

## **JÕUTRAFO ASTMELÜLITI KONTAKTIDE SEISUKORRA HINDAMINE DÜNAAMILISE TAKISTUSE MÕÕTMISE TEEL**

### **POWER TRANSFORMER ON LOAD TAP CHANGER CONTACTS CONDITION ASSIGNMENT USING DYNAMIC RESISTANCE MEASUREMENT**

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Hardi Naarismaa

Üliõpilaskood 211263AAAB

Juhendaja: Toomas Vaimann, vanemteadur  
Karolina Kudelina, doktorant-  
nooremteadur

Tallinn 2021

(Tiitellehe pöördel)

## **AUTORIDEKLARATSIOON**

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

“18” mai 2021

Autor: .....

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö esitatud nõuetele

“.....” ..... 202.....

Juhendaja: .....

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....” .....202... .

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ nimi ja allkiri /

## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks<sup>1</sup>**

Mina Hardi Naarismaa (*autori nimi*)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose *Jõutrafo astmelüliti kontaktide seisukorra hindamine dünaamilise takistuse mõõtmise teel*,

(*lõputöö pealkiri*)

mille juhendajad on Toomas Vaimann ja Karolina Kudelina,

(*juhendaja nimi*)

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.

18.05.2021 (*kuupäev*)

---

<sup>1</sup> 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 loomingu 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:* Hardi Naarismaa

*Lõputöö liik:* Bakalaureusetöö

*Töö pealkiri:* Jõutrafo astmelüliti kontaktide seisukorra hindamine dünaamilise takistuse mõõtmise teel

*Kuupäev:*  
18.05.2021

64 lk (lõputöö lehekülgede arv koos lisadega)

*Ülikool:* Tallinna Tehnikaülikool

*Teaduskond:* Inseneriteaduskond

*Instituut:* Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

*Töö juhendaja(d):* vanemteadur Toomas Vaimann, doktorant-nooremteadur Karolina Kudelina

*Töö konsultant (konsultandid):* Üllar Pärnat, Sergei Solodilov

*Sisu kirjeldus:*

Töö eesmärk on tutvustada mõõtemetoodikat jõutrafo astmelüliti kontaktide seisukorra hindamiseks ja teoreetilise osa põhjal analüüsida praktilist mõõtmist.

Selle paremaks mõistmiseks tutvustatakse esmalt esimeses osas jõutrafo, selle töötamis põhimõtet ja põhilisi komponente.

Teises osas käsitletakse detailsemalt astmelüliti ja sellega seotud kontrollmõõtmisi.

Töö viimases kolmandikus tutvustatakse dünaamilise takistuse mõõtmise teoreetilist osa ja mõõteseadet. Lõpus hinnatakse astmelüliti kontaktide seisukorda läbi praktiliste mõõtmiste.

*Märksõnad:* jõutrafo, astmelüliti, kontaktid, kontaktor, tehniline seisukord, dünaamiline takistuse mõõtmine.

## ABSTRACT

<i>Author:</i> Hardi Naarismaa	<i>Type of the work:</i> Bachelor/Master Thesis
<i>Title:</i> Power transformer on-load tap changer contacts condition assignment using dynamic resistance measurement	
<i>Date:</i> 18.05.2021	64 pages (the number of thesis pages including appendices)
<i>University:</i> Tallinn University of Technology	
<i>School:</i> School of Engineering	
<i>Department:</i> Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics	
<i>Supervisor(s) of the thesis:</i> Senior-researcher Toomas Vaimann, Doctoral student-junior researcher Karolina Kudelina	
<i>Consultant(s):</i> Üllar Pärnat, Sergei Solodilov	
<i>Abstract:</i> <p>The aim of this thesis is to introduce the measurement methodology for the evaluation of the condition of the contacts of the power transformer on load tap changer and to analyze practical measurements based on the theoretical part.</p> <p>To better understand this, the first part first introduces the power transformer, how it works and its main components.</p> <p>The second part deals in more detail with the tap-changer and related measurements.</p> <p>In the last third of the work, the theoretical part of dynamic resistance measurement and the measuring device are introduced. At the end, the condition of the tap-changer contacts is assessed by practical measurements.</p>	
<i>Keywords:</i> power transformer, tap changer, contacts, technical condition, dynamic resistance measurement.	

# LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema:	<b>Jõutrafo astmelüliti kontaktide seisukorra hindamine dünaamilise takistuse mõõtmise teel</b>
Lõputöö teema inglise keeles:	<b>Power transformer on load tap changer contacts condition assignment using dynamic resistance measurement</b>
Üliõpilane:	<b>Hardi Naarismaa, 201213TAF</b>
Eriala:	<b>AAAB Elektriajamid ja jõuelektronika</b>
Lõputöö liik:	<b>bakalaureusetöö</b>
Lõputöö juhendaja:	<b>Toomas Vaimann, Karolina Kudelina</b>
Lõputöö kaasjuhendaja: (ettevõtte, amet ja kontakt)	
Lõputöö ülesande kehtivusaeg:	<b>01.07.2021</b>
Lõputöö esitamise tähtaeg:	<b>18.05.2021 kell 15.00</b>

---

Üliõpilane (allkiri)

---

Juhendaja (allkiri)

---

Õppekava juht (allkiri)

---

Kaasjuhendaja (allkiri)

## 1. Teema põhjendus

Tegemist on uuemat tüüpi mõõtemetodiga, mille tulemus annab väärtuslikku informatsiooni seadme korrasoleku kohta. Teema huvitab uuritavaid seadmeid omavaid ja nende hooldamisega tegelevaid ettevõtteid.

## 2. Töö eesmärk

Töö eesmärgiks on tutvustada mõõtemetodit, millega saab hinnata koormuse all reguleeritava jõutrafo astmelüliti kontaktori seisukorda.

## 3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

- 1) Mida kujutab endast mõõtemetod?
- 2) Mis infot see annab?
- 3) Miks see on kasulik?

- 4) Kus seda kasutada?
- 5) Kuidas seda kasutada (kuidas mõõta)?
- 6) Kuidas hinnata seadme seisukorda mõõtetulemuse põhjal?

#### **4. Lähteandmed**

- 1) Internet
- 2) Eriala kirjandus
- 3) Connecto Eesti AS andmebaas
- 4) Võimalusel Elering AS ja Elektrilevi OÜ andmebaas

#### **5. Uurimismeetodid**

Töö tulemuseni jõutakse teooria läbitöötamise ja mõõtmiste analüüsiga.

#### **6. Graafiline osa**

Graafiline osa on peamiselt töö põhiosas. Lisadesse esitatakse vajadusel trafode mõõtmiste mahukamad tabelid, andmelehed ja muu juurdekuuluv dokumentatsioon.

#### **7. Töö struktuur**

EESSÕNA

Lühendite ja tähistete loetelu

SISSEJUHATUS

##### 1. Jõutrafo

1.1 Tööpõhimõte ja ehitus

1.2 Elemendid

1.2.1 Mähised

1.2.2 Läbiviigud

1.2.3 Astmelüliti

1.3 Hooldus

1.4 Elementide rikke statistika

##### 2. Jõutrafo astmelüliti kontaktide seisukorra hindamine

2.1 Dünaamilise takistuse mõõtemetodi tutvustus

2.2 Kus seda kasutada (trafo/astmelüliti valik)

2.3 Mõõteseadme tutvustus (Omicron)

2.4 Kuidas mõõta

2.5 Mõõtmistulemuste analüüs

KOKKUVÕTE

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

LISAD

## **8. Kasutatud kirjanduse allikad**

Raamatud – eriala kirjandus

Teadusartiklid – ieeexplore andmebaas

Aruanded/mõõteprotokollid – Connecto Eesti AS

Uurimistöõde aruanded – TTÜ raamatukogu digikogu

Instruktiiv- ja metoodilised materjalid – Omicronenergy.com

Internet – Omicronenergy.com

## **9. Lõputöö konsultandid**

Üllar Pärnat – Connecto Eesti AS kõrgepingelabori juhataja

## **10. Töö etapid ja ajakava**

- |  |              |
|--|--------------|
| 1) kirjanduse läbitöötamine                      | (31.03.2021) |
| 2) lähteandmete kogumine                         | (31.03.2021) |
| 3) teoreetilise osa kirjutamine                  | (30.04.2021) |
| 4) arvutuste/mõõtmiste/modelleerimise teostamine | (30.04.2021) |
| 5) uuringu tulemuste kirjeldamine                | (30.04.2021) |
| 6) järelduste kirjutamine                        | (30.04.2021) |
| 7) kokkuvõtte koostamine                         | (30.04.2021) |
| 8) töö esimene versioon valmis                   | (08.05.2021) |
| 9) juhendajale läbilugemiseks saatmine           | (08.05.2021) |
| 10) paranduste sisseviimine                      | (15.05.2021) |
| 11) juhendajale teiseks läbilugemiseks saatmine  | (15.05.2021) |
| 12) töö lõplik versioon valmis                   | (18.05.2021) |

*Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel.*



# SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE .....	4
ABSTRACT .....	5
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE .....	6
EESSÕNA .....	10
SISSEJUHATUS .....	11
1. JÕUTRAFO .....	12
1.1. Jõutrafo otstarve .....	12
1.2. Trafo ehitus ja töötamispõhimõte.....	13
1.2.1. Trafo komponendid .....	15
2. ASTMELÜLITI .....	17
2.1. Astmelülite tüübid, ehitus ja töötamispõhimõte.....	18
2.1.1. Astmelülite kontaktid .....	21
2.2 Astmelülite hooldus.....	23
2.2.1. Astmelüliti levinumad kontrollmõõtmised.....	24
3. JÕUTRAFO ASTMELÜLITI KONTAKTIDE SEISUKORRA HINDAMINE DÜNAAMILISE TAKISTUSE MÕÕTMISE TEEL.....	30
3.1. Dünaamilise takistuse mõõtemetodi tutvustus .....	30
3.2. Mõõteseadme ja -metoodika tutvustus .....	36
3.3. Mõõtmistulemuste analüüs.....	41
3.3.1. Mõõtmine 1 – Audru AJ, trafo C2T .....	41
3.3.2. Mõõtmine 2 – Haapsalu AJ, trafo C1T.....	43
3.3.3. Mõõtmine 3 – Koeru AJ, trafo T1T.....	50
KOKKUVÕTE .....	57
SUMMARY.....	58
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU .....	59
LISAD .....	62
LISA 1 - ASTMELÜLITI RS4 .....	63
LISA 2 – KOERU T1T ASTMELÜLITI RNTA-35/320 SKEEM.....	64

## **EESSÕNA**

Lõputöö teema sai valitud AS Connecto Eesti kõrgepingelabori kollektiivi soovitusel. Täpsema teema sõnastas töö autor.

Töös kasutati AS Connecto Eesti mõõteseadmeid ja mõõteprotokollide arhiivi.

Täna kõrgepingelabori juhatajat Üllar Pärnatit ja inseneri Sergei Solodilovit, kes abistasid konsultatsioonidega ja andmete kogumisega selle töö jaoks.

Samuti täna töö juhendajat Toomas Vaimanni.

## SISSEJUHATUS

Ühiskond sõltub aina enam elektrienergiast. See tähendab elektrivõrku omavale ettevõttele üha suuremat vastutust selle töökindluse osas. Kuigi elektrivõrk koosneb paljudest erinevatest seadmetest, julgen väita, et neil kõigil on vähemalt üks ühine omadus - kõikide nende seadmete vältus ja korrapärane töö eeldab õigeaegset ja põhjalikku hooldust. Hoolduse raames teostatakse vastavalt seadme tootja nõutele erinevaid teste ja kontrollmõõtmisi. Nende mõõtmistulemuste oskuslik analüüs annab kasulikku infot seadme seisukorra kohta. Vastavalt seadme seisukorrale, saab selle info põhjal planeerida järgmisi etappe – näiteks remonti või vahetust. Nii on võimalik vältida tõsisemaid rikkeid ja see võiks huvitada mõlemat osapoolt – nii elektrivõrgu omanikku kui lõpptarbijat.

Selle töö fookuses on mõõtemetod jõutrafo astmelüliti kontaktide seisukorra hindamiseks. Astmelüliti on trafo ainuke liikuv komponent ja seetõttu vastuvõtlikum riketele. Et mõõtemetod oleks lugejale paremini mõistetav, siis töös tutvustatakse sellega seotut järgmiselt:

Töö esimene osa annab ülevaate jõutrafodest. Selgitatakse selle seadme töötamispõhimõtet ja kirjeldatakse, mis põhikomponentidest see koosneb ja mis on iga komponendi töö ülesanne.

Töö teises osas on detailsemalt kirjeldatud astmelüliti. Infot saab põhiliste astmelüliti tüüpide ja ehituse kohta. Lisaks tutvustatakse astmelüliti üldlevinud kontrollmõõtmisi.

Töö viimases kolmandikus tutvustatakse mõõtemetodi teoreetilist osa astmelüliti kontaktide seisukorra hindamiseks. Samuti mõõteseadet. Lõpus hinnatakse astmelüliti kontaktide seisukorda praktiliste mõõtmiste põhjal.

# 1. JÕUTRAFO

## 1.1. Jõutrafo otstarve

Elektrienergiat tarbivate seadmete parameetrid ning ehitus ja ohutustehnilised tingimused esitavad konkreetsed nõuded nende toitepinge suhtes. Seega vajavad tarbijad mitmesuguseid pingeid. Oluline on pinget muuta ka elektrienergia ülekandmisel kaugel maa taha. Ülekanne võimsuse näol on soodsam kõrgel pingel, sest vool on siis väiksem [1] (lihtsustatult):

$$P = U \cdot I \quad (1.1)$$

kus  $P$  – võimsus, W

$U$  – pinge, V

$I$  – vool, A

Lisaks on väiksema voolu korral ülekandeliinis energiakadu väiksem ja juhtmed võivad olla väiksema ristlõikega, mis teeb selle ehitamise majanduslikult odavamaks [1].

