänada enda juhendajat Ivar Kiitamit tema tehtud töö eest, mis aitas kaasa minu lõputöö valmimisele.

LÜHENDITE JA SÜMBOLITE LOETELU

A	tegur, mis sõltub piiriku ehitusest ja piirikule rakendatud pingest
a	mittelineaarsuseksponent
ALP	ajutise liigpinge kõver
C_T	soojusjuhtivustegur
$EPDM$	etüleenpropüleen-dieen monomeerkumm
EPM	etüleenpropüleenkumm
I_n	nimilahendusvool
IoT	asjade internet (<i>Internet of things</i>)
k	Boltzmanni konstant
k_1	võrdekonstant
P	soojuse eraldumine LPP-s, kui pinge on V_1
P_1	soojuse eraldumine LPP-s
P'	soojuse eraldumine LPP-s, kui pinge on V_2
P''	soojuse eraldumine LPP-s, kui pinge on V_3
Q	soojuskadu, kui keskkonna temperatuur on T_a
Q_1	keskkonda hajuv soojus
Q'	soojuskadu, kui keskkonna temperatuur on T_f
T	liigpingepiiriku sisemine temperatuur
T_a	välitemperatuur
U_C	piiriku kestav talitluspinge
U_r	piiriku nimipinge
U_{res}	piiriku jääkpinge
W_C	aktiveerimisenergia
X	madalam stabiilsuspunkt
Y	kõrgem stabiilsuspunkt

SISSEJUHATUS

ABB pakkus Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudile ABB liigpingepiirikute monitoorimisseadme, et seda uurida ja anda tagasisidet seadme tootjale. Töö eesmärgiks on seadet katsetada ning hinnata seadme omadusi, kasutatavust ja anda hinnang selle kasutamisevõimalustele tuleviku elektrivõrkudes. Liigpingepiirikut (LPP) läbivat lekkevoolu on otstarbekas jälgida, kuna selle põhjal on võimalik planeerida hooldusi ja hinnata piiriku seisundit. LPP-te töökindluse tagamisega on võimalik vähendada katkestuste aega ja hoolduskulusid ning tõsta võrgu töökindlust.

Liigpingete tulemusena võib toimuda võrgu seadmete isolatsiooni läbilöök. Näiteks võib toimuda läbilöök trafo mähise isolatsioonis või kondensaatorpatarei dielektrikus. Võrgu isolatsiooni koordineerimisel arvestatakse LPP-te kaitsega. Tänu sellele on võimalik ehitada võrgu seadmeid madalama isolatsioonitasemega ning seeläbi on võimalik planeerida ja ehitada majanduslikult optimaalsem võrk.

Tänapäeva võrkudes kasutatakse põhiliselt metalloksiid LPP-sid. Erinevalt ränikarbiidpiirikutest puudub metalloksiidpiirikutes sädevahemik. Metalloksiid LPP sädevahemiku puudumise tõttu on pidev ühendus faasi ja maa vahel. Faasi ja maa vahelise ühenduse tõttu läbib piirikut pidev lekkevool, mis on tavaliselt milliamprites. Metalloksiidpiiriku omaduste halvenemise kiirus sõltub lekkevoolust ning piiriku omaduste halvenedes muutub lekkevool suuremaks. Tänu sellele on võimalik lekkevoolu põhjal anda hinnang LPP kasutusaja lõpule. Lekkevoolu kadude tõttu soojeneb liigpingepiirik. LPP pingevoolu karakteristik omakorda sõltub temperatuurist. Seetõttu suureneb ka lekkevool piiriku sisemise temperatuuri tõusuga. Sellise protsessi kordumisel võib teatud tingimustel tekkida piiriku piiramatu soojenemine. Liigse soojenemise tulemusena võib tekkida LPP-le kahjustusi, mille tõttu piirik pole enam kasutuskõlblik. LPP lekkevoolu ja välistingimuste jälgimisega on võimalik anda hinnang LPP talitlusele ja piiriku seisundile. Lisaks sõltub lekkevool liigpingetest võrgus. Seetõttu on lekkevoolu jälgimisega võimalik saada infot ka LPP-d läbivatest liigpingedest.

ABB liigpingete monitoorimisseade ühendatakse LPP ja maa vahele. Monitoorimisseade mõõdab piirikut läbivat lekkevoolu, välistemperatuuri ja õhuniiskust. Seade edastab kord päevas mõõtmiste kokkuvõtted pilve läbi LoRaWAN võrgu. Erandjuhul saadetakse infot kohe peale liigpinge tuvastamist. Eesti võrkude kontekstis on tegemist uudse seadmega. Seetõttu on seda otstarbekas katsetada, et hinnata selle omadusi ja võimekusi ning analüüsida seadme kasutamisevõimalusi tuleviku elektrivõrkudes. Seadet katsetati TalTechi

kõrgepingelaboris. Liigpingete tekitamiseks kasutati impulsspingegeneraatorit. Katsetamisel kasutati metalloksiid LPP-d.

Töö esimeses osas antakse ülevaade erinevatest liigpingetest ja nende tekkepõhjustest. Teises osas vaadeldakse metalloksiidpiiriku tööpõhimõtet ja ehitust ning kirjeldatakse erinevaid LPP-te parameetreid. Kirjeldatakse ka LPP-te lekkevooluga seotud protsesse. Töö kolmandas osas antakse ülevaade ABB liigpingete monitoorimisseadmest. Vaatluse all on seadme tööpõhimõte, infovahetus ja seadmega seotud tehnilised andmed. Neljandas osas kirjeldatakse seadme katsetamist, analüüsitakse mõõtetulemusi ning antakse hinnang monitoorimisseadmele.

1. ÜLEVAADE LIIGPINGETEST

Liigpinged tekivad võrkudes erinevatel põhjustel. Väikse amplituudiga, kuid kõige pikema kestvusega on ajutised liigpinged, ajutised liigpinged kujutavad ohtu võrguseadmetele pikaajalise toime tõttu. Teist tüüpi liigpinged, mis võrgus tekivad, on lülitusliigpinged, suurema amplituudi tõttu on lülitusliigpinged võrgu seadmetele ohtlikumad. Alates 500 kV võrkudes on välguliigpinge sama amplituudiga kui lülitamisliigpinged. Kõrgemate nimipingetega võrkudes muutuvad lülitusliigpingete amplituudid suuremaks kui välguliigpingetel. Kolmandat tüüpi liigpinged tekivad välgulöökidest. Välgulöök võib tabada otse liini, liinmasti või liini lähedale maasse. Liini otsetabamuse puhul tekib liigpinge otseselt välgulöögist, masti tabamuse puhul tekib võrku liigpinge juhul, kui masti tippu tekkiv pinge ületab õhuliinijuhtme ja masti vahelist elektrilist tugevust ning toimub ülelöökk mastist juhtmele. Juhul kui välgulöök toimub liini läheduses, siis tekib liigpinge induktiooni mõjul. [1]

1.1 Ajutised liigpinged

Üldjuhul on ajutised liigpinged pikaajalisema toimega kui lülitusliigpinged või välgulöökidest tekitatud liigpinged. Ajutised liigpinged tekivad erinevatel põhjustel, näiteks lühistest, lülitamistest, katkemistest, resonantsist ja ferroresonantsist. Võrgusageduslikud liigpinged on võrgu nimipingest 1,15 kuni 2 korda suurema amplituudiga.

Faaside vahel tekib ebasümmeetriline olukord siis, kui ühes faasis tekib maalühis. Maalühisega faasis tekib tavalisest talitlusest suurem vool ning pinge langeb. Ülejäänud kahes faasis tõusevad pinged. Maalühised, mis tekivad toitepunktile lähemal, on suurema voolu väärtusega. Sellel põhjusel on maalühisest tekkiv liigpinge väiksem, kui lühis mis tekib toitepunktist kaugemal. Nimipingega 400 kV liinis võib tekkida liigpinge, mille väärtus on kuni 1,5 korda suurem pingest tavatalitlusel, mis võib kesta kuni 1 sekund ning seejärel rakendub üldjuhul kaitseautomaatika. [1]

Juhul kui liin lülitatakse välja või toimub selle katkemine, siis kaob hetkega koormus fiidri. Pikema fiidri puhul, kus toidetakse koormuseta liini, tõuseb pinge. See toimub Ferranti nähtuse tõttu. Liinis olemasolevate mahtuvuste ja induktiivsuste vahel võib esineda vonkeprotsesse. Vonkeprotsesside tõttu tekivad fiidri kaugeimas punktis pingetõusud.

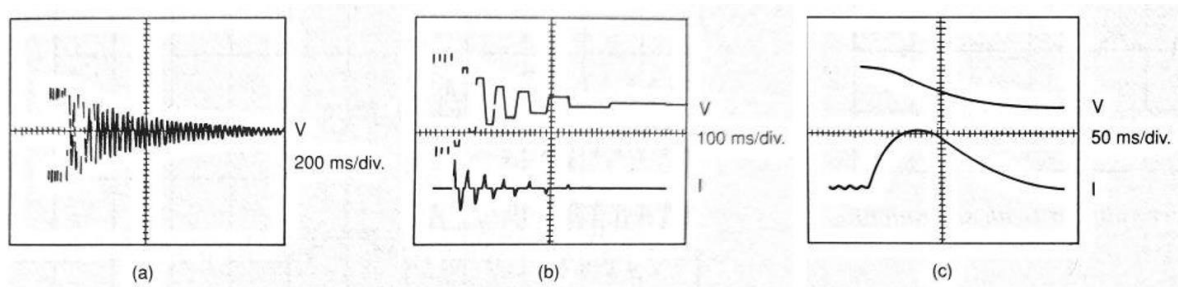
Pikema fiidri puhul on liini kaugemas punktis tekkiv liigpinge suurem, kui lühema fiidri puhul. [1]

Fiidris, kus induktiivsuse ja mahtuvuse poolt tekitatud omavõnkesagedus on ligikaudu sama väärtusega, kui võrgus olev sagedus, võib esineda liinis resonantsliigpingeid. Võrkudes kasutatakse pikimahtuvusi, et parandada induktiivtakistust, seeläbi on võimalik muuta ülekandevõimet paremaks. Olukorras, kus sellises fiidris tekib maalühis, muutub fiidri pikkuseks kaugus, mis on toitepunktist kuni lühiseni. Sellise olukorra puhul, võib omavõnkesageduse ja võrgu sageduse väärtused muutuda ligikaudu samaks. Sellisel juhul tekib ajutine liigpinge, mis võib olla piisavalt suure väärtusega, et toimuks kondensaatori isolatsiooni läbilöök. Sellel põhjusel on otstarbekas antud seadmeid kaitsta piirikutega.

1.2 Lülitusliigpinged

Ajutised liigpinged on väiksema pinge amplituudväärtuse tõttu võrguseadmetele vähem ohtlikud kui lülitusliigpinged. Liini sisselülitamine võib tekitada liigpingeid liini mahtuvuse ja induktiivsuse tõttu. Olukorras, kus tehakse peale fiidri väljalülitamist kohe sisselülitamine, võib tekkida suurema amplituudväärtusega lülitusliigpingeid. Antud suuremad lülitusliigpinged tulenevad võrku salvestunud jääklaengust. Selliste lülitusliigpingete tekkimist vähendavad fiidril olevad seadmed, milles jääklaeng neeldub suhteliselt kiiresti. Seadmete puudumisel toimub jääklaengu neeldumine ainult tänu kadudele liinis ja koroonale. Erinevate ilmastikutingimuste puhul toimub see 10 kuni 100 sekundiga. Siseliigpinged on võrgu nimipingest kuni 2,8 korda suurema amplituudiga. [1]

Joonisel 1.1 on kolm erinevat graafikut, mis näitavad jääklaengute sumbumist erinevate seadmete puhul. Jõutrafoga tekib ahel, mis koosneb mahtuvusest induktiivsusest ja takistusest. Antud ahelas hakkab jääklaeng võnkuma, see omakorda toimub resonantssagedusel. Sellise võnkumise puhul sumbub jääklaeng 5-50 tsükliga. Jääklaeng sumbub pingetrafo puhul enamjaolt juba esimese tsükliga. See tuleneb sellest, et antud seadme mähise takistus on ligikaudu mitukümmend kilo-oomi. Reaktori puhul neeldub jääklaeng samamoodi nagu jõutrafos.

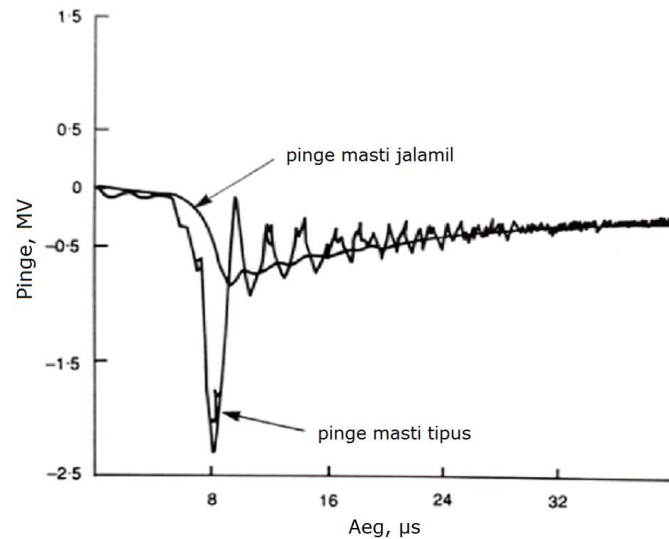


Joonis 1.1 Jääklaengu sumbumine erinevates liini seadmetes a - reaktoriga, b – jõutrafoga, c – pingetrafoga [1]

Fiidri sisselülitamisel tekivad liigpinged ka seetõttu, et kõiki faase pole võimalik ilma ajalise viiteta sisse lülitada. Võimsuslülitid töötavad suurel kiirusel selleks, et ajaline viide oleks võimalikult väike. Sellest sõltumata võib ajaline viide olla erinevate faaside sisselülitamise vahel 3-5 ms. Selles faasis, kus on võimsuse hetkeväärtus suurim, tekib kaarlahendus, hetk enne lõplikku sisselülitamist. Nendel põhjustel toimub ühe faasi lülitamine enne teisi, ning antud faasis tekib ka pinge enne teisi faase. Induktsiooni tõttu tekib pinge teistes faasides enne nende sisselülitamist, sellel põhjusel tekivad liini lülitamisel liigpinged teises kahes faasis. Tekkivate liigpingete väärtused sõltuvad pingete hetkeväärtustest, sellel hetkel kui toimub lülitamine. Liinis tekkivad liigpinged on minimaalsed, kui kõikides faasides on pinge hetkeväärtused lülitamise hetkel võimalikult väikese väärtusega.

1.3 Välguliigpinged

Välgulöök võib tabada otse liini, liinimasti või liini lähedale maasse. Välgulöök on alates 500 kV võrkudes väiksema amplituudväärtusega kui lülitamisliigpinged. Välgulöögist tekitatud liigpinge energia on väiksema väärtusega kui lülitamisliigpingel. Olukorras, kus välgulöök tabab kaitsetrossi, tekib vool läbi masti maasse. See vool võib olla väärtusega 2 kA kuni üle 200 kA. Antud voolust indutseeritakse pinge masti tippu. Pinge tekib tänu kaitsetrossile, masti impedantsile ja välgulöögi vooluimpulsile. Piisavalt suure pinge väärtuse puhul toimub isolaatori ülelöökk mastilt juhtmesse. Pinge hakkab masti ülemise ja alumise otsa vahel võnkuma tänu peegeldustele, mis toimuvad masti jalamil. Peegeldumise määr sõltub maanduse impedantsist. Iga tsükliga liigub osa välgulöögist tekkinud energiat maasse, ning ülejäänud peegeldub tagasi masti tippu. Selliselt on pinge, mis iga tsükliga masti tippu jõuab, järjest väiksem. Atmosfäärilised liigpinged on üldiselt vahemikus 100 kV kuni 1000 kV.



Joonis 1.2 Välgulöögist tekitatud pinge mastis [1]

Isolaatori ülelöögi puhul on juhtmele jõudev pinge väärtus väiksem kui pinge, mis on masti tipus. See on tingitud sellest, et pinge mis jõuab juhtmele on ligikaudu 85% sellest, mis on masti tipus. Antud pinge erinevus on tingitud isolaatori paiknemisest liinimastil. Pinget vähendab veel asjaolu, et juhe on induktiivselt seotud kaitsetrossiga.

Olukorras, kus välgulöök lööb liini lähedale maasse, tekib sellest liigpinge liini. Välgulöögi puhul, mis on negatiivse liidriga, indutseeritakse juhtmesse positiivne laeng. Laeng püsib ühes punktis, kuni välgulöök on maandatud, siis laeng vabaneb. Sellel hetkel kui laengud vabanevad tekivad liigpinged, mis liiguvad laiali juhtme erisuundades.

2. METALLOKSIIDPIIRIKUD

Võrgus tekkivate liigpingete piiramiseks kasutatakse LPP-sid. Algselt kasutati liigpingete piiramiseks sädemikke. Sädemiku rakendumine sõltub õhuniiskusest ja keskkonna temperatuurist sellel põhjusel võib rakendumine hilineda. Lisaks ei kaitse sädemiku vortsekund karakteristik võrgus olevaid seadmeid igas olukorras. Esimene märkimisväärne LPP-te areng toimus 1930-ndatel. Sellel ajal avastati, et ränikarbiidist on võimalik teha mittelineaarsete omadustega takistus. Tänu sellele oli võimalik ehitada ventiillahend, mis koosneb sädevahemikust ja mittelineaarsest takistusest. Sädevahemik täidab lüliti funktsiooni ja mittelineaarne takistus tagab voolu piiramise ning seeläbi kustutab kaarlahenduse. Sädevahemikest arendati omakorda edasi voolu piiravate vahemikega LPP-d. Elektrivõrke arendades ehitati elektriliine, mis olid järjest pikemad, ja kasutusele võeti järjest suuremad nimipinged. Seetõttu tekkisid võrkudes ka järjest suurema energiaga ja amplituudväärtusega liigpinged. Ränikarbiid LPP-te puuduste tõttu muutus antud seadmetega võrkude ehitamine majanduslikult ebapraktiliseks. Antud põhjusel hakati otsima ränikarbiidist veel mittelineaarsemate omadustega materjali. Ränikarbiidi asenduseks leiti tsink(II)oksiid (ZnO). Selle materjali pingevoolu karakteristik on mittelineaarsem kui ränikarbiidi puhul. Alla teatud pingeväärtuse on tsinkoksiid LPP-te takistus suur, sellel põhjusel pole tsinkoksiid LPP-tes vaja sädevahemikke. Tänapäeval on võrgus põhiliselt kasutusel tsinkoksiid LPP-d. Madalamatel pingetel kasutatakse ka sädemikke. Ränikarbiid LPP-te puuduste tõttu neid enam võrku juurde ei lisata. Ränikarbiid LPP-si on veel võrgus ajaloolistel põhjustel.

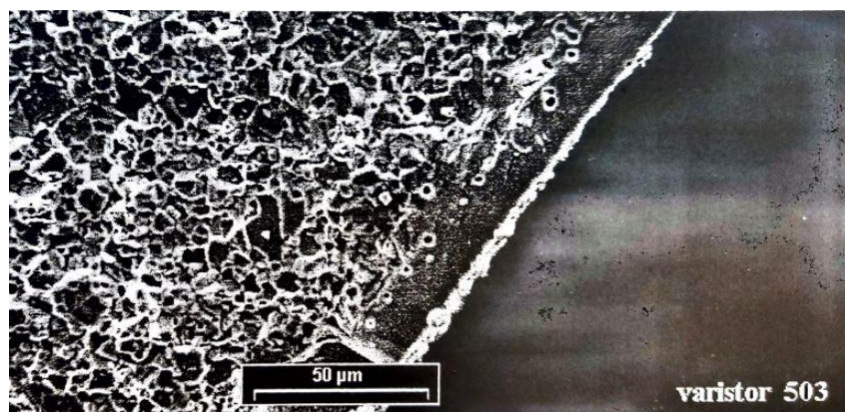
2.1 ZnO piiriku tööpõhimõte ja ehitus

ZnO piiriku põhiline komponent on ZnO keraamilised kettad. Kettad koosnevad üldjuhul ligikaudu 90% tsinkoksiidist ja lisaks väikestes kogustes muid metalloksiide. Ketastes on juhtivaks aineks tsinkoksiid. Põhiline lisand, mida kasutatakse on vismut(III)oksiid (Bi_2O_3). Tänu vismutoksiidile tekivad ketastele mittelineaarsed omadused. Üldjuhul lisatakse veel 5 kuni 10 teist metalloksiidi ning enamjaolt on nendeks- mangaan(II)oksiid (MnO), koobalt(II)oksiid (CoO), kroom(III)oksiid (Cr_2O_3), antimon(III)oksiid (Sb_2O_3), strontsiumoksiid (SrO), baariumoksiid (BaO) ja praseodüüm(22/6)oksiid (Pr_6O_{11}). Antimonoksiidi vähendab potentsiaalibarjääri ja parandab mittelineaarsuseksponenti. Potentsiaalibarjäär on teatud potentsiaal, millest alates hakkavad tsinkoksiid graanulite

vahelised alad voolu juhtima. MittelineaarsusekspONENT on tegur, millest sõltub, kui kiire eksponentsiaalne kasvamine on LPP pingevoolu karakteristikul.

Kroomoksiidi lisamine parandab soojusliku stabiilsust, vismutoksiidi asendajana on võimalik kasutada praseodüümoksiidi. Ülejäänud metalloksiide lisatakse koos vismutoksiidiga, selliselt tekitatakse mittelineaarsed omadused. Baariumoksiidiga on võimalik saada kõige parem mittelineaarsusekspONENT, lisaks kasutatakse veel muid metalloksiide, tänu millele on võimalik parandada erinevaid piiriku omadusi. MittelineaarsusekspONENTi on võimalik tõsta kuni väärtuseni 60, kui lisada nioobium(V)oksiidi (Nb_2O_5). Üldjuhul on mittelineaarsusekspONENT väärtusega 30 kuni 100. Antud lisandi lisamine vähendab lekkevoolu, parandab energia läbilaskevõimet ja kahekordistab piiriku eluiga. Titaan(IV)oksiidi (TiO_2) lisamine suurendab tsinkoksiidi graanuleid, parandab mittelineaarsusekspONENTi ja vähendab potentsiaalibarjääri.

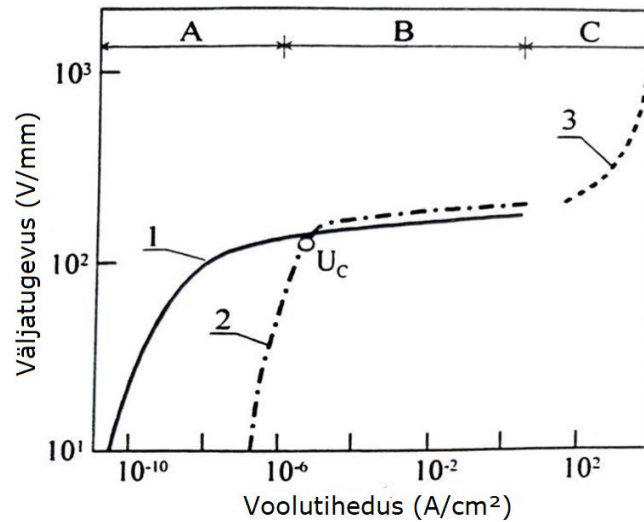
Ketaste mikrostruktuuri koostiseks on enamjaolt ZnO graanulid, mille diameeter on 5-20 μm , graanulite takistus on enamasti 0,001-0,01 Ωm . Graanuleid eraldav materjal on paksusega 0,1-0,2 μm ning koosneb teistest metalloksiid lisanditest. Graanulite vahelised alad töötavad materjalil isolatsioonina, millest tuleneb potentsiaalibarjäär, mille ületamisel muutuvad graanulite vahelised alad juhtivaks. Juhul, kui rakendatud pinge on väiksem kui potentsiaalibarjäär, siis need alad ei juhi. Antud omadusest tulenevad varistorketaste mittelineaarsed omadused.