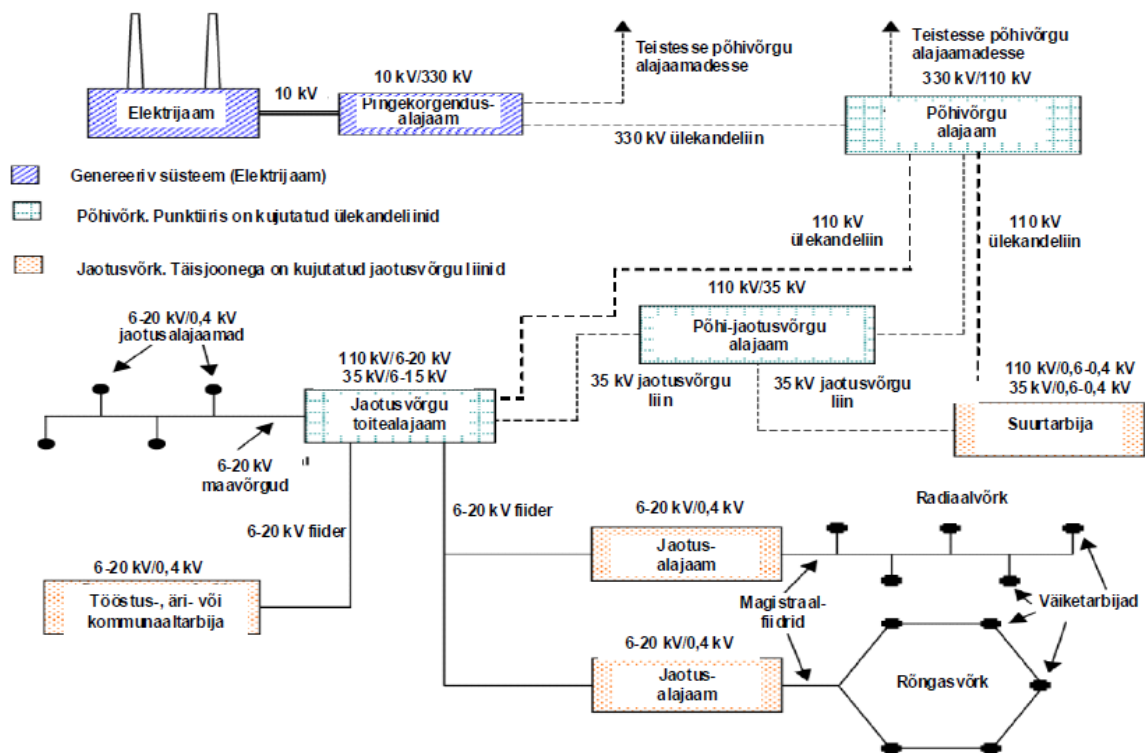
Sõltuvalt elektrienergia ülekandmise vahemaast ja võimsuse vajadusest, jääb elektrit tootva jaama ja lõpptarbijaga vahele mitu pingeklassi – kõrge (110 kV kuni 500 kV), kesk (1 kV kuni 110 kV) ja madal (<1 kV). Mujal maailmas, kus ülekandeliinid on veel pikemad ja elektrienergia lõpptarbijad palju rohkem, on kasutusel ka neljas klass – ülikõrgpingeklass (>500 kV) [2].

Nimetatud pingeklassid koosnevad omakorda veel erinevates nimipingetest:

Tabel 1.1 Eestis kasutatavad nimipinged ja alajaamade arv [2][3][4].

Elektrivõrgu liik	Nimipinge $U_n$ , kV	Alajaamade arv, tk
Madalpingevõrk	$\leq 1$ , enamasti 0,23/0,4	24 640
Keskpingevõrk	6; 10; 15; 20; 35	
Kõrgpingevõrk	110; 220; 330	151

Et energiasüsteemis oleks võimalik eri pingeklassiga elektrivõrgud ühendada, tuleb süsteemis kasutada jõutrafo. Trafo otstarbeks on muundada mingi pingega vahelduvvoolu elektrienergiat sama sagedusega, kuid teistsuguse pingega vahelduvvoolu pingeks [1]. See muundumine toimub alajaamas. Arvestades, et igas alajaamas on vähemalt üks, tavaliselt aga mitu trafot, saab Joonise 1. põhjal positsioneerida trafod energiasüsteemis.



Joonis 1.1 Alajaamad energiasüsteemis [5]

Selle töö raames käsitleme edaspidi ülekandevõrgus kasutusel olevaid astmelülitiga varustatud jõutrafosid.

## 1.2. Trafo ehitus ja töötamispõhimõte

Standard EVS-EN 60076-1:2012 defineerib jõutrafo järgmiselt: kahe või enama mähisega staatiline seade, mis elektromagneetilise induktsiooni abil transformeerib vahelduvpinge- ja voolusüsteemi mingisse teise, tavaliselt erinevate väärtustega, kuid sama sagedusega pinge- ja voolusüsteemi elektrienergia edastuse eesmärgil [6].

See definitsioon on hea lähtepunkt kirjeldamiseks täpsemalt kuidas trafo töötab ja millistest põhikomponentidest koosneb.

Kolmefaasilise jõutrafo südamik koosneb sammastest, mille iga faasi mähised asuvad ühel sambal ja on paigutatud kontsentriselt, alampingemähis südamikule lähemal. Mähist, mis on saab toite energiaallikast, nimetatakse primaar- ehk ülempingemähiseks. Teist mähist, mis annab energiat tarbijale, nimetatakse sekundaar- ehk alampingemähiseks. Trafo ülempinge läbiviikude abil juhitakse elektrivõrgust tulev vool

ülempinge mähisesse. Vool tekitab südamikus vahelduvmagnetvoo, mis indutseerib mõlemas mähises elektromotoorjõu:

$$\begin{aligned} E1 &= 4,44f w1 \phi m \\ E2 &= 4,44f w2 \phi m \end{aligned} \quad (1.2)$$

kus  $E1$  – elektrmotoorjõud primaarmähises, V  
 $E2$  – elektromotoorjõud sekundaarmähises, V  
 $F$  – vahelduvpinge sagedus, Hz  
 $W1$  – primaarmähise keerdude arv,  
 $W2$  – sekundaarmähise keerdude arv,  
 $\phi m$  – südamiku magnetvoog

Jagades võrdused:

$$\frac{E1}{E2} = \frac{w1}{w2} = k \quad (1.3)$$

kus  $k$  – trafo ülekanalitegur

Sekundaarmähis ühendatakse tarbijaga läbi alampinge läbiviikude ning selle koormamisel tekib selles vool  $I2$  ja pinge  $U2$ . Trafo mähistes tekivad töötamisel pingelangud  $E1 > U1$  ja  $E2 > U2$ , kuna aga pingelangud on suhteliselt väikesed siis võime lugeda  $U1 \approx E1$  ja  $U2 \approx E2$ , siis

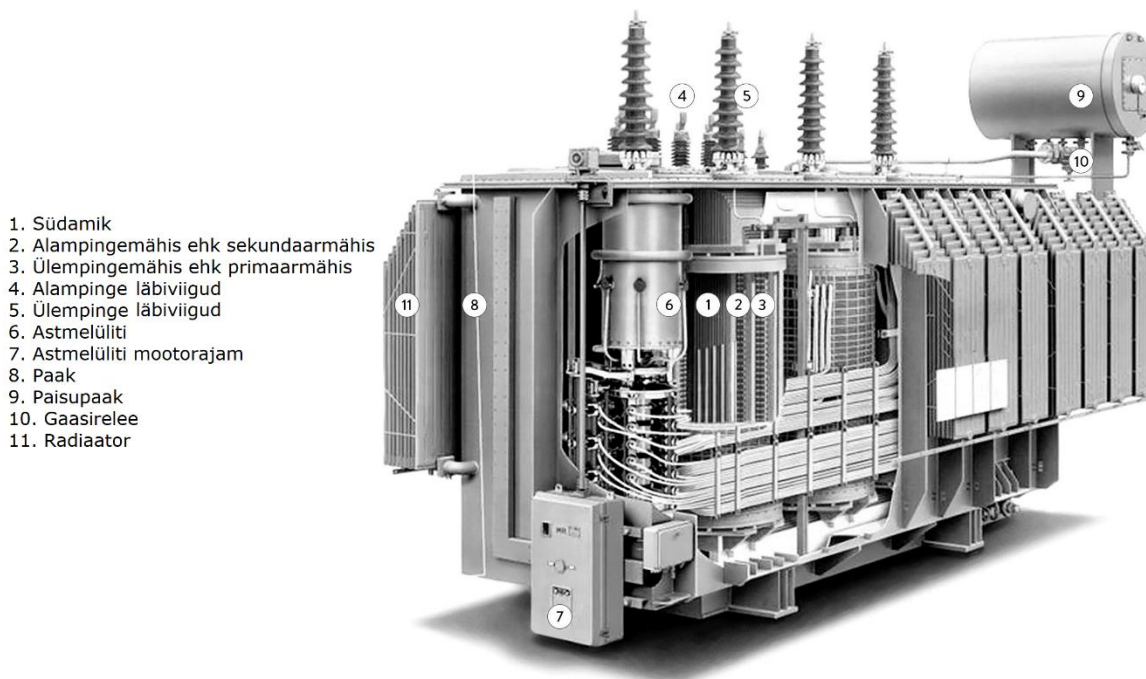
$$\frac{U1}{U2} \approx \frac{E1}{E2} = \frac{w1}{w2} = k \quad (1.4)$$

Trafomähiste pinged on võrdelised mähiste keerdude arvudega, voolud aga pöördvõrdelised:

$$\frac{U1}{U2} \approx \frac{I2}{I1} = k \quad (1.5)$$

Kui  $k > 1$ , siis on tegemist pinget madaldava trafoga, kui  $k < 1$  siis pinget tõstva trafoga [7].

## 1.2.1. Trafo komponendid



Joonis 1.2 Lõige jõutrafast, kus on näha trafo aktiivosa ja tähtsamad komponendid

**Trafo** südamikus toimub magnetvoo liikumine. See koosneb 0,23-0,33 mm paksusest üksteise peale laotud, kuid isoleermaterjaliga eraldatud metalli kihtidest. Kihilise ehituse eesmärgiks on vähendada pöörivoolusid [8].

**Mähised** koosnevad ristkülikukujuliste ristlõigetega voolujuhtidest, mis on keritud ümber südamiku sammaste, kuid samas on isoleeritud nii, et puuduks kokkupuude keerdude vahel kui ka südamikuga. Üldjuhul on mähised tehtud vasest, sest selle voolujuhtivus on parem ja sel on parem mehhaaniline tugevus.

Primaarmähistel on väljavõtted ehk astmed. Need väljavõtted on ühendatud astmelülitiga [9]

**Läbiviikude** abil juhitakse vool trafo primaarmähisesse. Indutseeritakse pinge sekundaarmähisesse ja tarvitite olemasolul liigub vool madalamal pingel trafost välja läbi alampinge läbiviikude.

Läbiviigud koosnevad kahest põhilisest osast: keskel asuvast voolujuhtivast osast ja seda ümbritsevast välisest isoleerivast osast.

**Paak** ümbritseb trafo aktiivosa. Paagil on mitu tähtsat eesmärki: see kaitseb aktiivosa väliste tegurite eest ja on täidetud isolatsioonõliga. Isolatsioonõlil ehk trafoõlil on

omakorda kaks tähtsat ülesannet: sel on isoleeriv ülesanne ja teiseks jahutab see aktiivosa.

Temperatuuri tõustes, näiteks kuumal suvepäeval või suure koormuse all hakkab põhipaagis olev õli paisuma. Kuna trafo põhipaak ehk kest on kinnine, siis selleks, et õlil oleks kuhugi liikuda, tuleb kasutada **paisupaaki** ehk konservaatorit. Temperatuuri langedes liigub õli paisupaagist tagasi põhipaaki.

**Radiaator** jahutab trafopaagis olevat õli. Kui põhipaagis õli temperatuur tõuseb, siis õli paisub. Teatud kõrgusel põhipaagis on ava ühendatud radiaatoriga. Kui õli paisub siis liigub ta läbi selle ava radiaatorisse. Seal õli jahtub ja liigub tagasi põhipaaki läbi alumise ava. Tekib tsirkulatsioon

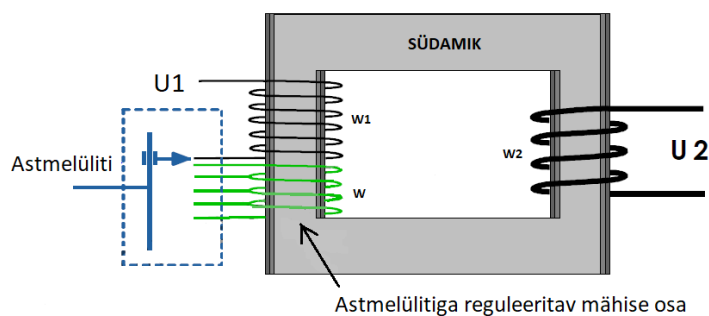
**Gaasirelee** ehk Buchholz'i relee asub trafo põhipaagi ja paisupaagi vahel. Selle ülesandeks on reageerida gaaside survele trafosisese avarii korral ja anda signaal trafo väljalülitamiseks kõrgepinge poolelt läbi võimsuslüliti.



## 2. ASTMELÜLITI

Ülekandevõrgus kasutatavate jõutrafode töös on vajalik reguleerida ülekandesuhet. Seda tehakse üldjuhul primaarmähise poolel eesmärgiga muuta pinget sekundaarmähise poolel ja nii reguleerida koormust. See on eelkõige vajalik selleks, et hoida süsteemis koormuse tarbimine tasakaalus tootmisega, sest elektrienergiat ei saa suures mahus ja suurte kaduteta salvestada. Suuresti sellest tasakaalust sõltub elektrisüsteemi stabiilsus ja lisaks on see majanduslikult mõistlik [2].

Trafo pinge reguleerimine saavutatakse mähise keerdude suhet muutes, neid kas liites või lahutades. Selleks on trafo mähisel väljavõtted. Neid väljavõtteid ehk astmeid on võimsatel jõutrafodel üldjuhul 9 – 35, ja läbi nende reguleeritakse tavaliselt  $\pm 20\%$  trafo standardpingeväärtusest. Astmete vahetamiseks on trafo mähisega ühendatud astmelüliti (Joonis 2.2) [10].



Joonis 2.2 Mähisega ühendatud astmelüliti [10]

Saame täiendada valemit 1.4 järgnevalt:

$$\frac{U1}{U2} = \frac{w1 + w}{w2} \quad (2.1)$$

kus  $U1$  - primaarpinge, V

$w1$  - primaarmähise keerdude arv

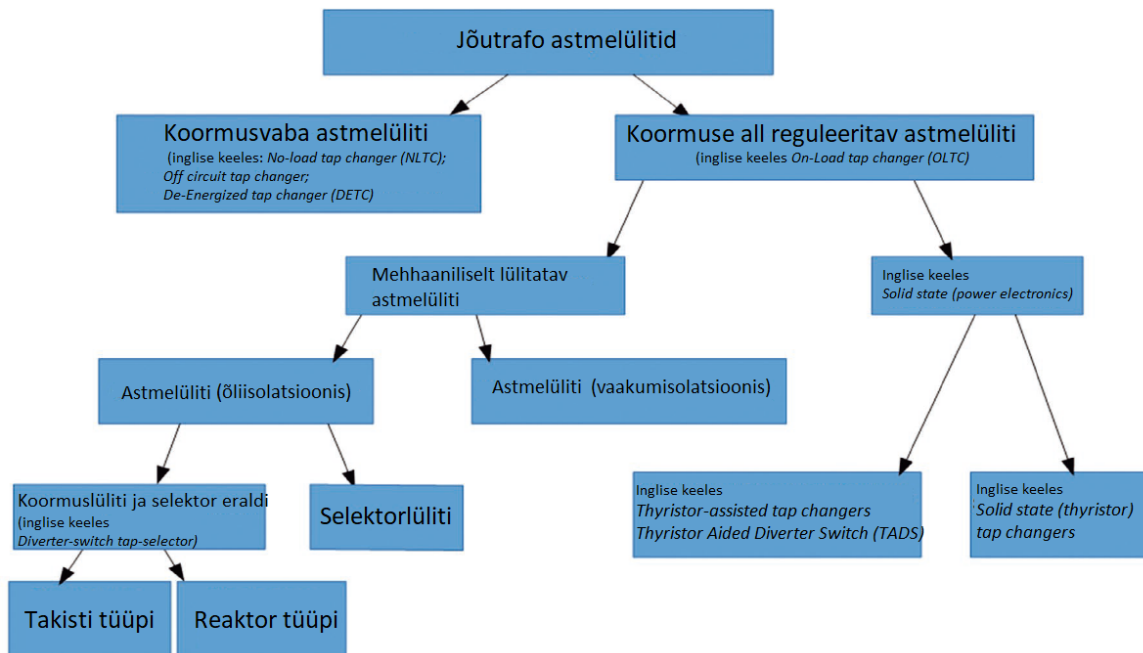
$w$  - astmelülitiga reguleeritav primaarmähise väljavõtetega ehk astmetega osa.