Joonis 2.1 Pilt metalloksiidpiiriku elemendi pinnast elektronmikroskoobi all [2]

ZnO graanulite suhteline dielektriline läbitavus on vahemikus 8-10, ülejäänud lisandite suhteline dielektriline läbitavus on 16-25. Varistorketaste suhteline dielektriline läbitavus on suur võrreldes mikrostruktuuri koostisosadega, mille suhteline dielektriline läbitavus on väiksem. Ketaste suhteline dielektriline läbitavus on vahemikus 800-1300. Üldjuhul on

ketaste paksuseks 23 mm ja läbimõõd 75 mm, antud mõõtudega varistorketta mahtuvus on ligikaudu 1 nF. [2]



Joonis 2.2 Metalloksiidpiiriku elektriväljatugevuse-voolutiheduse karakteristik [2]

Joonis 2.2 kirjeldab metalloksiidpiiriku elektriväljatugevuse ja volutiheduse sõltuvust. Esimeses piirkonnas muutub volutihedus suhteliselt vähe, kui muuta väljatugevust. Teises piirkonnas on näha, kuidas elektriväljatugevuse-voolutiheduse karakteristik muutub, ning volutihedus hakkab muutuma tunduvalt kiiremini. Teise piirkonna elektriväljatugevuse-voolutiheduse karakteristikut kirjeldab antud valem:

$$I = k_1 \cdot U^a \quad (2.1)$$

kus k_1 - võrdekonstant,

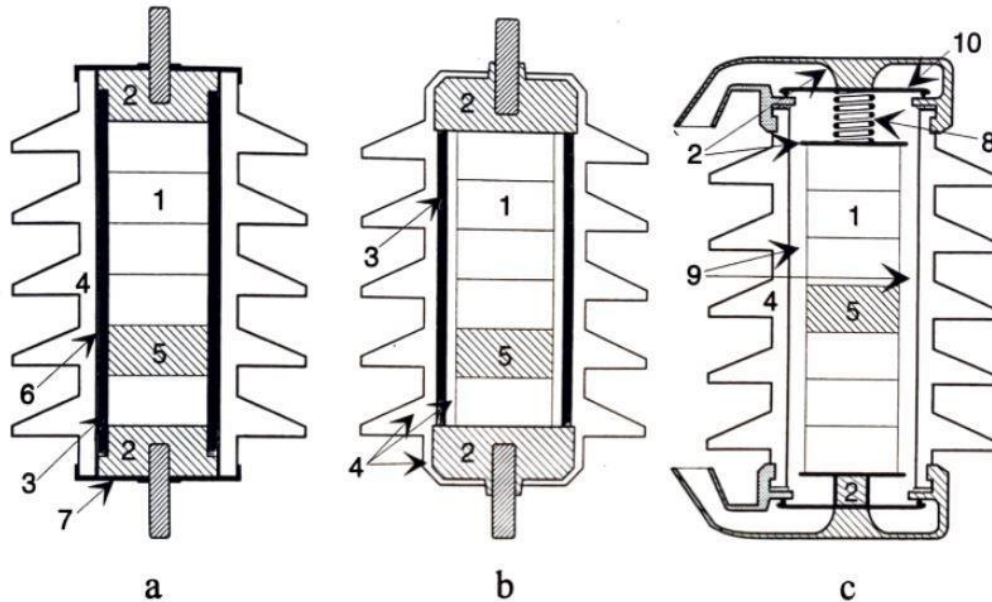
U - pinge,

a - mittelineaarsuseksponent

Mittelineaarsuseksponent on üldiselt väärtusega 30 kuni 100. Kolmanda piirkonna elektriväljatugevuse-voolutiheduse karakteristik sõltub varistorketta takistusest. Selles piirkonnas on volutiheduse muut suhteliselt aeglane, ning selle kiirus sõltub vooluimpulsi frondikestusest ja voolu amplituudväärtusest.

Tänapäeval valmistatakse piirikute kestad polümeerist, vanemate piirikute puhul kasutati selleks portselani ja need piirikud on sisemise gaasiruumiga. Kestaid hakati polümeerist valmistama 1990-ndatel, selleks kasutati etüleenpropüleenkummi (EPM), etüleenpropüleen-dieen monomeerkummi (EPDM) ja silikooni. Piirikud, mille kestad valmistatakse polümeerist on väiksema massiga, ning neid saab ehitada mõõtudelt

väiksemana. Erinevalt portselankestadest, mis võivad rikke ajal puruneda kilduteks, ei ole sellist ohtu polümeerkestade puhul. Polümeerkestad pole nii rabedad ja seda tüüpi kestad on vastupidavamad saastele ja niiskusele ning nendel on paremad soojuslikud omadused. Polümeerkestaga piirikuid on lihtsam toota, see on tingitud sellest, et on vaja vähem komponente ning tootmisprotsessis on vähem etappe. Lisaks on neid lihtsam transportida ja paigaldada, sest nende puhul on väiksem oht, et need purunevad.



Joonis 2.3 Metalloksiidpiirikute kestad. 1 – metalloksiid element, 2 - metallist otsaelektrood, 3 - polümeerist silinder või varras (mehaaniline tugistruktuur), 4 - korpuse materjal, 5 – metallist vaheketas, 6 - vahepealne krunt, 7 - metallist otsakork, 8 - metallist vedru, 9 - sisemine gaasi (õhu) ruum, 10 – survekaitseklapp. [2]

Joonisel 2.3 on näha erineva ehitusega piirikuid. Joonisel piirik a on polümeerkestaga LPP, kus otsakorgid on eraldi ülejäänud kestast ja need on omavahel kinnitatud. Variant b puhul on otsakorgid vormitud otse polümeerkesta ja variant c on portselankestaga LPP, kus on näha sisemist gaasiruumi.

2.2 Metalloksiidpiirikute parameetrid

IEC 60099-4 standardis on kirjeldatud põhilised metalloksiidpiirikute parameetrid. Antud peatükis antakse ülevaade nendest parameetritest. [3]

U_c on kestev talitluspinge, mis on võrgusageduslik siinuseline pinge, mille puhul piirik töötab ilma riketeta.

U_r on nimipinge, mis on maksimaalne väärtus, mille puhul piirik töötab riketeta. Nimipinge määratakse talitlussuutlikuskatsel, katset tehakse 10 s jooksul ning selle käigus määratakse LPP karakteristik.

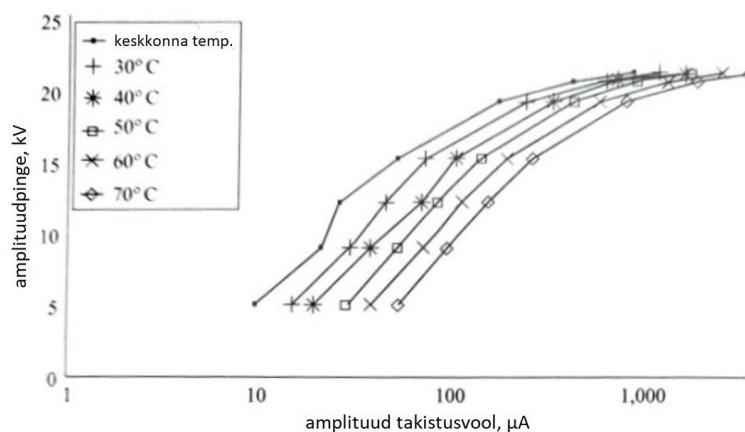
I_n on piiriku nimilahendusvool, millega klasifitseeritakse piirikuid. Antud väärtuse järgi on võimalik valida õige piirik teatud piirkonna välgulöökide nominaalvoolu järgi.

ALP on ajutise liigpinge kõver, mis kirjeldab kui kaua LPP töötab ilma riketeta teatud võrgusageduspingel, antud aja ületamisel võib tekkida termiline ebastabiilsus.

U_{res} on jääkpinge, mis on maksimaalne pinge, mis tekib piiriku kontaktidele olukorras, kus piirikut läbib vooluimpulss. [2]

2.3 ZnO piirikute soojenemine

Tänapäeval kasutatakse liigpingete piiramiseks enamjaolt tsinkoksiid LPP-si. Vanemat tüüpi LPP-tes olid sädevähemikud, sellel põhjusel neid LPP-si ei läbinud pidevalt vool. Metalloksiid LPP-te ehituse tõttu läbib koormuse all piirikuid konstantselt väike vool. Lekkevoolust tulenevad kaod, mille tõttu eraldub soojust piirikusse, LPP omakorda jahtub soojuse keskkonda hajumisega. Olukorras, kus soojuse eraldumine on suurema väärtusega kui soojuse keskkonda hajumine, võib toimuda piiriku piiramatu soojenemine.



Joonis 2.4 LPP pinge-voolu karakteristik erinevatel välistemperatuuridel [4]

Joonisel 2.4 on näha kuidas LPP-t läbiv lekkevool sõltub piiriku kontaktidele rakendatud pingest erinevate keskkonnatemperatuuride puhul. Joonise põhjal on võimalik näha, et kõrgemate välistemperatuuride puhul on LPP lekkevool suurem. LPP madalama juhtivuse piirkonnas on piirik tundlikum temperatuuri muutustele. Nendel põhjustel võib tekkida piirikus piiramatu soojenemise protsess. Soojuse eraldumist piirikusse ja soojuse hajumist keskkonda saab leida antud valemitega:

$$Q_1 = C_T \cdot (T - T_a) \quad (2.2)$$

kus Q_1 – keskkonda hajuv soojus,

C_T - soojusjuhtivustegur,

T - LPP sisemine temperatuur,

T_a - välistemperatuur

$$P_1 = A e^{-(W_c/kT)} \quad (2.3)$$

kus P_1 – soojuse eraldumine LPP-s,

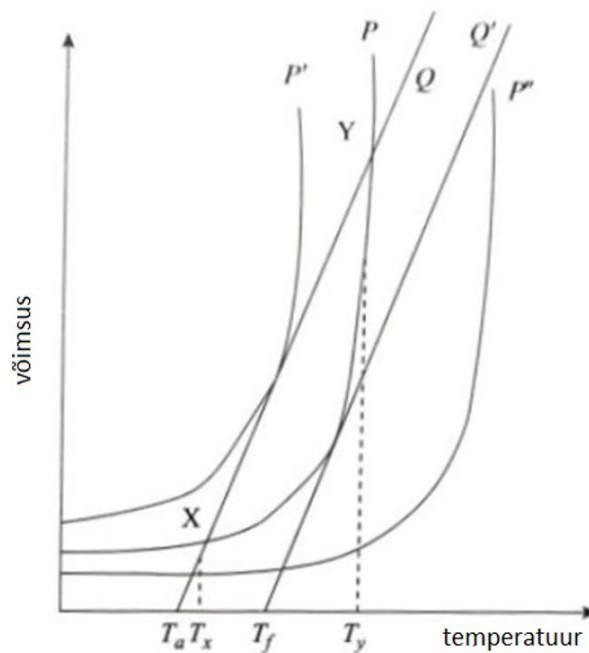
W_c - aktiveerimisenergia,

k - Boltzmanni konstant,

T - LPP sisemine temperatuur,

A – tegur, mis sõltub piiriku ehitusest ja piirikule rakendatud pingest

Valemist 2.2 on näha, et soojuse keskkonda hajumine on võrdelises seoses hajumisteguriga ning väliskeskkonna ja piiriku temperatuuride vahega. Soojuse keskkonda hajumine on parem madalama välistemperatuuri puhul.



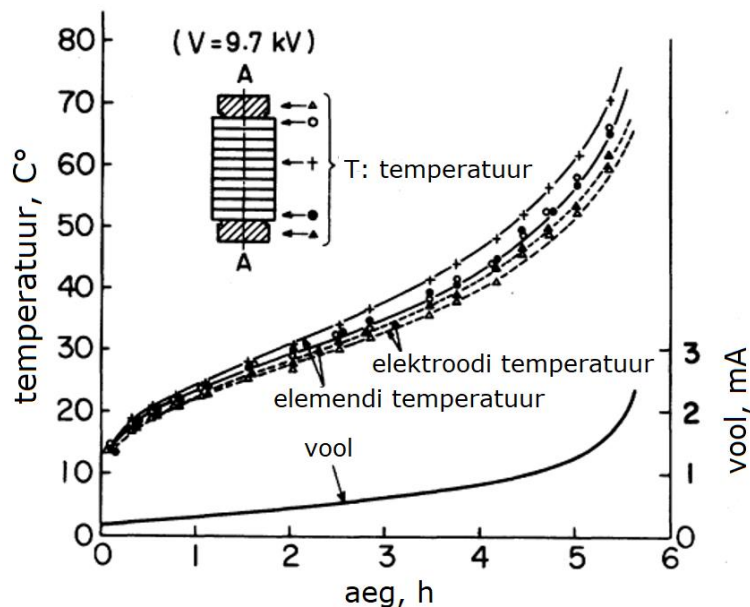
Joonis 2.5 ZnO LPP soojuse keskkonda hajumine ja soojenemine. Q – soojuskadu, kui keskkonna temperatuur on T_a , Q' – soojuskadu, kui keskkonna temperatuur on T_f , P – soojuse eraldumine LPP-s, kui pinge on V_1 , P' – soojuse eraldumine LPP-s, kui pinge on V_2 , P'' – soojuse eraldumine LPP-s, kui pinge on V_3 , X – madalam stabiilsuspunkt, Y – kõrgem stabiilsuspunkt. [4]

Soojuse eraldumine LPP-st keskkonda sõltub keskkonna temperatuurist ning soojuse eraldumine piirikusse sõltub LPP kontaktidele rakendatud pingest. Joonisel 2.5 on näha soojuse eraldumise ja soojuse keskkonda hajumise protsesse erinevatel tingimustel. Erinevad olukorrad tulenevad erinevatest pingetest ja välistemperatuuridest. LPP temperatuur proovib alati liikuda stabiilsema punkti poole, erandjuhtum on LPP piiramatult soojenemine. Joonisel on näidatud stabiilsuspunktid X ja Y , antud punktides on soojuse eraldumine piirikusse ja soojuse keskkonda hajumine ligikaudu sama väärtusega. LPP temperatuur langeb tagasi madalamasse stabiilsuspunkti, selliste siirdeprotsesside puhul, kus ei ületata temperatuuri T_y . Antud temperatuuri ületamisel toimub LPP piiramatult soojenemine. Piirikul puuduvad stabiilsuspunktid olukorras, kus LPP kontaktidele on rakendatud pinge P' . Piiriku töötamisel antud pingel pole võimalik tekitada stabiilset olukorda. Stabiilsuspunktide vahel oleva ala põhjal on võimalik hinnata energiat, mida on võimalik LPP-st läbi lasta. Välistemperatuuri T_a puhul on võimalik LPP stabiilne talitus temperatuuride T_y kuni T_x vahemikus. LPP-st saab rohkem energiat läbi lasta, kui T_y ja T_x temperatuuride vahe on suurem. Praktikas on võimalik vähem energiat läbi lasta, kuna võib toimuda termolöök. Termolöök on mehaaniliste pingete tekkimine materjalis, mis tekivad keha järsu temperatuuri muutuse korral.

Piirik soojeneb kui seda läbib 2 ms jooksul kaks ristkülikukujulist vooluimpulssi, mille amplituudväärtus on 600 A. LPP jahtumiseks madalamasse stabiilsuspunkti võib kuluda kuni tund. [4]

Soojuse keskkonda hajumine on LPP otstes parem kui keskel. Soojuse hajumise parandamiseks aitab jahutusribide lisamine. Jahutusribid parandavad soojuse hajumist kuni kuus korda ja nendega on võimalik suurendada Q väärtust. Lisaks saab muuta X ja Y stabiilsuspunktide vahelist ala suuremaks.

Suurema pinge puhul toimub soojenemisprotsess kiiremini. Joonisel 2.6 on näha kuidas konstantse alalispinge puhul toimub piiriku elemendi soojenemine üle mitme tunni. Viienda ja kuuenda tunni vahel on näha, kuidas temperatuur ja lekkevool hakkavad järsult kasvama. See näitab, et sellel hetkel algas piirikus piiramatu soojenemise nähtus. Protsessi alguseni võib jõuda palju lühema ajaga, kui on rakendatud suurem pinge. [5]



Joonis 2.6 ZnO piiriku lekkevool ja elemendi soojenemine piiramatu soojenemise protsessis [5]

Piiramatu soojenemise protsess algab teatud kriitilisel lekkevoolu väärtusel. Kui seda väärtust teada, siis on lekkevoolu põhjal võimalik hinnata, kas on ohtu piiriku piiramatu soojenemise protsessi tekkimisele. MATLAB programmi põhjal on loodud mudel ZnO LPP-st, millega on võimalik leida piiriku kriitilist lekkevoolu. Allikas [6] pakutakse välja kasutusele võtta vaatluslekkevool, mis on 70% kriitilisest lekkevoolust ning selle eesmärk on olla indikaatoriks, mis annab märku LPP peatsest rikkest. [6]

2.4 ZnO piirikud lühistalitusel

Liigpinge tekkimisel peab liigpingepiirik olema sellise ehitusega, et see ei plahvataks. Lühise tekkimisel võrgus on sellest mõjutatud ka piirik ning lühise korral võib tekkida piiriku sees kaarlahendus. Kui kaarlahendusest tekkiv kuumus ja sellest tekkiv rõhk on piisavalt suured, siis võib liigpingepiirik plahvatada. Selle tulemusena võib piirik välja visata kilde, mille tõttu võib tekkida lähedal paiknevatele seadmetele kahjustusi. Eriti ohtlik on piiriku plahvatamine sellisel juhul, kui keegi parasjagu piiriku lähedal töötab. Selleks, et piiriku plahvatamist vältida on piirikud ehitatud süsteemidega, mis vabastavad piirikust rõhku.

Portselanist kestadega piirikutes on piiriku sees sisemine gaasiruum ning mõlemas otsas survekaitseklapid, mis avanevad liigse rõhu tulemusena. Tänu sellele suunatakse piiriku sees olev liigne gaas välja. Gaasi välja suunamisega liigub ka kaarlahendus piirikust välja, sellise süsteemi puuduseks on see, et rõhu vabanemise tulemusena võivad survekaitseklapid ja ventilatsioonikanalid paigast liikuda või piiriku küljest portselani kilde visata. Selliste riskide vähendamiseks on vajalik piirikuid disainida selliselt, et piirikud peaksid vastu võimalikele lühistele, mis võrgus tekivad.

Polümeerkestadega piirikutes kasutatakse kahte erinevat süsteemi, et vältida piiriku plahvatamist. Nendeks on suletud või mähitud disain ja avatud või puuri disain. Esimese disaini puhul puudub piirikus sisemine vaba ruum ning seetõttu pole otsest teekonda kaarlahenduse tekkimiseks. Seda tüüpi piirikus on ZnO ketaste ümber mähitud klaasfiiber kangas või on klaasfiibril tehtud toru, mille sisse paigaldatakse ZnO kettad. Väline kest valmistatakse polümeerist eraldi vormis või vormitakse otse piiriku sisemiste osade peale. Polümeeri alla lisatakse tavaliselt mäaret või geeli, et täita tühimikke. Sellise disaini puhul toimub rõhu vabastamine polümeerkesta lõhkumisega. Polümeerkest on piisavalt nõrk, et kaarlahendus tekib läbi kesta, tänu sellele liigub kaarlahendus piirikust välja ning piiriku sees rõhku ei teki.

Avatud või puuri disainiga piirikus on klaasfiiber rõngad, vardad või puur. Seda tüüpi piirikus ümbritseb sisemisi elemente kestast pehmem klaasfiiber. Sellisel juhul vaba ruumi piiriku sees pole ning kaarlahendus saab tekkida läbi kanalite, kus on klaasfiiber materjal. Kaarlahenduse tulemusena klaasfiiber põletatakse ning kaar jõuab kanalite kaudu välja.
[7]

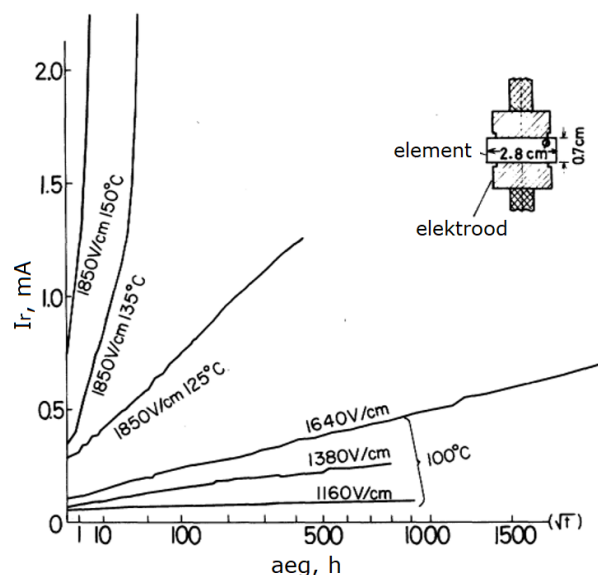
IEEE C62.11-2020 standardis on kirjeldatud kuidas peaks katsetama LPP-sid lühistalitusel. Kirjeldatud on portselanist ja polümeerkestaga piirikute katsed. LPP katse loetakse edukaks, kui piirik ei plahvata. Piiriku purunemine on lubatud, kui selle küljest ei lenda

tükke või kilde katsealast välja. Standardis on kirjeldatud, et erandina võib katsealast väljapoole kukkuda metalloksiidi ketta või portselani kilde, mis on kergemad kui 60 g. Lisaks on lubatud rõhuvabastusavade kaaned ja membraanid ning pehmed polümeerist tükid. Teine tingimus katse edukaks läbimiseks on see, et 2 minutit pärast katse lõppu piirik ei põle. [8]

2.5 ZnO piirikute omaduste halvenemise hindamine lekkevoolu põhjal

LPP lekkevool koosneb takistuslikust komponendist ja mahtvuslikust komponendist. Suhteliselt suure mahtvuse tõttu käitub piirik võrgu nimipingel kondensaatorina. Seetõttu koosneb lekkevool tavatingimustes põhiliselt mahtvuslikust voolust. Mahtvuslik vool sõltub parasiitmahtvustest, lekkevooludest isolaatori pinnal, paralleelselt paiknevate varistoride arvust ja tegelikust tööpingest. Takistuslik lekkevool sõltub temperatuurist ja pingest.

Lekkevoolu mahtvuslik osa sõltub paljudest teguritest. Seetõttu pole võimalik kogu lekkevoolu mõõtmisega täpselt hinnata piiriku omaduste halvenemist. IEC 60099-5 standardi põhjal on võimalik piiriku seisundit usaldusväärselt hinnata takistusliku voolu komponendi mõõtmisega. Erandina saab takistusliku komponenti tuuletada voolu kolmandast harmoonikust. [9]



Joonis 2.7 ZnO elemendi takistusliku voolu muutmine pikaajalisel vahelduvvoolu katsel [5]

Joonisel 2.7 on näha kuidas ZnO elemendi takistuslik vool muutub pikaajalistes katsetes erinevatel tingimustel. Katsetest on näha, et vool suureneb, kui ZnO element on pideva koormuse all. Suurema pinge ja temperatuuri puhul toimub elemendi omaduste halvenemine kiiremini. Piiriku omaduste halvenemine pole püsiv ning piirikut on võimalik ligikaudu algsesse olekusse taastada. Taastumine toimub iseseisvalt, kui piirik ei ole pinge all piisavalt pikka aega. Protsessi on võimalik kiirendada piiriku kõrgemal temperatuuril hoidmisega. [5]

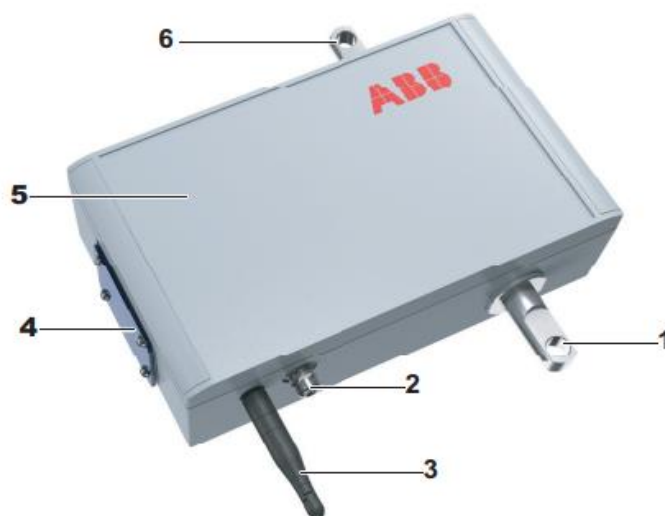
Spetsiaalses vananemiskambris katsetades on leitud halvenenud omadustega piirikute lekkevoolu karakteristikuid. Katsetes kasutati uusi ja võrkudes koormuse all halvenenud omadustega piirikuid. Katsete põhjal leiti, et töökorras piiriku kogu lekkevool peaks olema ligikaudu 100 μA kuni 300 μA ning takistuslik lekkevool peaks olema 10 μA kuni 50 μA . Lisaks ei tohiks temperatuuril 90 °C piiriku takistuslik lekkevool olla suurem kui 100 μA . Katsete põhjal leiti veel, et halvenenud omadustega piirikute lekkevool on tundlikum temperatuuri muutustele. [10]

3. ÜLEVAADE ABB LIIGPINGEPIIRIKUTE MONITOORIMISSEADMEST

Monitoorimisseade on mõeldud keskpinge- ja kõrgpingevõrkudes andmete kogumiseks. Seade ühendatakse LPP ja maa vahele. Seadme põhiline funktsioon on mõõta välistemperatuuri, õhuniiskust, vooluimpulsse ja lekkevoolu ning andmeid pilve saata. Pilveteenus on andmete ja rakenduste hoidmine internetis teenusepakkuja serverites.