$U2$  - sekundaarpinge, V

$w2$  - sekundaarmähise keerdude arv.

## 2.1. Astmelülite tüübid, ehitus ja töötamispõhimõte

Trafodes on kasutusel mitut tüüpi astmelüliteid (joonis 2.3). Nende sisuline ülesanne on kõigil sama – võimaldada reguleerida ülekandesuhet vastavalt vajadusele.



Joonis 2.3 Jõutrafodes kasutatavate astmelülite tüübid [11]

Klassikaline astmelüliti koosneb liikuvatest ja fikseeritud kontaktidest, elektrilisest ajamist astmete vahetamiseks ja lisa komponentidest nagu takistid ja reaktorid. Euroopas ja sealhulgas Eestis reaktoreid ei kasutata. Reaktorid on kasutusel näiteks Põhja-Ameerikas, kus astmelüliti on ühendatud sekundaarmähisega. Euroopas ja Eestis on astmelülitid ühendatud primaarmähisega. Seda kahel põhjusel [12]:

- 1) Primaarmähises on vool väiksem ja seetõttu astmelüliti disain kompaktssem.
- 2) Primaarmähis asub trafo südamikul väljaspool ja see teeb selle ühenduse lihtsamaks

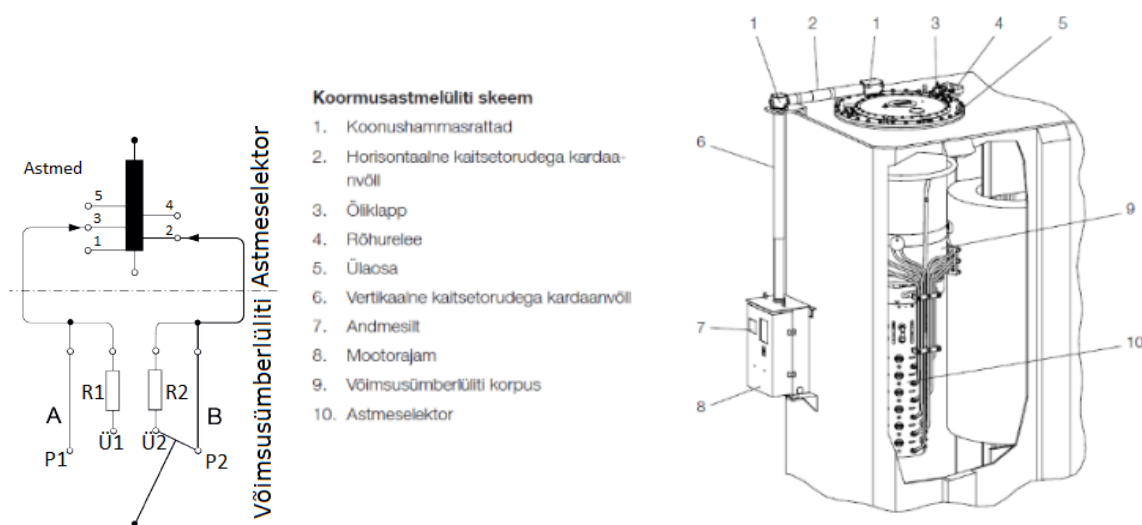
Edasises töös vaatleme ülekandevõrgus koormuse all mehhaaniliselt lülitatavaid ja õlikeskkonnas asetsevad takisti-tüüpi astmelüliteid.

Selleks, et mõista lülitusprotsessi ja hiljem hinnata mõõtmistulemuste põhjal astmelüliti seisukorda, tuleb mõista astmelülite ehitust ja tööpõhimõtet.

Kõik koormuse all reguleeritavad astmelülite tüübid peavad üle kandma koormusvoolu ja on selleks varustatud erinevate koormuse all töötavate kontaktidega, mis ühiselt kokku moodustavad kaarelüliti. Kasutusel on kaks põhimõttelist astmelülite tüüpi:

- 1) Suunav-tüüpi astmelüliti (inglise keeles *Diverter-switch tap-selector type*)
- 2) Selektorüliti (inglise keeles *Selector switch type*)

Suunav-tüüpi astmelüliti koosneb kahest põhilisest osast: astmeselektorist ja võimsusümberlülitest. Katkematu lülituse tagamiseks lülitub esmalt astmeselektor soovitud astmele. See aste on ühendatud tööst väljas võimsusümberlüliti kontaktiga. Koheselt kui astmeselektor on astet muutnud, muudab võimsusümberlüliti asendit, mille tulemusel suunatakse koormus läbi valitud astme. Võimsusümberlüliti on eraldatud trafo põhi õlipaagist ja asub eraldi suletud paagis.

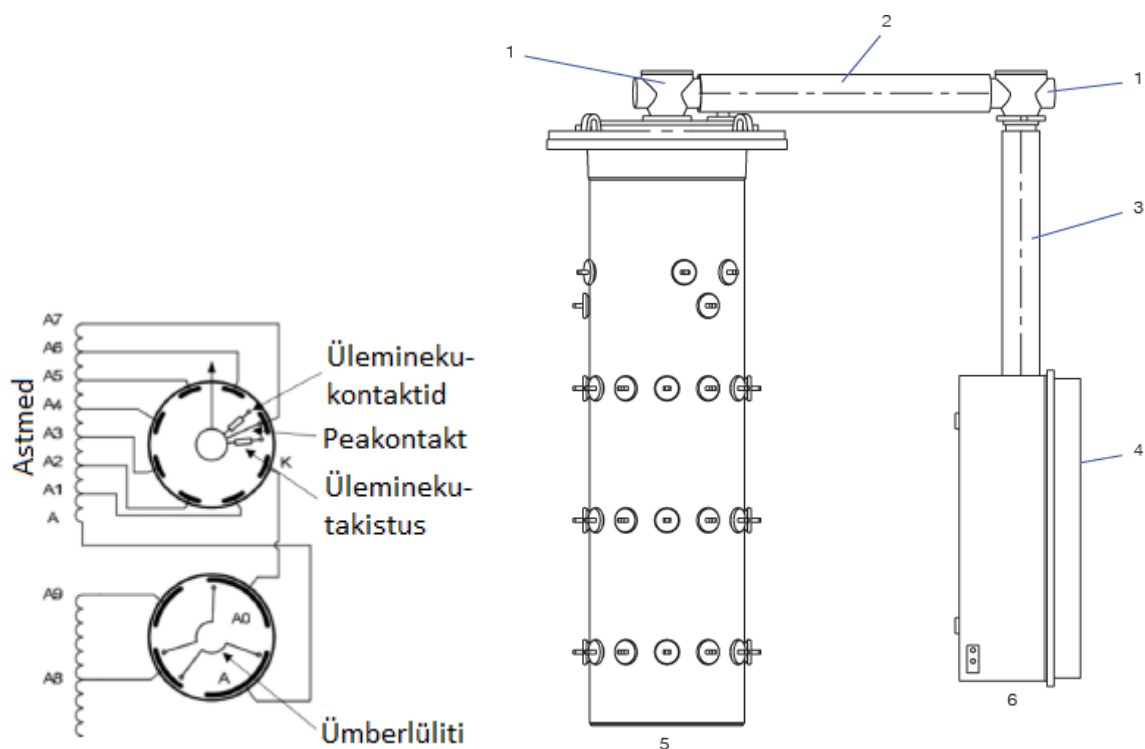


Joonis 2.4 Suunav-tüüpi astmelüliti kontseptsioon ja skeem [13] [14], kus A ja B tähistavad ahelat; P1 ja P2 peakontakte; Ü1 ja Ü2 üleminekukontakte; R1 ja R2 üleminekutakisteid.

Selektor-tüüpi astmelülitis on kombineeritud astmeselektori (inglise keeles *tap-selector*) ja võimsusümberlüliti (inglise keeles *diverter-switch*) funktsioonid. See lüliti koosneb staatorist, kuhu on paigaldatud staatilised kontaktid ja mis on ühendatud trafo mähise väljavõtetega - astmetega. Staatori sees asub rootor koos kontaktidega ja seda liigutab mootoriga juhtmehhanism. See mehhanism liigutab rootorit, et saavutada ühendus staatori ja rootori kontaktide vahel [12].

Seda tüüpi astmelüliti on eraldatud jõutrafo põhi õlipaagist ja on paigutatud eraldi suletud paaki. Seda sellepärast, et lülitamistel tekib kontaktide vahel kaarleek ja keemilise protsessi tulemusel eraldub süsinikku mis sinna sadestub. See mõjub halvasti õli isolatsiooni omadustele.

See disain on kasutusel koormustel kuni 650 kV ja kuni 600 A [10].



Joonis 2.5 Selektorlülitu kontseptsioon ja skeem [15][16], kus: 1 – koonushammasratas; 2 – horisontaalne kaitsekätega völli; 3 – vertikaalne kaitsega völli; 4 – andmesilt; 5 – koormusastmelüliti; 6 - mootorajam

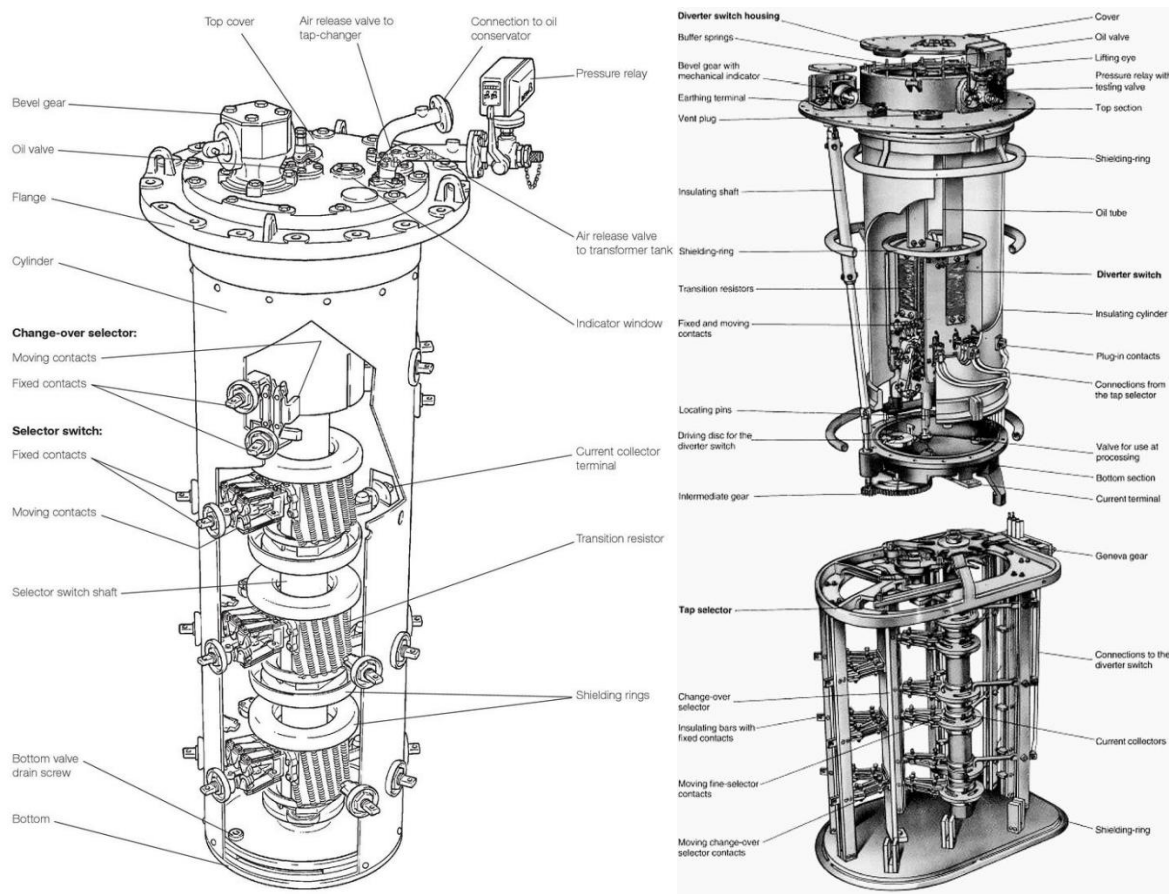
Mõlema lahenduse puhul on astmelüliti peamiskontaktide kõrval lisaahelana üleminekukontaktid takistiga (Joonis 2.4 ja Joonis 2.5), mõne tüübi puhul võib olla mitu takistit. Need takistid on lisatud, et piirata astmevahetusel tekkivat voolu.

Lisaks võib mõlema astmelüliti tüübi puhul olla ümberlülit (inglise keeles *change-over selector*). Ümberlülit võimaldab laiendada mähise pingereguleerimisvahemikku (Joonis 2.5). Kuigi ümberlülitit on võimalik mähise ühendada mitmes erinevas variatsioonis, siis selles töös teisi võimalusi ühendamiseks ja põhjalikumalt ülevaadet ümberlülitist detailsemalt ei käsitleta.

Põhiline erinevus nende astmelüliti tüüpide vahel on see, et suunav-tüüpi astmelüliti kasutab astmeselektorit (inglise keeles *tap selector*), et valida järgmine aste enne kui lülitub koormusvoolu võimsusümberlülitiga ümber [12].

### 2.1.1. Astmelülite kontaktid

Astmelüliti kõige tähtsam eesmärk on tagada lülitamisel koormuse katkematus. Seda pole võimalik tagada ainult ühe kontaktiga ja selleks on astmelülil mitu erinevat komplekti kontakte (joonis 2.7).



Joonis 2.6 Erinevat tüüpi astmelüliti kontaktid. Vasakul selektor-tüüpi [17] ja paremal suunav-tüüpi astmelüliti [18].