3.1 Monitoorimisseadme tööpõhimõte

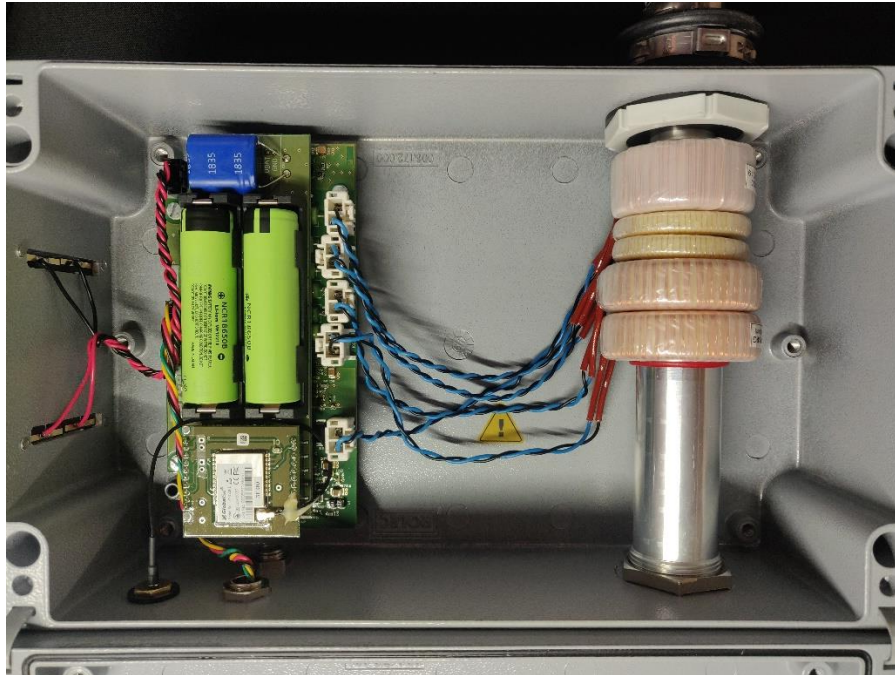
Monitoorimisseade ühendatakse LPP ja maa vahele. Joonisel 3.1 on kujutatud seadet. Seadme ülemine kontakt ühendatakse LPP maanduskontakti külge. Alumine kontakt ühendatakse maandusesse. Läbi seadme voolab pidevalt lekkevool, mida mõõdavad juhtiva osa küljes olevad Rogowski vööd. Seadme küljel on päikesepaneel, mis laeb kahte 3,6 V Li-ion akut. Alumise külje peal on temperatuuri ja õhuniiskuse andur ning antenn sidepidamiseks.



Joonis 3.1 ABB liigpingete monitoorimisseade. 1 – alumine kontakt, 2 – temperatuuri ja õhuniiskuse andur, 3 – antenn, 4 – päikesepaneel, 5 – monitoorimisseade, 6 – ülemine kontakt. [11]

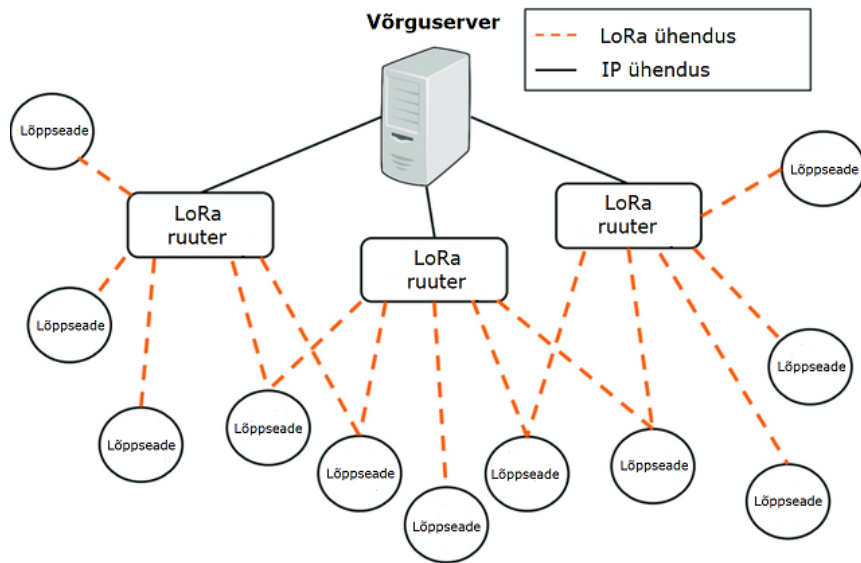
Monitoorimisseade mõõdab lekkevoolu, temperatuuri ja õhuniiskust iga tund. Iga 24 tunnise tsükli lõpus leitakse mõõtetulemuste keskmised väärtused ning need edastatakse pilve. Erandjuhul toimub mõõtetulemuste saatmine kohe pärast liigpinge või liini lülitamise

tuvastamist. Liigpinge tuvastamisel fikseeritakse liigpinge amplituudväärtus ja liigpinge esinemisaeg. Lülitamine tuvastatakse, kui tekib võib kaob lekkevool. Lülitamise puhul kirjeldatakse, kas toimus liini sisse- või väljalülitamine ning fikseeritakse millal lülitamine toimus. Joonisel 3.2 on näha erinevaid Rogowski vöösid, mis mõõdavad lekkevoolu ja vooluimpulsse. Rogowski vöösid kasutatakse aeglase frondiga, kiire frondiga ja väga kiire frondiga vooluimpulsside ja lekkevoolu mõõtmiseks.



Joonis 3.2 Pilt monitoorimisseadme sisemusest

Info edastatakse pilve üle LoRaWAN võrgu. LoRaWAN on tähttopoloogiaga võrk, kus ruuterid edastavad sõnumeid lõppseadmete ja keskse võrguserveri vahel. Andmevahetus toimub kiirusega 0,3 kbps kuni 50 kbps. Lõppseade edastab juhtmevabalt infot ruuterisse. Sõltuvalt keskkonnast saab juhtmevabalt infot edastada 5 km kuni 15 km. Infovahetus ruuterist kesksesse võrgu serverisse toimub läbi teist tüüpi võrguühenduse, kui juhtmevaba ühenduse puhul, näiteks saab infovahetust teha läbi Etherneti. LoRaWAN võrku saab ühendada ligikaudu 1000 seadet. [12]



Joonis 3.3 LoRaWAN võrgu topoloogia [13]

Monitoorimisseadmes toimub põhiliselt info saatmine seadme poolt pilve. Erandjuhul on vaja infot saata seadmesse selle käivitamisel selleks, et seadme kella sünkroniseerida. Lisaks on vaja kella sünkroniseerida siis, kui on tuvastatud seadme kella ajaline nihe. Seadme tehnilistes andmetes on antud võrgu ulatuseks 5 km. Võrgu ulatuse juures on täpsustatud, et kui ruuteri ja lõppseadme vahel puuduvad takistused, siis võib võrgu ulatus olla suurem.

3.2 Monitoorimisseadme töökorda seadmine

Monitoorimisseadme töökorda seadmiseks on vaja esmalt seda lisada LoRaWAN keskkonda. Selleks on vaja täita vajalikud väljad Device EUI, Application EUI ja Application Key. Peale seadme lisamist on vaja seade sisse lülitada, et see võrguga ühendaks. Seade lülitub sisse peale akude lisamist. Tallinna Tehnikaülikoolil on olemas LoRaWAN võrk, mida saab kasutada Levira keskkonnas. Seadme võrku lisamiseks lisati vajalikud seadme andmed Levira keskkonda. Peale seda hakkas seade andmeid pilve edastama ning Levira keskkonda kasutati seadme poolt saadetud sõnumite vaatamiseks ja seadmele sõnumite saatmiseks. LoRaWAN antenn asub Akadeemia tee 15A maja katusel.

Aeg on seadmes Unix (epoch) formaadis. Monitoorimisseade on ehitatud ilma täpse kellata, kuna see muudaks seadme maksumust liiga suurel määral. Seetõttu on vaja seadme käivitamisel kella sünkroniseerida. Teatud aja tagant võib tekkida seadmes oleva kella ja tegeliku aja vahel nihe. Sellise olukorra tuvastamisel on vaja samuti kella sünkroniseerida.

Seadmele on vaja saata sõnum, et teavitada sünkroniseerimise vajadusest. Sõnumi sisuks on „240E“ kuueteistkümnendsüsteemis. Peale sõnumi kättesaamist alustab seade sünkroniseerimisega ning edastab vastu sõnumi „200E“. Seejärel on vaja seadmele saata õige aeg formaadis „070Eajatempel“.

3.3 Monitoorimisseadme infovahetus

Infot saadetakse pilve iga päev. Pilve ja seadme vahel saadetakse sõnumite ülesehitus on kindla struktuuriga ning sisu on Base64 formaadis. Tabelites 3.1 ja 3.2 on näha kahte võimalikku sõnumi struktuuri. Esimest kasutatakse juhtudel, kus ajatempel on vajalik. Ajatempel on tähtis, kui edastatakse mõõtetulemusi, toimub liini lülitamine või tuvastatakse liigpingeimpulss. Teist tüüpi sõnumites, kus antakse infot näiteks seadmete ühendustest, pole ajatemplit vaja.

Tabel 3.1 Monitoorimisseadme sõnumi struktuur mõõtmiste edastamiseks

1 bait	4 baiti	0 kuni 6 baiti	(1 bait)
Käsk	Ajatempel	Valikuline parameeter	Eraldaja

Tabel 3.2 Monitoorimisseadme sõnumi struktuur ühenduste jaoks

1 bait	0 kuni 6 baiti	(1 bait)
Käsk	Ajatempel	Eraldaja

Käsk kirjeldab ülejäänud sõnumi ülesehitust ja sõnumi sisu. Käsu suurus on 1 bait ehk 8 bitti. Bit 7 annab infot kas ülejäänud sõnumis on olemas ajatempel. Bitt 6 kirjeldab kas sõnum saadetakse pilvest seadmesse või seadme poolt pilve. Käsus bitte 5 ja 4 ei kasutata. Bitid 3 ja 2 kirjeldavad sõnumi eesmärki. Sõnumi eesmärk võib olla pilvest infopäringut teha, seadme seadistamine või pilve infot saata. Bitid 1 ja 0 kirjeldavad parameetrite väärtuste suurusi.

Tabel 3.3 Käsu struktuur ja sisu [14]

Bitt 7	Bitt 6	Bitt 5	Bitt 4	Bitt 3	Bitt 2	Bitt 1	Bitt 0
Ajatempel: 1: on olemas 0: puudub	Käsk Bit 5 määrab: 0: Seadme seadistus 1: Andmeallika väärtus			Tegevus: 00: Info pilvest 01: Seadistamine 10: Sõnum pilve		Väärtuse pikkus 00: puudub 01: 1 bait 10: 2 baiti 11: 4 baiti	

Sõnumite parameetrite sisuks on ID ja mõõtetulemuse väärtus. Tabelis 3.4 on näha parameetrite ID-d ja kirjeldused ning vastavate väärtuste pikkused. Lekkevoolu väärtus on IEEE 754 formaadis, mis on murdarvu aritmeetika standard.

Tabel 3.4 Sõnumite võimalike parameetrite ID-d, kirjeldused ja väärtuste pikkused [14]

ID	Kirjeldus	Pikkus, bait
0x20	Liigpinge, väärtuse ühik on kA. Väärtus on komakohaga IEEE 754 formaadis	4
0x25	Lekkevool, väärtuse ühik on 100 µA. Väärtus on uint16 formaadis	2
0x28	Temperatuur, väärtuse ühik on °C. Väärtus on uint8 formaadis	1
0x2C	Suhteline õhuniiskus, väärtuse ühik on %. Väärtus on uint8 formaadis	1
0x35	Sündmus tulemus, lekkevool, väärtuse ühik on 100 µA. Väärtus on uint16 formaadis	2
0x38	Sündmus tulemus, temperatuur, väärtuse ühik on °C. Väärtus on uint8 formaadis	1
0x3C	Sündmus tulemus, õhuniiskus, väärtuse ühik on %. Väärtus on uint8 formaadis	1
0x3F	Sündmuse tulemus, liini lülitamine, sisse/välja. Väärtus on uint8 formaadis (0 või 1)	1

Tabel 3.5 ABB monitoorimisseadme tehnilised andmed [15]

Parameeter	Väärtus	Kommentaar
Impulssvoolu mõõtmine	500 A – 10 kA ($\pm 20\%$ & ± 200 A) 10 kA – 100 kA ($\pm 20\%$ & ± 2 kA)	
Impulssvoolu tipu resolutsioon	>100 ms	Amplituudide vahel
Lekkevoolu mõõtmine	0,1 mA – 12 mA ($\pm 0,1$ mA)	Kogu lekkevool (efektiivväärtus)
Sagedus	48 Hz – 62 Hz	Lekkevoolu mõõtmine
Sündmuse ajatempli täpsus	1 s	
Lühisvoolu taluvus	65 kA _{rms} 0.2 sekundit	
Temperatuuri mõõtmine	-40 °C kuni +85 °C (± 1.5 °C)	
Aku olek	Aku tühjenemise indikaator ja aku kriitilise laetuse näit	
Sündmuste salvestusmaht	3 kuud	
Toide	Laetav aku ja päikeseelement (PV)	
Aku	Li-ion / Tüüp 18650 / 3.6 V	Kokku 2 akut
Seadme tööaeg	6 kuud	Ilma PV laadimiseta
Aku laadimistsüklid	500	100% laadimistsüklite puhul
Mõõtmistsüklid	1 tund 1 minut (peale vooluimpulssi)	
Vooluimpulsi mõõtmine	Sündmuse tuvastamisel	
Infovahetus	LoRaWAN (Euroopas ja USA-s)	Kindlatel mudelitel
Võrgu ulatus	5 km	Laiem ulatus takistuste puudumisel
Infovahetus tsüklid	24 tundi 1 min (peale vooluimpulssi)	
Hooldusperiood	5 aastat	Akud
IP klass	IP67	
Mass	2,6 kg	
Korpuse materjal	GD-Al Si 12 (DIN 1725)	
Paigaldamine	Piiriku maandusjuhtmel ja maandusjuhtmel	

3.4 Ülevaade liigpingepiirikute monitoorimisseadmetest

LPP-te monitoorimiseks on olemas erineva võimekusega seadmeid erinevatelt tootjatelt. Põhilised seadmete tootjad on Siemens ja ABB. ABB kõige lihtsam monitoorimisseade on EXCOUNT-A. Antud seadmega saab mõõta ainult piirikut läbivate liigpingeimpulsside arvu. Sellest võimekam on EXCOUNT-I, millega saab mõõta impulsside arvu ja kogu lekkevoolu. EXCOUNT-II seadmega saab lisaks kogu lekkevoolule mõõta ka takistus lekkevoolu. Antud seade mõõdab ka impulsside arvu ja amplituudväärtusi. EXCOUNT-II seadmest on võimalik andmeid lugeda juhtmevaba puldiga. EXCOUNT-A ja EXCOUNT-I puhul saab andmeid lugeda seadme pealt. Kõikide nende seadmete puhul on vaja olla seadme läheduses, et saada kätte andmeid. [9]

Tabel 3.6 ABB monitoorimisseadmete võimekused [9]

	EXCOUNT-A	EXCOUNT-I	EXCOUNT-II
Impulsside arv	Jah	Jah	Jah
Impulssi amplituudväärtus	Ei	Ei	Jah
Kogu lekkevool	Ei	Jah	Jah
Takistuslik lekkevool	Ei	Ei	Jah
Ekraan	6-kohaline, elektromehaaniline loendur	6 numbrit, Ch-LCD ekraan	Kauglugemine
Toide	Puudub	Päikesepaneel	Päikesepaneel ja aku

Siemensi tootevalikus on monitoorimisseadmed ACM-basic 3EX5 080-0, ACM-advanced 3EX5 080-1 ja Sensarrester. 3EX5 080-0 seade mõõdab kogu lekkevoolu ja vooluimpulsside amplituudväärtusi. Seade võimaldab lekkevoolu kolmanda harmooniku analüüsi koos võrgus tekkivate harmoonikute kompenseerimisega. Seade näitab piiriku seisukorda kolme valgusdiodiga. Andmeid saab lugeda arvutiga. ACM-basic 3EX5 080-0 on võimalik uuendada ACM-advanced 3EX5 080-1 seadmeks. Uuendatud seadme versioonile lisandub funktsionaalsust ja juhtmevaba USB moodul, millega saab andmeid lugeda. [16]

Sensarrester seadmega on võimalik mõõta lekkevoolu, vooluimpulsse, vooluimpulsside amplituudväärtusi, temperatuuri ja õhuniiskust. Seadmega on võimalik jälgida korraka kolme piirikut. Andmeid edastatakse pilve kasutades GSM antenni. Seadme jaoks on

olemas nutitelefoni rakendus, kus saab reaalajas jälgida seadmega mõõdetud väärtusi. Rakenduses on võimalik näha kaarti kõikide ühendatud seadmetega, seadme kogu tööaega, andmete aegrea analüüsi, andmeid valitud ajavahemikus ja sündmuste logi. Lisaks on võimalik seadistada hoiatus, mis saadetakse e-kirjana või kiirteatega juhul, kui LPP on kriitilistes tingimustes. Seadme püsivara värskendatakse automaatselt pilve kaudu. [16]



Joonis 3.4 Siemens Sensorarrester [16]

4. ABB MONITOORIMISSEADME KATSETAMINE JA MÕÕTETULEMUSTE ANALÜÜS

Monitoorimisseade mõõdab piirikut pidevalt läbivat lekkevoolu ning liigpingetest tekkivaid vooluimpulsse. Lekkevool on suhteliselt väikese väärtusega ning see on tavaliselt milliamprites. Liigpingetest tulenevad vooluimpulsid on tunduvalt suurema väärtusega. Liigpingetest tekkivate vooluimpulsside ja lekkevoolu mõõtmiseks on vaja erineva täpsusega mõõtmisi ning seetõttu on vaja erinevaid mõõtmismetoodikaid. Sõnumite teisendamiseks kasutati Pythoni programmi, mis kirjutati antud lõputöö raames selleks, et sõnumitest oleks lihtsam ja kiirem infot kätte saada.

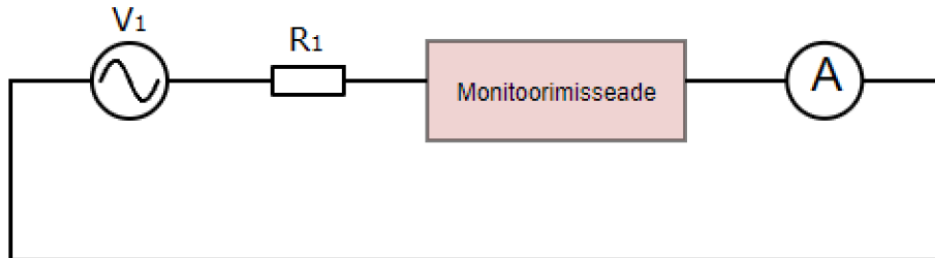
4.1 Lekkevoolu mõõtmine

Monitoorimisseade mõõdab piirikut läbivat lekkevoolu iga tund ning päeva lõpus leiab mõõtetulemuste keskmise väärtuse ning edastab selle pilve. Seetõttu pole võimalik seadme lekkevoolu mõõtmist teha lühiajalise katsega ning katseaeg peaks olema piisavalt pikk. Olukorras, kus katse lõpetatakse liiga vara võib tekkida null väärtusega mõõtetulemus, mille tulemusena oleks päeva lõpus leitud keskmine lekkevoolu väärtus tegelikust väiksem. Ainuke viis kuidas seadme lekkevoolu mõõtmist kontrollida, on hoida pidevalt väikest vahelduvvoolu, mis läbib seadme juhtivat osa. Kuna lekkevool on suhteliselt väikese väärtusega, siis sobib lekkevoolu mõõtmiseks milliampermeeter.

Algselt oli plaanis katsetada seadme lekkevoolu mõõtmist kasutades LPP-d. Sellisel viisil katse sooritamiseks oleks olnud vaja ühendada jadamisi liigpingepiirik, monitoorimisseade ja mikroampermeeter. Sedasi oleks olnud võimalik fikseerida lekkevool ning seda hiljem võrrelda seadme poolt pilve saadud tulemusel. Antud viisil mõõtes oleksid katsed toimunud selliselt, et kõik seadmed oleksid pidevalt suure pingel all. Seetõttu oleks keeruline reguleerida piirikut läbivat lekkevoolu, et katsetada erinevate väärtustega. Lisaks piiriku pideval koormamisel võib toimuda piiriku soojenemine, mille tulemusena muutub ka piirikut läbiv lekkevool ning sellisel juhul pole katse ööpäevaringse jälgimiseta võimalik hinnata, milline peaks täpselt monitoorimisseadmest saadud tulemus olema.

Eelloetletud põhjustel otsustati lekkevoolu mõõtmiseks LPP-d mitte kasutada. Selle asemel sooritati katse kasutades madalamat pinget ning takistust. Katse toiteks kasutati vahelduvvoolu pingesallikat, millel on võimalik pinget reguleerida. Katses kasutati kahte 2

$k\Omega$ takistust, mis on rööbiti ühendatud. Takistuste ekvivalentne takistus on $1\text{ k}\Omega$ ning antud takistus valiti selliselt, et vooluringis tekkiv vool oleks piisavalt väikese väärtusega.

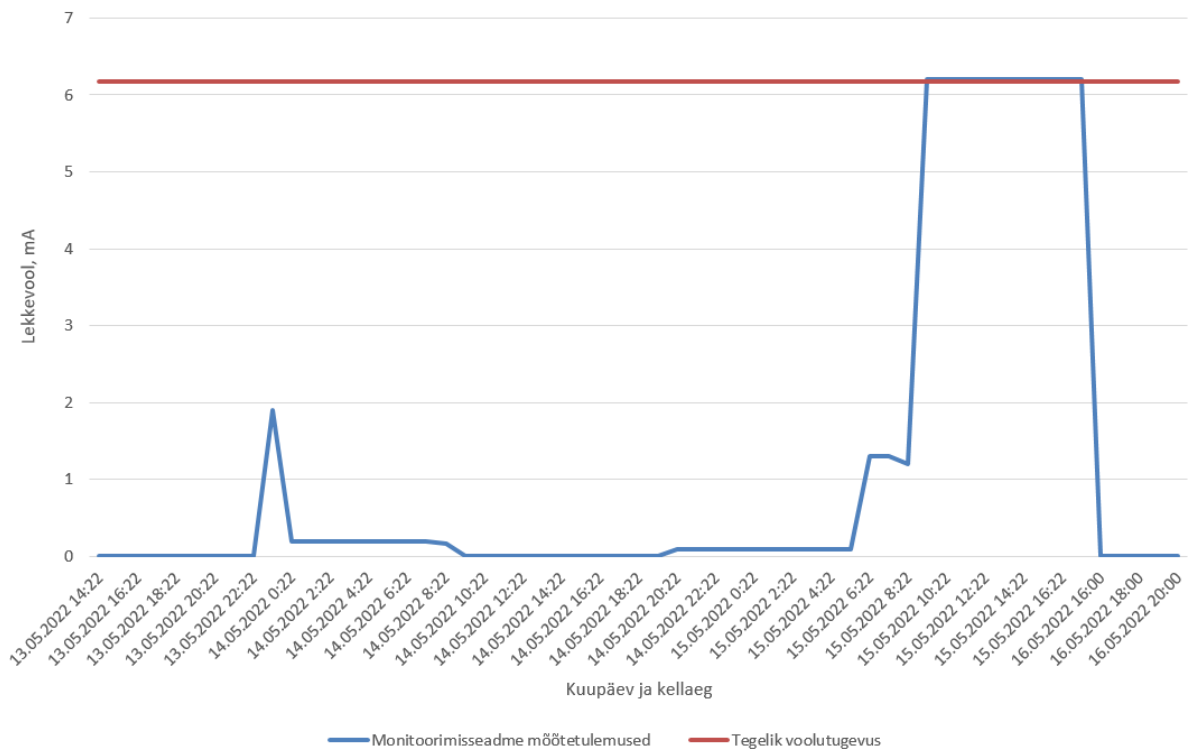


Joonis 4.1 Lekkevoolu mõõtmise katseskeem

Enne katset lülitati monitoorimisseade sisse ja see paigutati viiendal korrusel akna alla. Seade oli umbes 280 m kaugusel antennist. Sellel ajal hakkas seade juba sõnumeid pilve edastama, selle aja jooksul mõõtis seade temperatuuri, suhtelist õhuniiskust ja lekkevoolu. Mõõdetud lekkevoolu väärtus oli pidevalt 0. Seade saatis sõnumeid katkendlikult ja mõndadel päevadel ei saanud seade sõnumit üldse ning ühel juhul ei saanud seade sõnumit kolm päeva järjest.

Monitoorimisseadme tehnilistes andmetes on antud seadme lekkevoolu mõõtmispiirkonnaks $0,1\text{ mA}$ kuni 12 mA . Eesmärk oli seadet katsetada erinevate voolu väärtustega, mis on seadme mõõtepiirkonnas. Algselt tehti katset kõrgepingelaboris, kuid selgus, et LoRaWAN võrk seal ei levi. Peale seadme viimist kõrgepingelaborisse seadme sõnumid enam pilve ei jõudnud. Selle võimalikku põhjust uuriti ABB esindajate käest ja neilt saadi infot, et seade ei saada sõnumit, kui akud on tühjad või signaal on liiga nõrk. Peale akude vahetamist seadme sõnumid ikkagi pilve ei jõudnud, seepärast viidi katse viiendale korrusele akna alla, kus peaks olemas piisavalt hea levi. Peale seda hakkas seade uuesti sõnumeid pilve edastama. Seadmel hoiti pidevalt ligikaudu $6,17\text{ mA}$ vahelduvvoolu. Antud voolu väärtus on seadme mõõtepiirkonnas. Katse kestis ligikaudu neli ööpäeva. Lekkevoolu mõõtmise katse alustamisel tuvastas seade liini lülitamise. Tänu sellele hakkas seade lekkevoolu mõõtma iga minut ning edastas keskmise lekkevoolu väärtuse iga tund. Seade edastas mõõtmise igal tunnil ligikaudu 3 päeva järjest. Peale seda hakkas seade uuesti kord päevas sõnumeid edastama. Joonisel 4.2 on näha monitoorimisseadme mõõdetud lekkevoolu mõõtetulemused kogu katseaja jooksul. Lisaks lekkevoolu

mõõtetulemustele tuvastas seade mitu liini lülitamist katse jooksul. Kahel juhul oli ühe sõnumi sees liini sisselülitamine ja väljalülitamine.