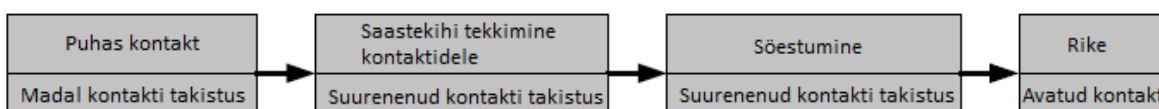
Sõltumata astmelüliti tüübist saab nende kontakte klassifitseerida nii fikseeritud kui ka liikuvad kontaktid, mis erinevad omakorda tööjaotuse osas ja osalevad lülitusprotsessis erinevates staadiumites ja töötavad ka erinevate koormuste all.

Näiteks astmelüliti kaarelüliti (inglise keeles *arcing switch*) peakontaktid on kavandatud kaarekustutamiseks ja koormuse ülekandeks üleminekukontaktidele (inglise keeles *transition contacts*). Kaarelüliti (inglise keeles *arcing switch*) kaarekontaktid (inglise keeles *arcing contacts*) on kavandatud katkestama voluringi. Vastupidiselt, astmeselektori (inglise keeles *tap selector*) ja ümberlüliti (inglise keeles *change-over selector*) kontaktid ei lülitu koormuse all. Sellepärast need kontaktid kuuluvad erinevalt [12].

Ümberlülitite ja astmeselektori kontaktid ei kulu sama kiiresti kui võimsusümberlülitite kaarekontaktid, sest viimased lülituvad koormuse all. Kuigi ümberlülitite ja astmeselektori kontaktid ei lülitu koormuste all, võib nende kontaktide pind olla auklik ja esineda süsiniku pürolüüsi teket. Nende kontakt pole halvenenud mitte koormuse ümberlülitamisel tekkinud kaarleegist vaid pikaajalisest ülekuumenemise protsessist [12].

Üldiselt ümberlülitite kontakte tihti ei lülitata ja need võivad olla pikalt liikumatult. Sellest tulenevalt tekib järgmine oht: pikaajaline kontaktide vananemine trafoõlis. Näiteks Hollandis põhjustab seda tüüpi degradeerumine kõige enam astmelülitite ümberlülitite rikkeid [12].

Kontaktide takistus on sõltuvuses nende seisukorrast. Nende seisukord sõltub omakorda pikaajalisest mõjust, mis on võimalik jagada kolme põhietappi (joonis 2.7) [12]



Joonis 2.7 Kontaktide takistuse sõltuvus pikaajalisest mõjust. Pikaajaline efekt algab saastekihi tekkimisest kontaktidele. Suurenenud takistus võib põhjustada söestumist. Kiire termiline kasv võib põhjustada rikke astmelülitite avatud kontaktide tõttu [12].

Puhas kontakt on sisuliselt kahe uue kontakti vaheline saastainete vaba kontakt.

Aja möödudes hakkab kontaktidevaheline takistus kasvama. Seda põhjustab pinna oksüdeerumine ja orgaaniliste polümeeride teke. Need nähtused vähendavad juhtivust. Vaskkontaktidele moodustuvad kindlas järjekorras anorgaanilised kihid tenoriidist (CuO), kupriidist (Cu<sub>2</sub>O) ja sulfiidid (CuS ja Cu<sub>2</sub>S). Kõrgematel temperatuuridel tekib trafoõli orgaanilistest ühenditest orgaaniline kile, mis seondub juba moodustunud oksiidikihiga. Tekib stabiilne madala juhtivusega kile, mida peetakse pikaajalise vananemise algstaadiumiks. Kontaktide vananedes see pinnakile pakseneb. Ühtlasi on see tugevalt sõltuvuses kontaktide pinnatemperatuurist. Kontaktide takistus ja võimsuskadu kasvab pinnakile paksenedes. Varajases staadiumis on võimalik selle pikaajalise vananemise tulemusel tekkinud kile eemaldada, lülitades läbi astmelülitite kõik astmed. Kontaktide liikumine selle tsükli ajal lagundab osaliselt tekkinud pinna saastet. Pikaajalise vananemise järgmine ja edasiarenenud degradatsiooni etapp on pinnakile kasvu kiirus sõltuvalt temperatuurist. Kontakti takistus võib ka langeda pikaajalises vananemises, sest pinnakile puruneb kontaktide liikumisel. Väikesed elektrilahendused võivad taastada parema voolutee lõhkudes pinnakilet aga kontakti takistus võib tõusta kordades enne kui kontakt paraneb. Edasisel degradeerumisel need elektrilahendused

halvnevad ja kõrge kontakti temperatuuri tõttu eraldub õli. Just nende koosmõjul toimub pikaajaline vananemine[12].

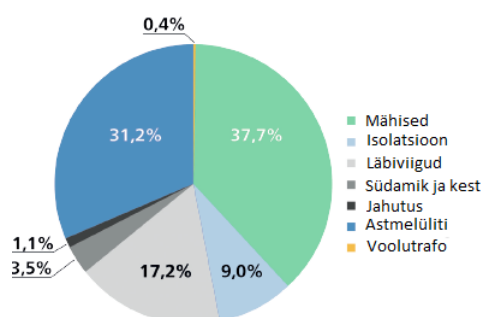
Trafo isolatsiooniõli lagunemisel tekib kontaktide vahele süsiniku ladestumist. Seda protsessi nimetatakse söestumiseks (inglise keeles *coking*). Õli lõhenemine toimub temperatuuril üle 300 C. Juba 100-105 C kontakti lähedane temperatuur võib tekitada tõsisid defekte, 300 C ja rohkem on katastroofiline [12].

Lisaks söestumisele kontaktid kuluvad ja nende pinnale tekivad auklikud kohad. Need kontaktid on pöördumatult vigastatud ja nende puhul ei aita astmelüliti lülitamine läbi kõikide astmete. Selleks on vaja remonti. Ümberlülitite (change over selector) vähese liikuvuse tõttu võib söestumist tekkida kõikidele staatori ja rootori kontaktidele ja teistele koormuskandvatele liikuvatele osadele [12].

Pikajalise vananemise viimane staadium on kiire termiline kasv (inglise keeles *thermal runaway*). Söestumine kiireneb kontakti takistuse ja süsiniku termilise takistuse suurenemisel. Söestumine võib vähendada pinget kontaktide liikuvate osade ja kontakte pingestavate vedrude vahel. Lõpuks kaob märkimisväärne kogus kontakti pinda ja liigne kaarleek aktiveerib astmelüliti kaitsemehhanismid [12].

## 2.2 Astmelülitite hooldus

Sarnaselt trafole on astmelüliti kasutusaeg pikk, aastakümneid. See eeldab ka õigeaegset ja põhjalikku hooldust. Lisaks on see trafo ainus liikuv komponent ja osaliselt seetõttu on see väga vastuvõtlik erinevatele riketele. Asjakohased uuringu tulemused näitavad, et üle 30 % [19] jõutrafoade katkestusi põhjustanud riketest on seotud vananevate astmelülititega. Ametlikud andmed Eesti seadmete rikete kohta puuduvad, kuid Eleringi vastava eriala spetsialisti [20] mitteametlike andmete põhjal on astmelülititega seotud rikete suurusjärk sama (Joonis 2.8).



Joonis 2.8 Jõutrafo komponentide rikete osakaal [13] [19].

Tulenevalt astmelüliti kõrgeast rike osakaalust, on kriitilise tähtsusega seda hooldada õigeaegselt ja võimalikult põhjalikult. Uuringute tulemustest selgub, et 12 % [21] seadmetest vajavad hooldust varem kui tootja on vajalikuks pidanud. Sellest võiks järeldada, et seadmete pidev monitooring ja perioodiline põhjalik hooldus on õigustatud.

Arvestades jõutrafode kallist maksumust (olenevalt trafo võimsusest ulatub hind miljonitesse eurodesse) ja rolli kogu elektrisüsteemis, on mõistlik investeerida hooldusesse ja tegeleda rikete ennetamisega. Korrektne hooldus vähendab oluliselt avariide riski ja on pikas perspektiivis odavam kui tegeleda rikkeliste tagajärgedega, mis võivad süsteemile osutada katastroofilisteks.

Astmelüliti kontrolliks kasutatakse kahte põhimõttelist meetodit: reaajas monitooring (inglise keeles *on-line*) töösoleku ajal ja seadme kontrollmõõtmine, kui see on tööst välja viidud (inglise keeles *off-line*)[12].

Astmelüliti monitooring hõlmab pidevalt parameetrite jälgimist läbi seadmele paigaldatud monitooringu seadme. Need reaajas jälgimist võimaldavad süsteemid salvestavad astmelüliti puhul lülitusparameetreid ja ei mõjuta astmelüliti normaalset tööd. Defekti ilmnemisel saadavad nad vastava alarmsignaali[12].

Lisaks pidevale reaajas kogutud infole ja vajadusel alarmide edastamisele võivad need süsteemid genereerida soovituslikke hooldusplaane lülitusvoolude, astmete positsiooni ja töötemperatuuride põhjal[12].

Erinevalt reaajas tehtavale monitooringule (on-line) teostatakse tööst väljas (off-line) seadme kontrollmõõtmised perioodiliselt. Sellisel juhul saadakse seadme seisukorrast parem ülevaade, sest kasutatakse tehniliselt täpsemaid mõõteriistu. Neid mõõtmisi võib vaadata täiendusena reaajas tehtavale monitooringule näiteks juhul, kui monitooringu käigus on ilmenenud mõni defekt. Põhieesmärk on tuvastada defektid varases staadiumis enne olulise kahju tekkimist [12].

### **2.2.1. Astmelüliti levinumad kontrollmõõtmised**

Astmelüliti hoolduse käigus kontrollitakse selle seisukorda mitme otsese ja kaudse meetodiga [22]:



- 1) Õli ja isolatsiooni analüüs:
  - lahustunud gaaside analüüs (inglise keeles *dissolved gas analysis (DGA)*)
  - osalahenduste analüüs (inglise keeles *particle profiling*)
- 2) Mehhaaniline diagnostika:
  - vibratsiooni-akustiline meetod (inglise keeles *vibro-acoustic diagnostic method*)
  - mootorajami töövoolu mõõtmine (inglise keeles *motor current measurement*)
- 3) Astmelüliti kontaktide diagnostika:
  - staatiline takistuse mõõtmine (inglise keeles *static resistance measurement*)
  - dünaamiline takistuse mõõtmine (inglise keeles *dynamic resistance measurement (DRM)*)

Jõutrafode astmete lülitusprotsesside käigus tekib trafoõlis kuumenemine, mille käigus võib eralduda gaase.

**Lahustunud gaaside analüüsi** puhul võetakse trafost õliproov, kust laboritingimustes spetsiaalsete vahenditega ja erinevate meetoditega selles sisalduvad gaasid ekstraheeritakse, eraldatakse, tuvastatakse ja kvantifitseeritakse. Tavaliselt leitakse vesiniku (H<sub>2</sub>), metaani (CH<sub>4</sub>), etaani (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>), etüleen (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>), atsetüleen (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>), vingugaasi (CO), süsinikdioksiidi (CO<sub>2</sub>), hapniku (O<sub>2</sub>) ja lämmastiku (N<sub>2</sub>) sisaldus õlis [23].

Kuigi tulemusi saab interpreteerida mitmel viisil, siis näiteks rahvusvahelise standardi (IEC 60599) kohaselt saab kolme erineva gaasi suhtarvu põhjal anda hinnangu seadme seisukorra kohta järgmiselt [23]:

$\frac{C_{2H_2}}{C_{2H_4}}$  - relatsioon viitab kas termilisele või elektrilise rikkele

$\frac{C_{2H_2}}{C_{2H_4}}$  - relatsioon viitab võimalikule tõsisele elektrilise probleemile

$\frac{C_{2H_4}}{C_{2H_6}}$  - relatsioon viitab õli ülekuumenemisele

Seda üsna levinud analüüsi tehakse kindlate perioodide tagant või teatud lülituskordade täitumisel. Tulemuste põhjal määratakse vajalikud lisa analüüsid

Analüüsi eesmärgiks on tuvastada jälgi võimalikust kaarleegi esinemisest või ülekuumenemist/söestumist.

**Osalahendus** on dielektriku osaline läbilöök, kus elektrilahendus tekib kahe pingestatud elektroodi vahel isolatsiooniõlis ilma, et tekiks täielik sildav lahendus. Analüüsi eesmärk on tuvastada isolatsiooniõlis selle dielektriliste omaduste halvenemist. Selleks tehakse isolatsiooniõlile mitmeid erinevad analüüse, et leida selles saasteaineid, milleks võivad olla vesi ja ka mehhanilisest liikumisest tekkinud osakesed.

Iga astmelüliti operatsioon tekitab vibro-akustilise lainejälje, mis levib mööda seadme struktruuseid elemente. **Vibratsiooni-akustiline meetod** põhineb nende lainete mõõtmisel, vaatlusel ja nende tulemuste kõrvutamiselega varasemalt mõõdetud tulemustega. See annab võrdlusmomenti, mille põhjal saab diagnoosida seadme seisukorda [24].

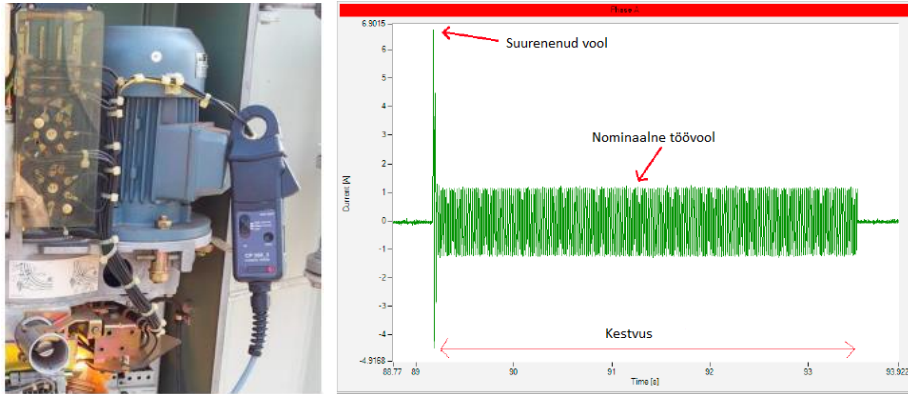
Mõõtmiseks paigaldatakse uuritavale seadmele sensorid, mis registreerivad vibro-akustilisi laineid. Igakordsel mõõtmisel tuleb sensorid paigaldada samasse kohta, et võrdlusmoment eelmisega oleks võimalikult täpne. Stabiilselt töötav ja defektivaba astmelüliti peaks näitama igakord ühesuguseid lainemustreid. Igasugune pisem märk defektist on tuvastatav muutunud lainekujus [24].

Mõõdetud andmed töödeldakse spetsiaalse tarkvaraga stabiilsemaks. See tähendab, et tulemused filtreeritakse ja eraldatakse kõrged ja madalasagedused. Nii on need paremini loetavad.

Kogutud andmete põhjal saab väita, et mehhaanilised rikked ilmnevad madalasagedusel 2 kuni 10 kHz ja elektrilised kõrgetel sagedustel 10 kuni 20 kHz [24].

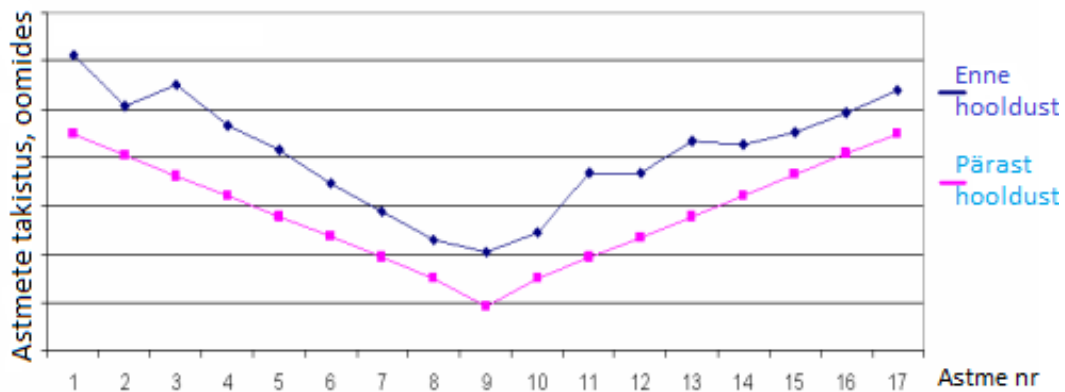
**Mootorajami töövoolu mõõtmise** eesmärk on avastada defekte astmelüliti liigutavas mootoris. Kui voolutarbimine on tavapärasest kõrgem, siis tähendab, et mootor vajab lisajõudu suurenenud mehhaanilistele jõududele. See võib olla tingitud kas määrdeaine puudumisest või liikuvate mehhaaniliste osade valest asendist [25].

Astmelüliti mootori voolu saab mõõta voolutangidega hetkel kui astmelüliti on töös (Joonis 2.10).



Joonis 2.10 Vasakul astmelüliti mootori töövoolu mõõtmine ja paremal graafik [25]

Jõutrafo primaarmähise kõikide **astmete staatilise takistuse mõõtmisega** on võimalik tuvastada astmelüliti kontaktide degradeerumist. Vananemisel, kulumisel ja rikete puhul kontaktide takistus muutub suuremaks (Joonis 2.11).



Joonis 2.11 Astmete oomilise takistuse graafik enne ja peale hooldust [22]

Selle mõõtmise ajal on astmelüliti liikumatult paigal, sellest ka nimetus staatiline mõõtmine. Kuna mõõdetakse alisisvooluga ja astmelüliti on ühenduses mähisega, siis võib seda mõõtmist pidada ka mähise oomilise takistuse mõõtmiseks. Trafo mähise takistuse suurus igal astmel leitakse seosest valemiga [12]:

$$U = I * R + L * \frac{dI}{dt} \quad (2.2)$$

kus  $U$  - pinge, V

$I$  - vool, A

$R$  - takistus,  $\Omega$

$L$  - induktiivsus, H

Mõõtmine võtab trafo mähiste suure induktiivsuse tõttu kaua aega kuna vool mähises peab stabiliseeruma:

$$\frac{dI}{dt} = 0 \quad (2.3)$$

Et tulemusi saaks võrrelda varasemate mõõtmistega tuleb arvestada temperatuuriga [12]:

$$R_s = R_m \frac{(T_s + T_k)}{(T_m + T_k)} \quad (2.4)$$

kus  $R_s$  – takistus referents temperatuuril  $T_s$ ,  $\Omega$ ;

$R_m$  – mõõdetud takistus,  $\Omega$

$T_s$  – referents temperatuur,  $^{\circ}\text{C}$

$T_m$  – temperatuur takistuse mõõtmise ajal,  $^{\circ}\text{C}$

$T_k$  – temperatuuri koefitsent, 234,5 vask (Cu) ja 225 alumiinium (Al)

Lisaks eelnevalt kirjeldatud mõõtmistele teostatakse Eestis teatud vanematele ida päritolu tüüpi (näiteks RNTA, RS-3 või RS-4) astmelülitile veel:

### **1) Kontaktori ringdiagramm**

### **2) Kontaktori ostsillogramm**

Kontaktori ringdiagrammi puhul mõõdetakse/loetakse astmeselektori ajami kindlat pöörete arvu ühelt astmelt teisele. Eesmärk on võrrelda neid pöörete arvusid tehase andmetega või muu referents mõõtetulemustega. Nii on võimalik tuvastada astmelüliti kontaktide õige asend. Igasugune erinevus eelmisest mõõtmisest, mis on väljaspool lubatud piire, viitab mehhaanilistele muutustele ja tuleks lähemalt uurida. Mõõdetavad astmed valitakse astmete kolmest piirkonnast – algusest, keskelt ja lõpust (Joonis 2.12).

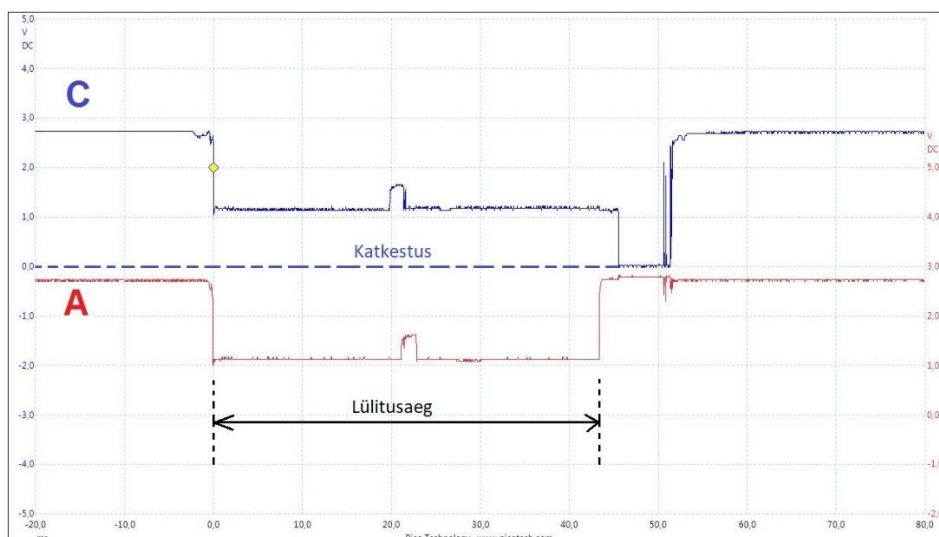
### 5. Kontaktori ringdiagramm

Aste	Pöörete arv kuni kontaktide avamiseni	Pöörete arv kuni kontaktide sulgemiseni	Pöörete arv kontaktide avamiseni	Pöörete arv mootori seiskumiseni
2→1	8	17	26,5	33
7→8	7,5	17	27	33
8→9	8,5	17	27	33
9→10	7,5	16,5	27,5	33
10→9	8	16,5	26,5	33
10→11	8,5	17,5	27	33
11→10	7,5	16,5	26,5	33
18→19	8,5	17,5	27,5	33

Joonis 2.12 Kontaktori ringdiagramm [26]

Kontaktori ostsillogrammi abil mõõdetakse võimsusümberlüüti vähemalt kahe (kolmekanaliga ostsillograafia on võimalik mõõta kolme faasi) erineva faasi kontaktide üheaegset liikumist ja lisaks on võimalik tuvastada lülitamisel tekkinud katkestus.

Mõõtmiseks ühendatakse ostsillograaf otse astmelüüti võimsusümberlüüti kontaktidele, seega mõõteahelas pole trafomähist. Mõõtmiste käigus salvestatakse lülituskarakteristik. Joonisel 2.12 on näha A ja C faasi lülitusaegasid. On selgelt näha erinevaid lülitusaegasid, mis võivad viidata defektile. C-faasil on näha pingelangu nullini ehk katkestust. See viitab problemaatilisele kontaktile. Mõlema faasi lülitusgraafikul hetkeline väike pingetõus (lülitamisprotsessi keskel) on normaalne ja see tuleneb astmelüüti ehituse eripärast (astmelüüti üleminekutakistuste parallelühendus).



Joonis 2.13 Tüüpiline kontaktori ostsillogramm astmelüüti kontaktori mõõtmisel [26]

### **3. JÕUTRAFO ASTMELÜLITI KONTAKTIDE SEISUKORRA HINDAMINE DÜNAAMILISE TAKISTUSE MÕÕTMISE TEEL**

#### **3.1. Dünaamilise takistuse mõõtemetodi tutvustus**

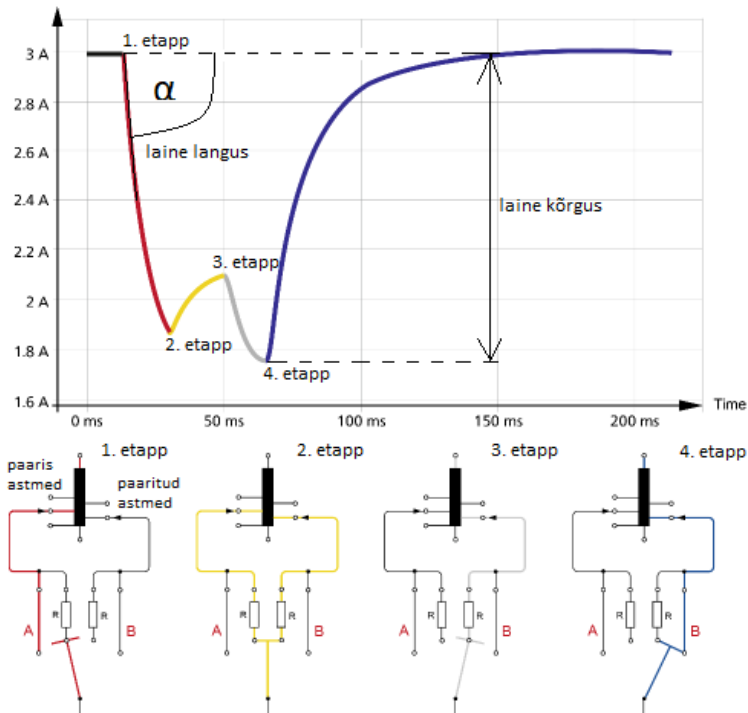
Dünaamilise takistuse mõõtemetod võeti esialgselt kasutusele võimsuslülitite mõõtmisel. Mõõtmisel juhitakse suletud kontaktidega võimsuslülitile suur vool, tavaliselt 100 amprit või rohkem. Võimsuslülitil avamisel mõõdetakse kaarekontaktide lülitusprotsessi [27].

Dünaamilise takistuse mõõtemetodit kasutatakse jõutrafo astmelüliti võimsusümberlülitil ja peakontaktide seisukorra hindamiseks. Selle meetodi abil on võimalik tuvastada mitmeid astmelüliti defekte ilma vajaduseta otseseks juurdepääsuks kontaktidele, erinevalt kontaktori ringdiagrammist ja ostsillogrammist. See tähendab, et mõõtmised on võimalik teostada astmelüliti sektsiooni avamata ja säästes nii ressursi. Alalisvool juhitakse läbi primaarmähise läbiviikude trafosse, sh läbi astmelüliti. Mõõteseadet registreerib voolu liikumise astmelüliti töötamise ajal [27].

Olemuselt võib seda mõõtmist võrrelda astmete oomilise takistuse mõõtmisega, kuid selle erinevusega, et dünaamilise puhul toimub mõõtmine ajal, kus astmelüliti vahetab astmeid, ehk sisuliselt imiteerib see reaalselt töö olukorda väiksema koormuse all. Erinevalt astmete oomilise takistuse mõõtmisest, huvitab dünaamilise mõõtmise puhul ainult lülitusprotsess ja siis lülitatakse kõik astmed läbi kiirelt ja nii ei jõua vool stabiliseeruda. Võimsate jõutrafode mähiste kõrge induktiivsuse tõttu võib voolu stabiliseerumine võtta kaua aega. Ehk selle meetodiga ei saa täpset tulemust jõutrafo mähise oomilisest takistusest [27].

Selle väga lühikesel, üldjuhul 40-80 ms kestval lülitusprotsessil toimub seadmes mitmeid mehhaanilisi operatsioone, kus iga elemendi seisukord on tööks kriitilise tähtsusega.

Lülitusprotsessi saab kirjeldada etappidena [28] voolugraafiku abil (Joonis 3.1):



Joonis 3.1 Lülitusprotsess suunav-tüüpi astmelülitis [13][29]

<1 – Võimsusümberlüli on ahelas lülitatud punkti A. Vool on stabiilne. Astmeselektor on soovitud astmel.

Tuleb signaal astmevahetuseks (paaris astmelt paaritule). Astmeselektor liigub soovitud astmele. Koheselt järgneb esimene etapp:

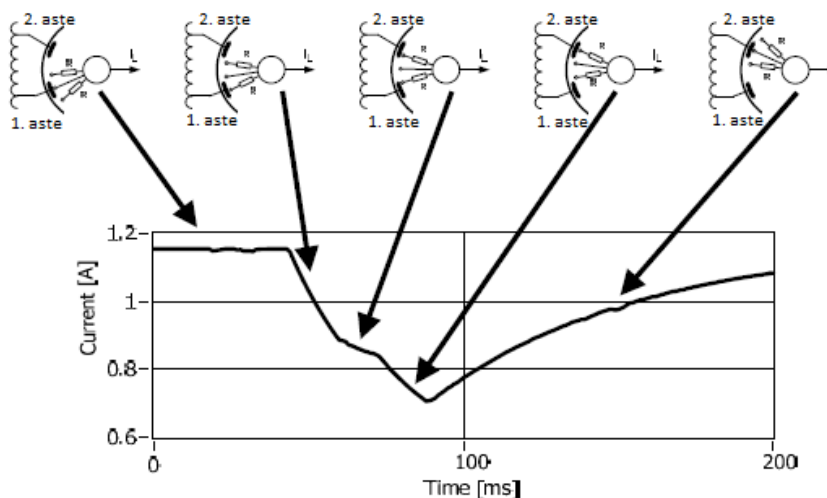
1->2 – Võimsusümberlüli liigub peakontaktilt abiahela kontaktile ja vool liigub läbi takisti R. Järjestikku ühendatud takisti eesmärk on voolu piirata. Graafikul on näha voolulangus (Joonis 3.1 - esimese ja teise etapi vahel)

2 – Võimsusümberlüli on astmeselektoriga ühendatud läbi peakontaktide A ja B abiahelate. Abiahelate takistite paralleellühendusel vool hakkab vaikselt kasvama (Joonis 3.1 - teise ja kolmanda etapi vahel)(Joonis 2.13 – väike hetkeline pingetõus).