Joonis 4.2 Monitoorimisseadme lekkevoolu mõõtetulemused ja tegelik voolutugevus

4.2 Vooluimpulsside mõõtmine

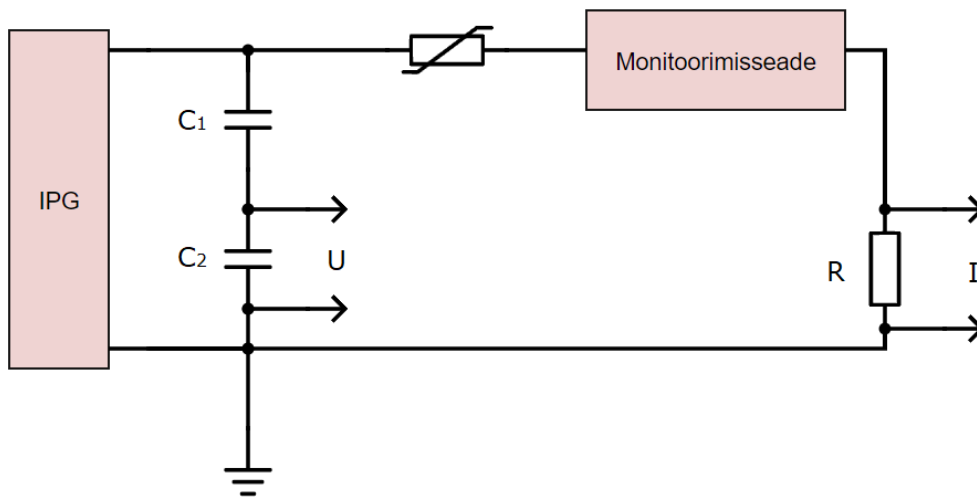
Vooluimpulsid on tunduvalt suuremate väärtustega kui lekkevool ning seetõttu pole vaja nende mõõtmiseks suurt täpsust. Seadme tehnilistes andmetes on antud impulssvoolu mõõtepiirkonnaks 500 A kuni 100 kA. Monitoorimisseade tuvastab vooluimpulsid, mis on üle 100 A amplituudväärtusega. Peale vooluimpulsi fikseerimist edastab seade kohe mõõdetud voolu väärtuse ja sündmuse toimumise aja pilve.

Seadme impulssvoolude mõõtmise katsetamiseks on vaja tekitada erinevate amplituudväärtustega vooluimpulsse. Antud katses kasutatakse impulsspingegeneraatorit vooluimpulsside tekitamiseks. Pinge mõõtmiseks kasutatakse mahtuvuslikku pingejagurit ja tiheda diskreetimissammuga (120 MS/s) analoog-digitaalmuundurit koos eriotstarbelise arvutiprogrammiga impulsside analüüsimiseks. Katses kasutatakse Raychem HDA-36 LPP-d. Tabelis 4.2 on näha kasutatud LPP tehnilisi andmeid.

Tabel 4.1 Katses kasutatud Raychem LPP tehnilised andmed

Parameeter	Väärtus
Kestev talitluspinge, kV	36
Nimipinge, kV	45
Nimilahendusvool, kA	10

Voolu mõõtmiseks kasutatakse šunti. Šunt ühendatakse vooluringi ning see on takistusega $2,0170 \Omega$. Voolust šundis tekib pinge. Pinge mõõtmisel on võimalik leida šunti läbivat voolu. Tänu sellisele süsteemile on võimalik mõõta suuri voolu väärtusi.



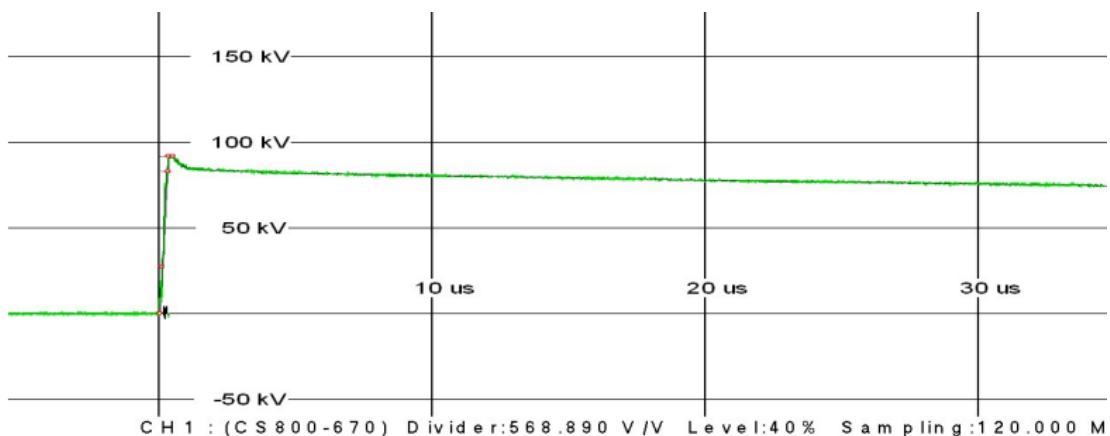
Joonis 4.3 Vooluimpulsside mõõtmise katseskeem

Katse teostamiseks laetakse impulsspingegeneraatori kondensaatorid valitud pingele. Impulsspingegeneraatoriga tekitatakse positiivse polaarsusega standardsed välguimpulsid, mis on frondikestusega $1,2 \mu\text{s}$ ja poolväärtusajaga $50 \mu\text{s}$. Tabelis 4.2 on näha katsete laadimispinged, pinge piirikul, mõõdetud voolu ja kas graafikult nähtav pinge on lõigatud. Katseid alustati 60 kV laadimispingega ning laadimispinget tõsteti iga katsega 10 kV kuni pingeni 200 kV . Vooluimpulsside katset korraldati mitu korda mitmel erineval päeval. Kuna seade ei hakanud sõnumeid pilve edastama, siis katsetati erinevaid lahendusi. Labori ühes seinas on tõstanduks, mis on suunaga Akadeemia tee 15A maja poole. Selleks, et sidetingimusi parandada avati tõstanduks katse toimumise ajaks. Pärast seda seade jätkuvalt ei edastanud sõnumeid. Järgmisena katsetati antennijuhtmega. Kuna seadet laborist välja viia katse ajaks on suhteliselt keeruline, siis tekkis mõte seadme antenn laborist välja viia antennijuhtmega. Kasutati 10 m pikkust antennijuhet, millega viidi seadme antenn õue katse ajaks. Antenn tõsteti õues maapinnast ligikaudu 3 m kõrgemale.

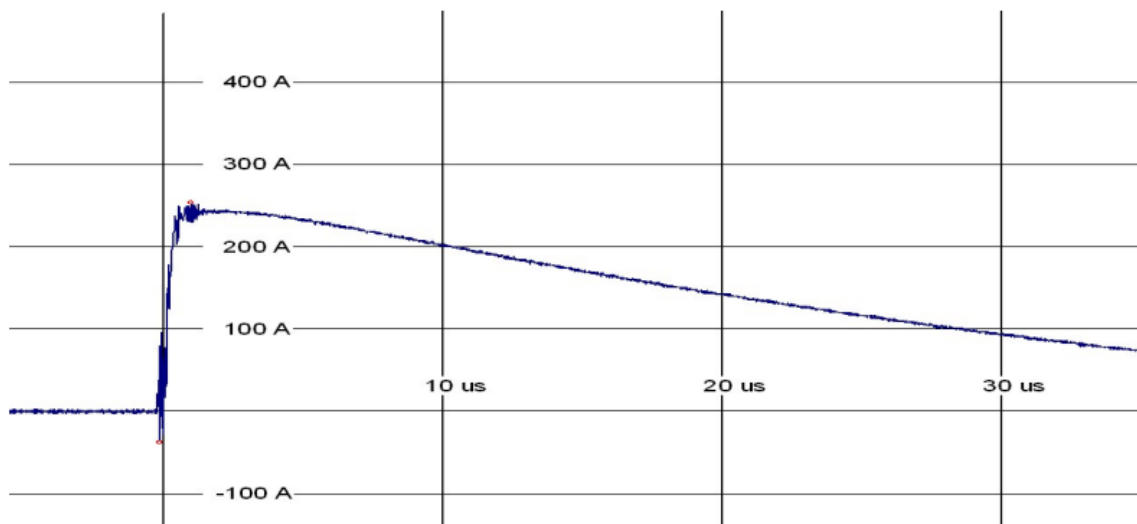
Sellisel viisil katsetades hakkas seade sõnumeid edastama. Sõnumid jõudsid Levira keskkonda suhteliselt kohe peale vooluimpulsi katset. Seade poolt edastatud sõnumid olid valet tüüpi ning sõnumite sees polnud andmeid. Lisaks pole võimalik sõnumeid otse seadmest kätte saada. Seade salvestab mõõtetulemusi, kuid nendele andmetele saab ligi ainult spetsiaalse tarkvaraga. Salvestatud andmed on mõeldud diagnostikaks.

Tabel 4.2 Vooluimpulsside mõõtmiste katsetulemused

Laadimispinge, kV	Amplituudpinge väärtus piirikul, kV	Amplituudvool, A	Pinge lõikamine
60	59,4	Ei tuvastanud	Ei
70	67,9	Ei tuvastanud	Ei
80	75,0	Ei tuvastanud	Ei
90	78,8	Ei tuvastanud	Jah
100	81,1	61,5	Jah
110	83,4	86,2	Jah
120	85,1	109,0	Jah
130	86,1	134,2	Jah
140	87,3	156,5	Jah
150	88,8	161,2	Jah
160	89,5	205,9	Jah
170	90,7	230,6	Jah
180	91,4	252,2	Jah
190	92,4	276,8	Jah
200	93,1	307,0	Jah



Joonis 4.4 Mõõdetud pinge piirikul laadimispingel 180 kV



Joonis 4.5 Mõõdetud vool laadimisingel 180 kV

4.3 Tulemuste analüüs

Monitoorimisseadme vooluimpulside mõõtmise katsetamiseks kasutati LPP-t ja vooluimpulsse tekitati impulsspingegeneraatoriga. Jooniselt 4.3 on näha kuidas laadimisingel 180 kV löikab LPP pinget. Seetõttu pinge, mis kattes mõõdeti oli tunduvalt väiksem kui laadimisinge. Laadimisingel 180 kV oli pinge piirikul 91,4 kV. Samal katsel mõõdeti voolu amplituudväärtuseks 252,2 A. Tabelist 4.2 on näha kuidas laadimisinget tõstetakse pidevalt 10 kV võrra. Samuti on näha, et pinge, mis tekib piirikul muutub järjest väiksemal määral. Monitoorimisseade peaks tuvastama vooluimpulsi alates amplituudväärtusest 100 A. Katset korraldi mitmel päeval ning katses tekitati erinevate amplituudväärtustega vooluimpulsse, mis olid piisavalt suure väärtusega, et seade seda tuvastaks. Lisaks prooviti erinevaid lahendusi, et parandada sidetingimusi. Lõpuks polnud võimalik ühtegi monitoorimisseadme vooluimpulsi mõõtetulemust kätte saada. Tõenäoliselt on see tingitud sellest, et signaali levi on halb. Seda kinnitab veel asjaolu, et lekkevoolu katse läbiviimisel laboris ei jõudnud sõnumid samamoodi pilve. Seade hakkas sõnumeid uuesti edastama siis, kui see ümber paigutati kohta, kus oli vähem takistusi signaali levimiseks. Kuna ei olnud võimalik saada mõõtetulemusi, mis oli tõenäoliselt tingitud halvast side tingimusest, siis pole võimalik hinnata monitoorimisseadme vooluimpulsside mõõtmise võimekust.