3 – Võimsusümberlüli liigub üle peakontakti A abiahela ja kontakt sellega katkeb. Vool liigub ainult läbi peakontakti B abiahela, kus on järjestikku ühendatud takisti. Vool hakkab langema (Joonis 3.1 – kolmas etapp)

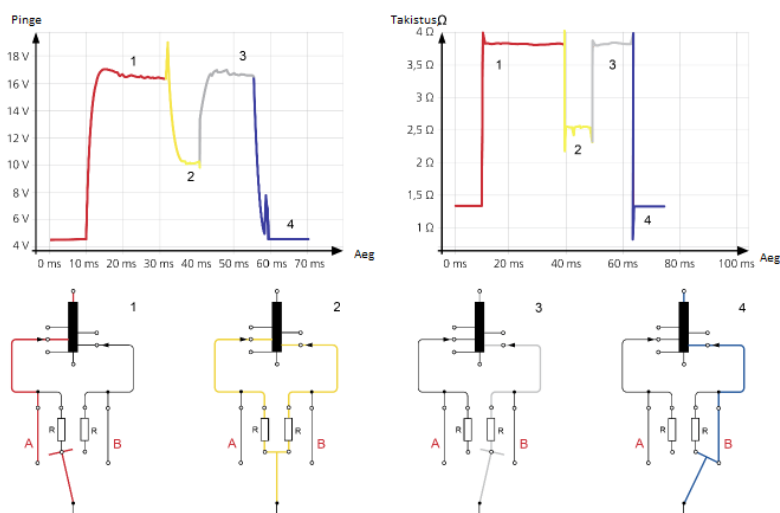
4 – Võimsusümberlüli on saavutab kontakti põhikontaktiga B. Koormus liigub eelnevalt astmeselektori poolt valitud (paaritule) astmele (Joonis 3.1 – neljas etapp).

Siinkohal on tähtis teada, et eelnevalt kirjeldatud astmelüliti tüübid - Suunav-tüüpi ja selektorüliti käituvad lülitusprotsessis graafiliselt sarnaselt [12] (Joonis 3.2).



Joonis 3.2 Lülitustükk selektor-tüüpi astmelülitis [12]

Alternatiivselt voolusignaalile saab dünaamilist muutumist hinnata pinge või takistuse kõvera järgi. Kui kasutada analüüsiks pinge kõverat peab kindlasti olema veendunud, et pinge ei katkeks pingevalika pingepiiraja tõttu. See raskendab oluliselt pingekõvera analüüsi. Lisaks pinge katkestusele pole võimalik limiteeritud pinge korral näha siirdeid (Joonisel 3.2 esimese ja teise etapi vahel). Samamoodi nagu ka voolukõvera puhul ei saa pingekõveraid otseselt võrrelda, kui mõõtmised on tehtud erinevate seadmetega [13].



Joonis 3.3 Lülitusprotsessi pingekõver ja takistuskõver [13]



Takistuskõverat (Joonis 3.3) ei saa mõõta otse, vaid see on arvutuslik voolu ja pinge mõõtmise tulemuste põhjal.

Graafikutelt saab välja lugeda kahte tüüpi põhilist infot [13]:

- 1) Amplituud – Võimsusümbertüliti abiahelate takistused põhjustavad voolu kõikumist lülitusprotsessis. Lisaks mõjutavad amplituuti ka kontaktide takistus, kontaktide liikumine, katkestused, mähise induktiivsus. Kui lülitusprotsess on isegi lühikest aega katkestatud, siis laine kõrgus ( $=I_{\max}-I_{\min}$ ) voolumuutusel tõuseb (joonis 3.1 – laine kõrgus, inglise keeles *ripple*). Samamoodi on märk isegi väiksemast katkestusest laine languse kalde suurus (joonis 3.1 – laine langus kalle  $\alpha$ , inglise keeles *slope*) [29]. Mida suurem on languse kaldenurk seda suurema tõenäosusega on tegemist katkestusega lülitusprotsessis.
- 2) Ajastus – Erinevused ajas võivad viidata mehhaanilistele probleemidele, kulunud kontaktidele ja nende värelemisele (inglise keeles *contact bouncing*). Siinkohal tuleb arvestada, et teatud erinevused on lubatud vastavalt astmelüliti disainile ja mudelile.

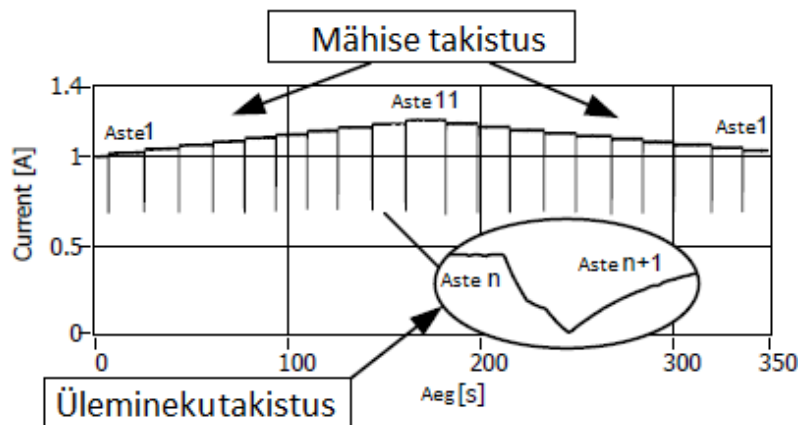
Edasises töös käsitleme peamiselt voolukõverat, sest see on kõige levinum interpreteerimisviis.

Mõõtmistulemusi analüüsides on võimalik eristada nelja põhilist astmelüliti seisukorda [12]:

- 1) Astmelüliti on heas korras (joonis 3.4).
- 2) Astmelüliti kontaktide takistus on suurenenud (joonis 3.8).
- 3) Astmelüliti kontaktid on avatud (lõpmata suur takistus) (joonis 3.9).
- 4) Astmelüliti kontaktide ajastuse probleemid (faaside sünkroniseerimine, kontakti kulumine ja ebaregulaarsed siirdeajad) (joonis 3.7).

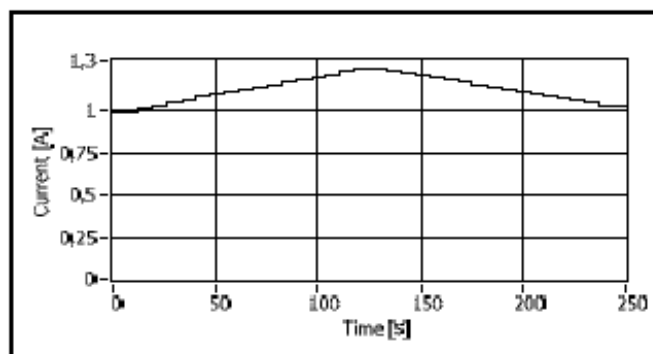
Kui astmelüliti on heas korras ja mõõdetud graafik ei näita märke defektidest või lagunemisest, saab sellelt välja lugeda kahte takistuse variatsiooni:

- 1) Abikontaktide üleminekutakistus
- 2) Mähiste oomiline takistus (Joonis 3.6)



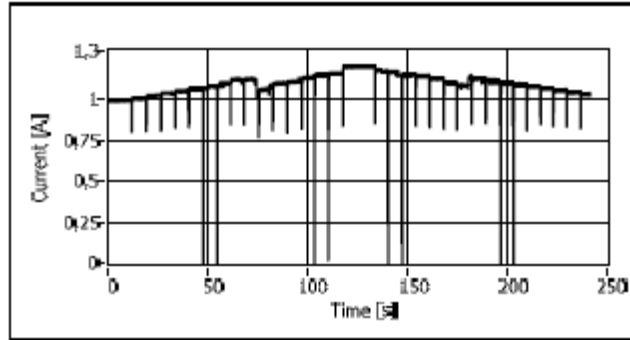
Joonis 3.4 Tüüpiline vooluliikumine heas korras astmelülitis [12].

Joonisel 3.4 on graafikul kujutatud kõiki astmeid. Konkreetselt selle töö raames kasutatud mõõteseade annab astmelüliti lülitusprotsessi kohta kaks eraldi graafikut, milles ühel on mähise oomiline takistus (joonis 3.6) ja teisel graafikul on kõikide faaside kõikide astmete üleminekutakistuse liikumine. Kasutatav mõõteseade ei võimalda kuvada kõiki astmete lülitusi järjest nagu see on teoreetilise osa graafikutel (Joonised 3.5-3.9). See ei ole takistuseks eraldi iga astme mõõtetulemuse interpreteerimisel, kuid kontaktide pikaajalise vananemise probleemi on keerulisem avastada (Joonis 3.8).



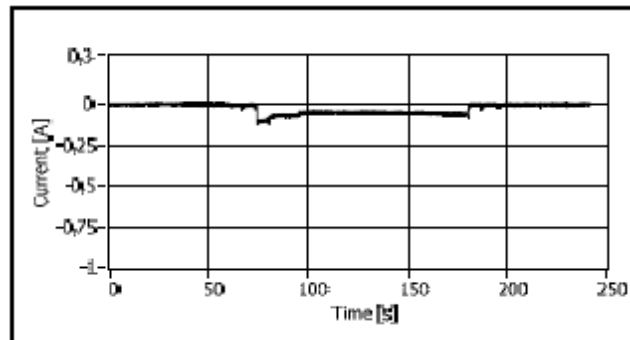
Joonis 3.6 Graafikult saab välja lugeda mähise astmete takistuse ja võimalikud mõõtevead. Graafik on ootuspärane kui astmelüliti on heas seisukorras. Samas astmelüliti defekte ja halvenenud seisukorda sellelt välja ei loe

On kasulik analüüsida iga graafiku võimalikku hälvet kohe peale mõõtmist ja enne kui jõutrafo tagasi töösse lülitatakse. Defektsed või halvenenud omadustega kontaktid või selle komponendid saab graafiku põhjal tuvastada (joonis 3.5)[12].



Joonis 3.5 Defektse astmelüliti graafik, kus on kujutatud kõiki 33 astet [12]

Esimene ebakorrapärasusele viitav defekt dünaamilise takistuse mõõtmise graafikul on suurenenud kontaktide takistus (joonis 3.8). Kuigi graafikul on see hästi nähtav, siis igakord ei pruugi viga olla tõsine. Tavaliselt on need vead põhjustatud kas ümberüliti kontaktide pikaajalise vananemise erinevast staadiumist või kaarelüliti kontaktide takistusest või ajastuse probleemidest[12].



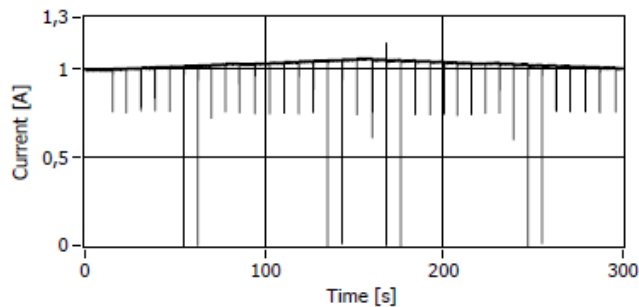
Joonis 3.8 Kontakti takistuse mõju. Kontakti takistuse pikajaline vananemise probleem[12]

Dünaamilise takistuse mõõtmise ajal mõõdetakse ümberüliti koos kaarelülitiga. Defektid astmelüliti selle mõlemas osas ilmnevad tulemustes. Näiteks ümberüliti kontaktid liiguvad paar sekundit enne kaarelüliti lülitamist. See tuleneb sellest, et ümberüliti ei tohi lülitada koormusvoolu. Astme muutus lõpeb kaarelüliti operatsiooniga, mis on graafikul hästi tuvastatav ülemineku takistite mõjuga[12].

Teine suurem ebakorrapärasusele viitav defekt tuleneb kui mõõtevool astmelüliti töös täielikult katkeb (joonis 3.9). Sellisel juhul esineb kindlasti probleeme astmelüliti töösoleku ajal. Need voolukatkestused ümberüliti töös on põhjustatud kas:

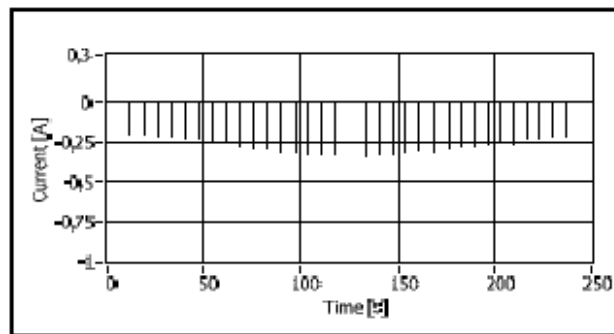
- 1) pikaajalise vananemise tulemusel. Sellele võimalikule veale viitavad varasemad mõõtmistulemused. Kontakti takistus sõltub mõõtevoolest ja -pingest. Katkestused mõõtetulemuses võivad kaduda kui mõõtevoolu tõsta.
- 2) valest kontaktide ajastusest. Sellisel juhul on katkestus sõltumatu mõõtepingest ja -voolest.

3) astmelüliti mehhaanilisest rikkest. Katkestus on sõltumatu mõõtepingest ja -voolust.



Joonis 3.9 Avatud kontakti mõju. Vool katkeb. Kontakti ajastuse probleemid [12]

Dünaamilise takituse graafikul on tuvastatav astmelüliti kaarelüliti abikontaktide takistite vead. Need vead väljenduvad ebaregulaarsetest ülemineku aegades, faasidevahelistes sünkroniseerimise ja kontaktide ajastuses (joonis 3.7).



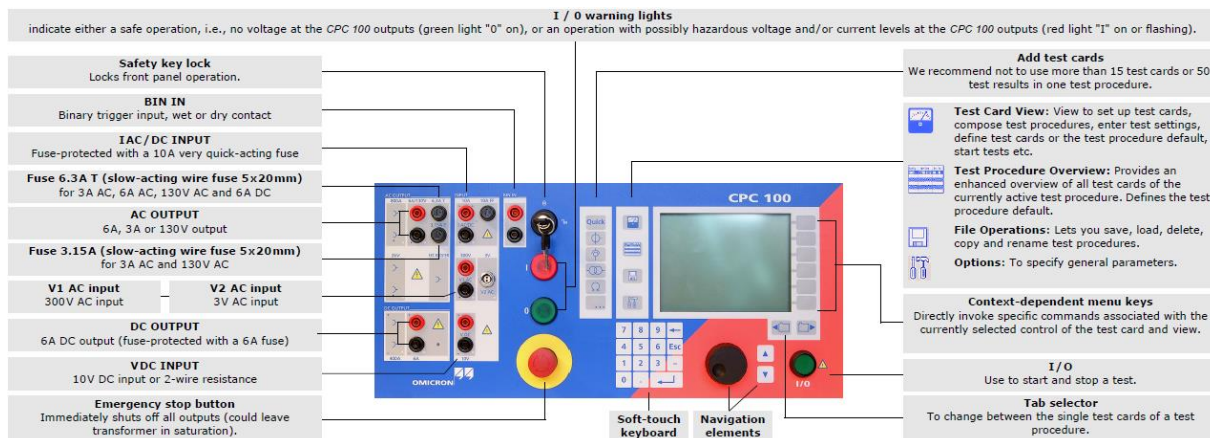
Joonis 3.7 Abikontakti takistite mõju [12]

Astme lülituse ülemineku aeg on kindlalt määratud iga operatsiooni kohta. Mehhaanilised defektid või hõõrdumised võivad põhjustada pikemaid ülemineku aegasid. See võib kiirendada kaarekontaktide kulumist, sest lülituskaar püsib kauem. Ebaregulaarsed üleminekuajad on tuvastatavad kaarelüliti töötamise ajal ja neid saab tuvastada kui võrrelda mõõtetulemusi varasemate mõõtetulemustega või vastava astmelüliti tüübi standartsete aegadega.