Seadme lekkevoolu mõõtmise katsetamiseks hoiti seadmel ligikaudu 4 päeva pidevalt 6,17 mA vahelduvvoolu. Esimesel kahel päeval mõõtis seade lekkevoolu väärtuseks 0. Lisaks

mõõdeti muid väiksemaid väärtusi. Kolmandal päeval hakkas seade mõõtma väärtust 6,2 mA. Selleks, et seade hakkaks mõõtma õiget väärtust kulus katse algusest kaks päeva. Seadme mõõdetud õige väärtus on suhteliselt täpne. Milliampermeeteri mõõdetud väärtus on 6,17 mA ning kahe mõõtetulemuse erinevus on suhteliselt väike. Joonise lõpus on näha kuidas mõõtetulemused on uuesti 0 väärtusega. See tuleneb tõenäoliselt katse lõpetamisest. Katse jooksul seadme edastatud sõnumites tuvastati mitu liinilülitamist. See on vastuolus asjaoluga, et katse jooksul ei toimunud ühtegi lülitamist.

4.4 Monitoorimisseadmele hinnangu andmine

Monitoorimisseadmega on võimalik korra päevas saada piiriku keskmistatud lekkevool. Antud info on kasulik, kuna selle põhjal on võimalik teatud määral piiriku seisundit hinnata. Piiriku omaduste halvenemise hindamiseks oleks vaja mõõta takistus lekkevoolu. Antud seade mõõdab ainult kogu lekkevoolu ning seetõttu pole võimalik täpselt piiriku omaduste halvenemist hinnata. Piiriku omaduste halvenemise hindamine on veel ebatäpsem, kuna pikaajaline lekkevoolu kasv võib olla hoopis tingitud piiriku välispinna reostumisest, mille tulemusena kasvab mahtuvuslik vool.

Seadme lekkevoolu mõõtmine on kasulik, et hinnata LPP välispinna reostust. Pikaajalisema koormuse all töötamise puhul mõjutab lekkevoolu ka metalloksiidlementide seisund. Lisaks on lekkevoolu jälgimisega võimalik märgata, kui piiriku talitluses midagi järsult muutub. Näiteks lekkevoolu järsk kasv võib tähendada, et piirikus on toimunud rike. Lisaks on seadme poolt kogutud andmetega võimalik ennetada LPP piiramatu soojenemise tekkimist. LPP piiramatu soojenemise protsessi tekkimiseks on vaja piisavalt suurt lekkevoolu ja piisavalt suurt keskkonna temperatuuri. Antud seadmega on võimalik lekkevoolu ning keskkonna temperatuuri mõõta ning nende andmete põhjal on võimalik ennetada LPP kriitilise oleku tekkimist.

Seade kasutab andmete edastamiseks LoRaWAN võrku. Selleks, et seade saaks andmeid edastada on vaja ruuterit. Seadme tehnilistes andmetes on antud võrgu ulatuseks 5 km. Võrgu ulatus on suurem kui monitoorimisseadme ja võrgu vahel ei ole takistusi. Üldjuhul pole võimalik tõenäoliselt tekitada olukorda, kus monitoorimisseadme ja ruuteri vahel pole ühtegi takistust. Seetõttu on tõenäoliselt võrgu ulatus ainult 5 km. Juhul, kui seade paigaldada kohta, kus puudub LoRaWAN ruuter, siis on vaja lisaks seadmele paigaldada ka veel ruuter. Ruuteri töötamiseks on omakorda vaja interneti ühendust ja sobiva pingega toidet. Juhul, kui antud asukohas interneti ja toite ühenduste jaoks puuduvad võimalused,

siis nende väljaehitamine poleks majanduslikult mõistlik. Isegi, kui ehitada välja LoRaWAN ruuter, mis on 5 km kaugusel seadmest, siis ei ole garantiid, et monitoorimisseadme ja ruuteri vaheline side hakkab töötama. Juhul kui antud piirkonnas on liiga palju takistavaid asjaolusi signaali levimiseks, siis ei pruugi signaal kohale jõuda. Lisaks pole võimalik hinnata, et milline oleks sobiv vahemaa sellisel juhul ning antud olukorra puhul peaks seadmete side katsetama erinevatel kaugustel, mis on aja ja ressursi kulukas. Signaali ulatuse suurendamiseks oleks võimalik kasutada repiiterit, kuid selle töötamiseks oleks vaja omakorda eraldi toide ehitada. Juhul kui seade paigaldatakse asutatud kohta, kus on olemas juba sobiv toide ja interneti ühendus LoRaWAN ruuteri ehitamiseks, siis puudub otsene vajaduse LoRaWAN võrgu kasutamiseks ning oleks võimalik seade ühendada otse internetiga.

Seadme paigaldamine ja töökorda seadmine on suhteliselt lihtne ning selleks kulub vähe aega. Antud lõputöö raames ei käsitletud LoRaWAN võrgu ja ruuteri ülesseadmist. Seetõttu ei ole võimalik hinnata, kui ajakulukas ning keeruline see võib olla. Peale seadme töökorda seadmist hakkab see kohe mõõtma ning infot edastama. Seadme poolt edastatud sõnumid on Base64 formaadis, mis on vaja ümber muuta kuueteistkümnendsüsteem. Seejärel on vaja sõnumid tükeldada ning sõnumi alaosadest leida käsk, ajatempel, sõnumi ID ja väärtus. Ajatempel on vaja omakorda Unix formaadist ümber teisendada. See protsess on suhteliselt ajakulukas ning selle käigus võib tekkida vigu. Seadme töötamises esineb igasuguseid anomaaliaid, mis tulid välja lekkevoolu mõõtmise katsetamisel. Seetõttu pole võimalik hinnata, kas liinis toimub lülitamisi või mitte. Lisaks kui mingil põhjusel seade mingi sündmuse kohta infot ei edasta, siis pole kuidagi hiljem võimalik järgi vaadata, et mis võrgus on toimunud.

Peatükis 3.5 kirjeldatud monitoorimisseadmest on antud lõputöös katsetatud seade kõige sarnasem Siemensi poolt pakutava monitoorimisseadmega Sensarrester. Mõlemad seadmed mõõdavad samu väärtusi ning mõlemad on *IoT* lahendused. Põhiliseks erinevuseks on võrk, mida kasutatakse andmete edastamiseks. Sensarrester edastab infot läbi GSM võrgu. Tänu sellele pole vaja antud seadme jaoks eraldi ruuterit. GSM võrku kasutatakse mobiilsideks ning seetõttu on antud võrku suhteliselt palju investeeritud. Tänu sellele on GSM võrgu ulatus suur. Seetõttu on antud võrguga ühendamiseks tõenäoliselt võimalik leida piisavalt tugevat signaali enamus kohtades. Sellisel juhul pole vaja lisainvesteeringut seadme töökorda saamiseks. Sensarrester võimaldab mõõta kolme LPP-t korraga. Seetõttu pole vaja kolme faasi LPP-te jälgimiseks kolme eraldi seadet nagu oleks vaja ABB monitoorimisseadme puhul. Sensarrester seadmega on võimalik reaalajas jälgida mõõdetavaid parameetreid ning seda on võimalik teha läbi nutitelefoni või veebibrauseri.

Antud keskkonnas on igasuguseid lisafunktsioone. Näiteks on võimalik seadistada hoiatused, mis saadetakse olukorras, kus piirik on lähedal kriitilise olukorra tekkimisele. Seda kasutades on võimalik ennetada piiriku rikut. Keskkond, mida saab kasutada seadmete jälgimiseks, võimaldab palju erinevaid lisafunktsioone, et jälgida piirikut ja analüüsida mõõdetud andmeid.

KOKKUVÕTE

LPP-te monitoorimisseade mõõdab välistemperatuuri, õhuniiskust, vooluimpulsse ja lekkevoolu ning edastab mõõtetulemusi pilve. Antud lõputöös katsetati ABB liigpingepiirikute monitoorimisseadet, et hinnata selle võimekusi, kasutajamugavust ja rakenduspotentsiaali.

Seadme katsetamiseks tehti impulssvoolu ja lekkevoolu mõõtmiste katsed. Impulssvoolu katse mõõtetulemusi polnud võimalik kätte saada, kuna tõenäoliselt LoRaWAN võrgu signaal ei levinud piisavalt hästi. Lekkevoolu katseks oli võimalik seadme side tööle saada. Lekkevoolu katse jooksul esines seadme poolt saadetud sõnumites anomaaliaid, kus tuvastati liinide lülitamisi, mida polnud. Seade mõõtis lekkevoolu suhtelist täpselt. Juhul kui seade ei edasta sõnumit pilve, siis pole võimalik hiljem mõõtmisi kätte saada. Seetõttu võib osa mõõtmisi kaduma minna, mida halva LoRaWAN levi tõttu ei edastata.

Seadme kasutamisel selgus, et seadme töökorda seadmine on suhteliselt lihtne. Selleks on vaja ainult seade piiriku ja maa vahele ühendada, seadmesse akud lisada ja seadme andmed LoRaWAN keskkonda lisada. Ebamugav ja ajakulukas oli seadme poolt saadetud sõnumite Base64 formaadist loetavaks teisendamine. Sellise protsessi käigus võib tekkida vigu, mille tõttu on teisendatud sõnumi sisu ebakorrektned. Lisaks on sõnumite struktuuri ja sisuga kurssi viimine väga ajakulukas.

Selgus, et lisaks antud töös uuritud seadmele on olemas analoogne monitoorimisseade, mis on Siemensi poolt toodetud. Põhiliseks erinevuseks on see, et Siemensi seadme puhul toimub andmete edastamine läbi GSM võrgu. Töös katsetatud seade kasutab LoRaWAN võrku. Suuremate sidevõrgu piirangute ja väiksema funktsionaalsuse tõttu pole töös käsitletud seade nii perspektiivne, kui Siemensi Sensarrester. Lisaks on Sensarresteri jaoks olemas nutitelefoni rakendus, millega lisandub lisafunktsionaalsust ja võimekusi.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] H. M. Ryan, *High Voltage Engineering and Testing*, London, United Kingdom: Peter Peregrinus Ltd, 1993.
- [2] K. Kannus, *Aspects of the Electrical Performance of High Voltage Insulators and Metal Oxide Surge Arresters under Various Environmental Stresses*, Tampere: Tampere University of Technology, 1998.
- [3] IEC, „Eesti Standardimis- Ja Akrediteerimiskeskus,“ 6 10 2014. [Võrgumaterjal].
- [4] A. Haddad ja D. Warne, *Advances in High Voltage Engineering*, London: The Institution of Electrical Engineers, 2004.
- [5] S. Tominaga, Y. Shibuya, Y. Fujiwara, M. Imataki ja T. Nitta, „Stability and Long Term Degradation of Metal Oxide Surge Arresters,“ *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Kd-d. 1/2PAS-99, nr 4, pp. 1548-1556, 1980.
- [6] S. Likitha, M. Kanyakumari, P. J. Pauly, R. S. S. Aradhya ja N. Vasudev, „Estimation of Critical Resistive Leakage Current of Polymer Housed ZnO Surge Arrester by Electro-Thermal Modelling,“ *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, kd. 5, nr 3, pp. 861-873, 2018.
- [7] J. Taylor, „ABB Library,“ [Võrgumaterjal]. Materjal on saadaval: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK101130D7154&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>. [Kasutatud 11 5 2022].
- [8] I. o. E. a. E. Engineers, „IEEEXplore,“ 24 11 2020. [Võrgumaterjal]. Materjal on saadaval: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9208019>. [Kasutatud 13 4 2022].
- [9] ABB, „High Voltage Surge Arresters Buyer´s Guide,“ 17 10 2019. [Võrgumaterjal]. Materjal on saadaval: <https://library.e.abb.com/public/ba61a5f190bf46fe8676554e0a2e9e4a/Buyer's%20Guide%20Surge%20Arresters%202019-10-17.pdf>. [Kasutatud 2 4 2022].
- [10] J.-y. Kim, C.-y. Kim, I.-k. Song ja J.-d. Moon, „Accelerated aging test to determine the replacement criterion of distribution surge arresters,“ %1 *2001 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, Atlanta, 2001.
- [11] ABB, „ABB Ability™ Wireless Monitor for surge arrester Installation and Operation Instructions“ [Vaadatud 14.04.2022].
- [12] F. Adelantado, X. Vilajosana, P. Tuset-Peiro ja B. Martinez, „Understanding the Limits of LoRaWAN,“ 1 *2001 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, Atlanta, 2001.
- [13] „ResearchGate,“ [Võrgumaterjal]. Materjal on saadaval: https://www.researchgate.net/figure/The-LoRaWAN-network-topology_fig1_340100897. [Kasutatud 16 5 2022].

- [14] ABB, „ProGRID Data Communication Protocol Specification“ [Vaadatud 17.04.2022].
- [15] ABB, „ABB Ability™ Wireless Monitor for surge arrester DATA SHEET“ [Vaadatud 17.04.2022] Materjal on saadaval:
<https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1HC0143336&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>.
- [16] „Siemens Energy“, Siemens, [Võrgumaterjal]. Materjal on saadaval:
<https://www.siemens-energy.com/global/en/offerings/power-transmission/portfolio/surge-arresters/surge-arrester-monitoring.html>. [Kasutatud 12 5 2022].