## 3.2. Mõõteseadme ja -metoodika tutvustus

Käesolevas töös on mõõtmisteks kasutatud testimisseadet Omicron CPC 100 koos lisaseadmega Omicron SB CP1.

Omicron CPC 100 on multifunktsionaalne testseade alajaama seadmete elektriliste parameetrite mõõtmiseks seadmeteesmasel kasutuselevõtul või ka hilisema hoolduse raames. Sellega saab teostada erinevad voolu-, pinge- ja jõutrafoode kontrollmõõtmised. Lisaks kasutatakse seda ka primaar- ja sekundaarkaitsereleede testimiseks. Kõiki teste teostatakse ja parameetreid seadistatakse sisse ehitatud arvuti juhtpaneeli kaudu, mis on esitatud Joonisel 3.10 [30].



Joonis 3.10 Omicron CPC 100 juhtpaneel [30]



Joonis 3.11 Omicron CPC kõrgepingeväljundid [30]

Omicron CP SB1 on CPC 100 lisaseade, mis võimaldab trafo mõõtmisel teha mõõteskeemis automaatseid ümberlülitusi (Joonis 3.12). See teeb kogu protsessi mugavaks ja kiireks, sest puudub vajadus pidevalt mõõtejühtmeid ümber tõsta. Seadet kontrollitakse läbi põhiseadme CPC 100, kuhu salvestatakse ka kõik mõõtmistulemused. Testimise ajal juhitakse jõutrafo astmelülitit potentsiaalivabade relekontaktide abil. Selle lülitukasti abil saab mõõta mähise takistust (vooluga kuni 6 amprit) ja kolmefaasilise jõutrafo ülekannet (väljundpinge on piiratud kuni 300 volti) [29].

Turvalisuse huvides ja info edastamiseks on seadmes akustiline signaaliallikas, mis katkendliku tooniga annab märku, kui toimub mõõtekoormuse mahalaadimine. Topelt piiks annab märku kui korrektne ühendus on loodud. Pikema katkendliku intervalliga helisignaali tähendab tarkvara uuendust [29].

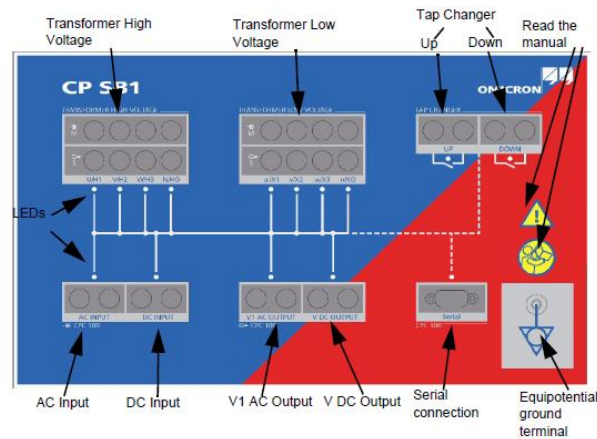
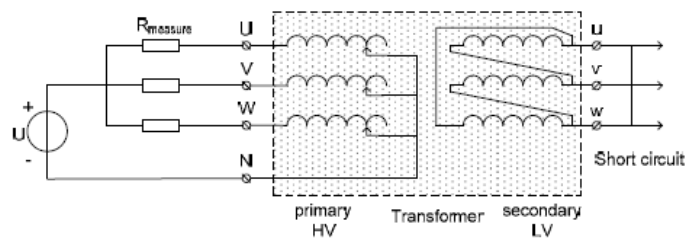


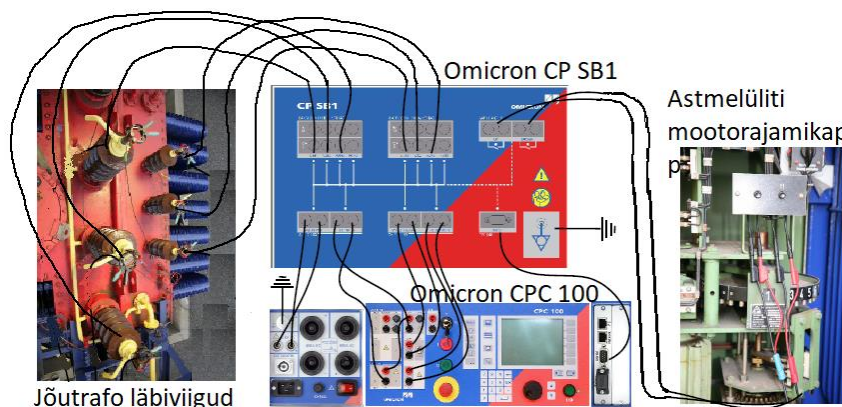
Figure 1-2 Front panel

Joonis 3.12 Omicron CP SB1 esipaneel [29]

Mõõtmiseks ühendatakse mõõteseadet jõutrafo vastavalt jõutrafo lülitusgrupile. Lülitusgrupp valitakse ka mõõtmisätetes, sest vastavalt valikule teeb CP SB1 automaatselt ümberlülitused mõõtmiseks. Arvestades, et enamus jõutrafo on primaarmähise poolel ühise neutraaliga, võib põhimõttelist mõõteskeemi näha Joonisel 3.7. Iga faas mõõdetakse eraldi lülitades läbi kõik astmed üles ja alla. Seejärel toimub mõõteseadme poolt automaatne faasi vahetus ja tsükkel kordub.



Joonis 3.13 Jõutrafo astmelüliti dünaamilise takistuse mõõtmise mõõteskeem [12]



Joonis 3.14 Mõõteseadmete ühendus mõõdetava trafoga [29]

Mõõtmisel juhitakse trafosse alalisvool ja mõõdetakse pinget ja voolu samal ajal kui lülitatakse läbi kõik jõutrafo astmed. Koormuse all reguleeritava astmelüliti põhiline funktsioon on lülitada ühelt astmelt teisele nii, et ei tekiks voolu katkestust. Seda saab dünaamilise takistuse mõõtemetodiga otseselt kontrollida.

Võrreldes näiteks võimsuslülitiga, on astmelülitiga jõutrafo takistus ja induktiivsus palju suurem just mähiste tõttu. Näiteks jõutrafo mähiste takistus võib olla  $500 \text{ m}\Omega$ , samas võimsuslülitiga oma  $100 \text{ }\mu\Omega$ . Peab arvestama, et dünaamilise takistuse mõõtmise puhul mõjutab mõõtmistulemusi mähiste induktiivsus, sest vool ei jõua stabiliseeruda [13].

Astmete oomilise takistuse mõõtmisel on eelistatud madalam vool kuni paar amprit, eriti ülepinge mähise poolel mõõtmisel. Alampinge mähise väiksema takistuse tõttu on soovitatud kasutada mõõtmisel 10-20 A, kuid mitte rohkem kui 15 % nominaalsest töövoolest. Suuremad voolud võivad mähiseid soojendada. Kuna takistuse mõõtmine on sõltuv temperatuurist, siis võivad tulemused olla ebatäpsed. Üldiselt kehtivad need reeglid ka dünaamilise takistuse mõõtmise puhul [13].

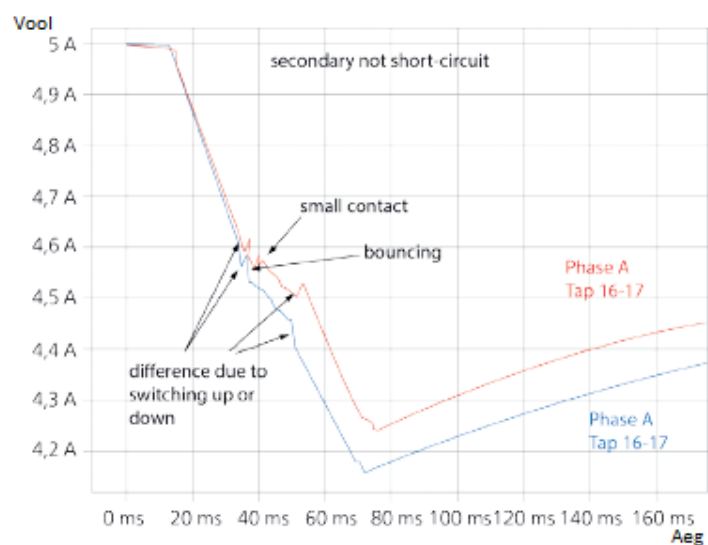
Mõõtmisvoolud vahemikus 1 A – 3 A on tundlikud kontakti hüppele (inglise keeles *bouncing*), mis võib viia tulemuste valele tõlgendamiseni. See üsna tavaline efekt on märk võimalikest õlijääkidest kontaktidel ja seda ei peeta tõsiseks probleemiks, kui astmelüliti töötab normaalse koormuse all. Teisalt, mõõtevool 1 A -3 A võib viidata pikaajalisele vananemise efektile, näiteks söestumine varajases staadiumis. Kindla ja usutava tulemuse saamiseks peaks teostama lisa analüüse ja seadet täiendavalt uurima [13].

Mõõtevool vahemikus 3 A – 5 A on piisav, et saavutada stabiilne mõõtetulemus lülitusprotsessis. Nendel juhtudel ei mõjuta tulemust väiksemad katkestused, mis on

põhjustatud näiteks õlijääkidest kontaktidel. Erinevad katsed ei näidanud erinevusi tulemustes kui suurendada mõõtevoolu 10 A või 15 A peale [13].

Lisaks õige mõõtevoolu valimisele on tähtis lühistada trafo sekundaarmähis. See annab kaks positiivset efekti. Esiteks, kui vool katkeb astmelüliti lülitamise ajal, siis südamikule talletunud energia ei saa vabaneda ja kiire voolumuutus ei genereeri kõrget pinget vastas mähisele. Teine positiivne efekt on see, et astme vahetuse ajal muutub voolu suurus graafikul peaaegu kaks korda suuremaks. Seetõttu on meetod tundlikum, mõjutades oluliselt graafiku kõveraid [13].

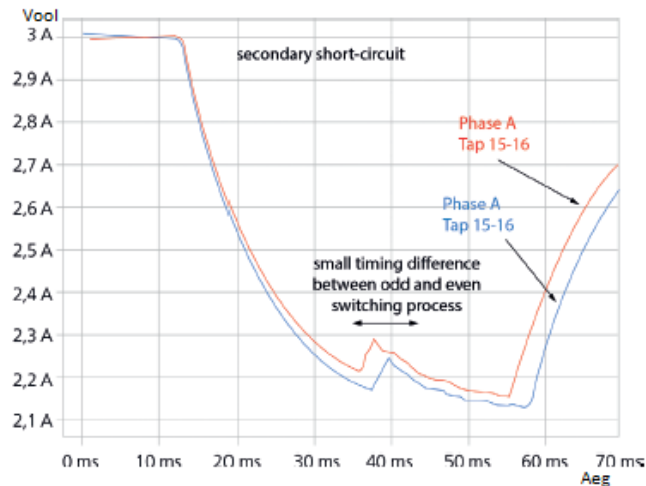
Kui analüüsida ja võrrelda erinevate astmete mõõtetulemusi, tuleb jälgida kas graafikud erinevad üles või alla lülitumise korral. See on tähtis teada, sest osadel juhtudel mähise keerde lisatakse ahelasse või siis lahutatakse. Kui keerud lisatakse, siis peab energiaga laadima lisa induktiivsuse, kui lahutatakse siis induktiivsuse laetud energia vabaneb. See efekt on tõenäoline kui sekundaarmähis pole lühistatud (joonis 3.15)[13].



Joonis 3.15 Voolumuutuse graafik erineb kui lülitada võimsusümberlülitit vaheldumisi suunas (sekundaarmähis pole lühistatud) [13].

Mõõdetud graafikud erinevad ka paaris ja paaritu arv astmete lülitamisel sest võimsusümberlülit liigub vaheldumisi suunas (Joonis 3.16). Seda võib tavaliselt näha samade astmete erinevate lülitusaegadena. Lisaks võivad hüplikud kontaktid näha olla ainult ühes suunas lülitades [13].





Joonis 3.16 Voolumuutuse graafik erineb kui lülitada võimsusümberlülitit vaheldumisi suunas (sekundaarmähis on lühistatud)[13].

### 3.3. Mõõtmistulemuste analüüs

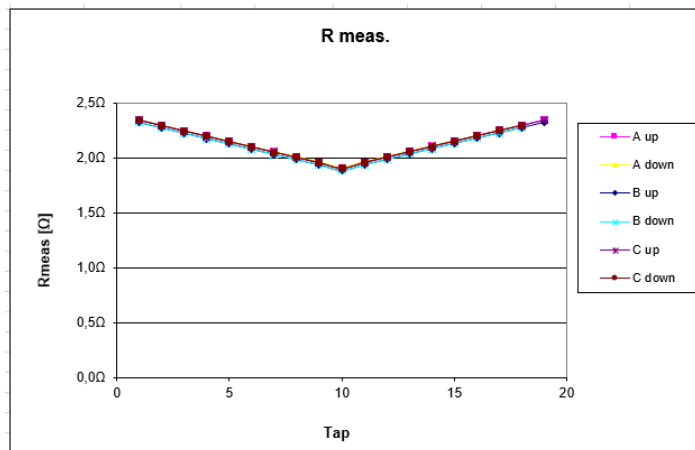
Järgnevad mõõtmised on teostatud AS Connecto Eesti kõrgepingelabori poolt, mille kollektiivi töö autor kuulub. Kõikide mõõtmise aluseks on eelnevalt kirjeldatud teooria ja seda parimal võimalikul viisil praktiseeritud. Teoreetilise osa põhjal analüüsin kolme erineva jõutrafo mõõtmistulemusi ja hindan objektiivselt astmelüliti kontaktide seisukorda vastavalt enda teadmistele.

#### 3.3.1. Mõõtmine 1 – Audru AJ, trafo C2T

Alajaam: Audru  
 Trafo tähis: C2T  
 Trafo tüüp: RNT 10000-115  
 Astmelüliti tüüp: PC-4 III 200 35/B; suunav-tüüpi (eng diverter type)

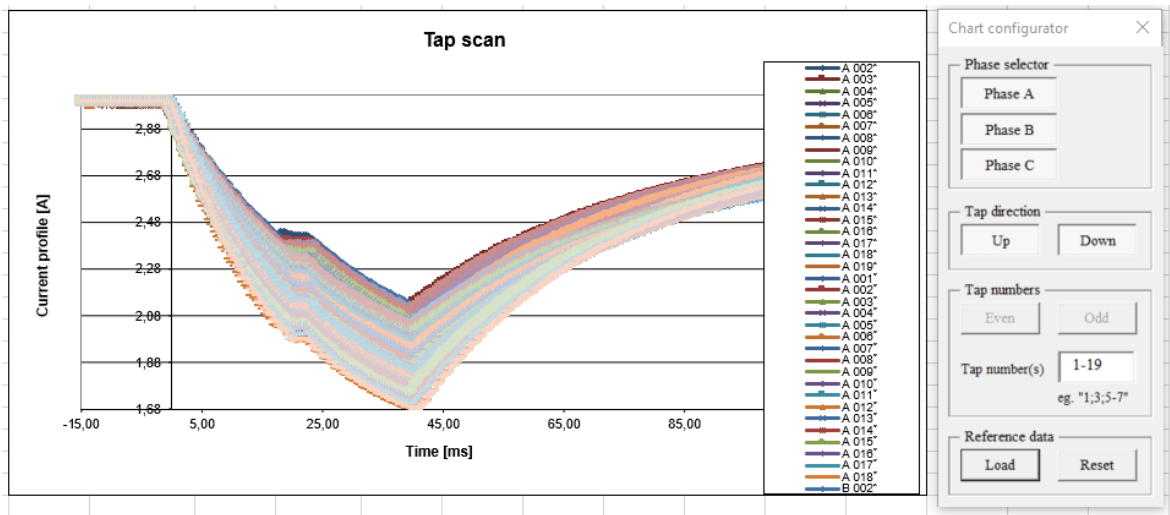
Tabel 3.1 Audru C2T mõõtmise sätted:

Range:	DC 6A	Recording time:	0,1
I test:	3,0A	Number of taps:	19
T meas.:	25,0°C	Tap start position:	Bottom
T ref.:	75,0°C	Manual wiring:	NO
Switchboxmode:	Full Operation	Autostabilization time:	10,0
Tap switching:	Auto tap operation	Autotolerance:	0,002
Recording mode:	Omicron	Topologies:	YN



Joonis 3.17 Audru C2T astmete mõõdetud oomiline takistus [26]

Astmete oomilise takistuse graafiku järgi (Joonis 3.17) on jõutrafo mähis korras kuid astmelüliti seisukorda hinnata ei saa. Mõõtevead saab välistada.



Joonis 3.18 Audru C2T kõigi astmete lülitusprotsess ühel graafikul [26]

Joonisel 3.18 on hästi näha, et astmelüliti töös puuduvad märgatavad defektid (Joonis 3.1 ja Joonis 3.4), mis võiks viidata mingisugusele ebakorrapärasele lülitusele. Kuigi ühel graafikul on kõigi kolme faasi ja kõikide astmete üles-alla lülitamised, on selgelt eristatavad lülitusetapid (Joonis 3.1) ja puudub otsene vajadus iga astet eraldi vaadelda. Joonisel 3.18 paremal on näha Omicroni mõõteseadme tarkvara valikvõimalus iga faasi (inglise keeles *phase selector*) ja astet, kas liikumissuuna (inglise keeles *tap direction*) või paaris-paaritu astme (inglise keeles *tap numbers – even or odd*) järgi eraldi vaadata.

### Järeldus:

Lülitusprotsessi graafikute põhjal võib väita, et tegemist on heas korras astmelüliti kontaktidega. Lülitusprotsess on korrektne, katkestusi ja muid defekte ei esine. Võimalusel võiks tulemust võrrelda eelneva referents mõõtmisega.

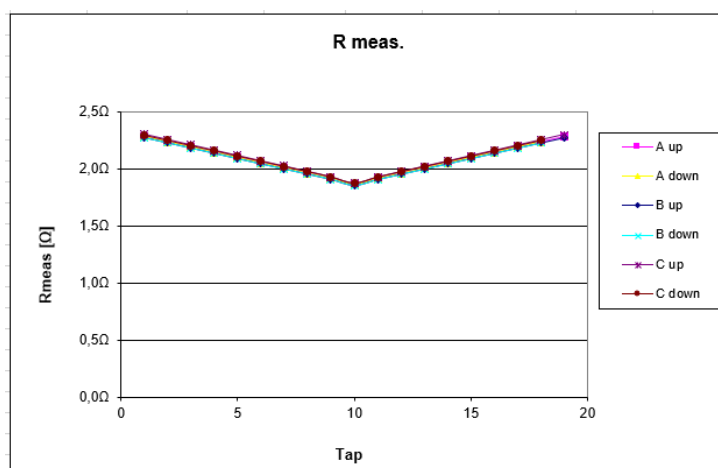
### 3.3.2. Mõõtmine 2 – Haapsalu AJ, trafo C1T

Alajaam: Haapsalu  
Trafo tähis: C1T  
Trafo tüüp: TDTN-1600/110-76  
Astmelüliti tüüp: PC-4 III 200 35/B; suunav-tüüpi (eng diverter type)

Tabel 3.2 Haapsalu C1T mõõtmise sätted:

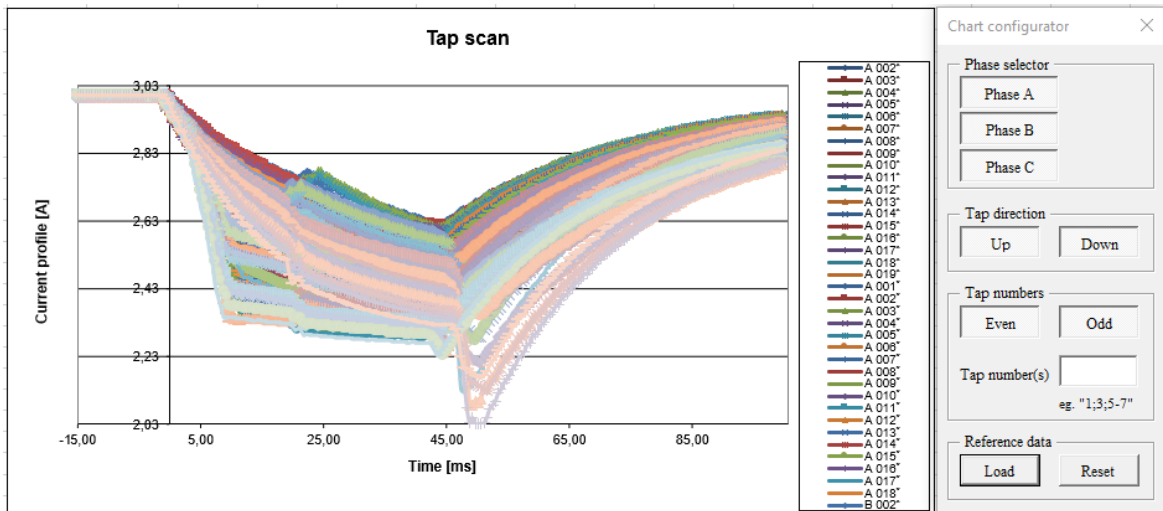
Range:	DC 6A	Recording time:	0,1
I test:	2,0A	Number of taps:	19
T meas.:	20,0°C	Tap start position:	Bottom
T ref.:	75,0°C	Manual wiring:	NO
Switchboxmode:	Full Operation	Autostabilization time:	10,0
Tap switching:	Auto tap operation	Autotolerance:	0,002
Recording mode:	Omicron	Topologies:	YN

Selle trafo puhul teostati ka astmelüliti ostsillogramm, mille tulemusi saab kõrvutada dünaamilise takistuse mõõtmiste tulemustega. Teoorias peaks need mõõtmised tulemusi täpsustama.



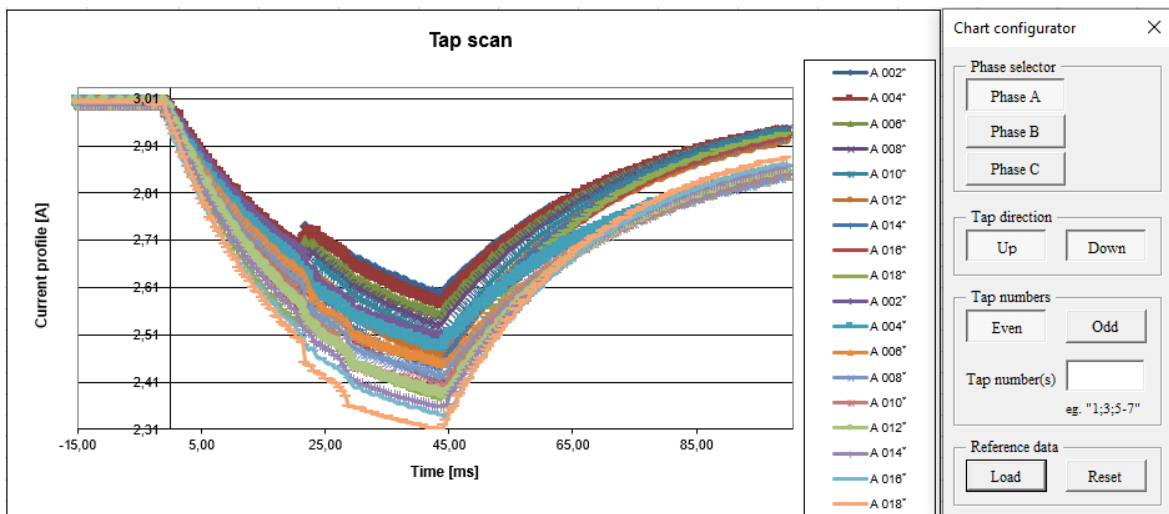
Joonis 3.19 Haapsalu C1T astmete mõõdetud oomiline takistus [26]

Astmete oomilise takistuse graafiku (Joonis 3.19) järgi tundub jõutrafo mähis ja astmete staatiline ehk oomiline takistus korras, kuid astmelüliti seisukorda hinnata ei saa. Mõõtevead saab välistada.



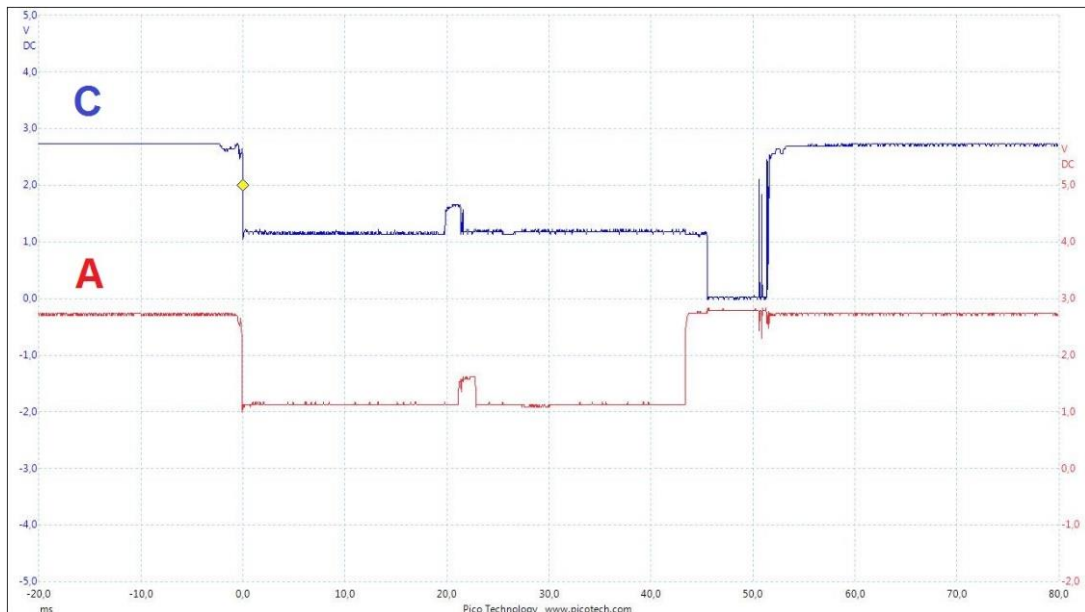
Joonis 3.20 Haapsalu C1T kõigi astmete lülitusprotsess [26]

Joonis 3.20 graafikult on näha, et kõik faasid ei lülitu ühtemoodi. Selgelt on eristatav liiga järsk voolulangus, mis võib viidata kontaktide katkestusele. Järsku langust on näha mitmes lülitusetapis – nii esimese kui ka kolmandas (Joonis 3.1). Kindlasti on mõistlik vaadata iga faasi eraldi ja tulenevalt astmelüliti tüübist – suunav tüüp, tuleks iga faasi lülitamisi omakorda uurida eraldi paaris ja paaritu astme järgi.



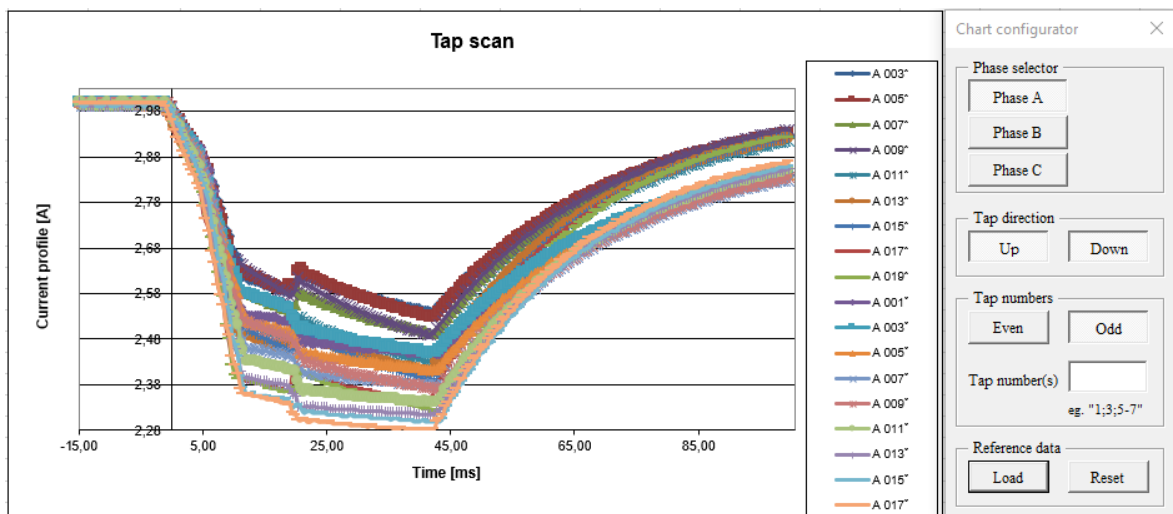
Joonis 3.21 Haapsalu C1T A-faasi paaris astmete lülitusprotsess [26]

Haapsalu C1T A-faasi paaris kontaktide lülitusgraafikult (Joonis 3.21) on näha, et lülitusprotsessis on näha väikest värelemist kuid minu hinnangul tõsisemad probleemid puuduvad. Vaatame võrdluseks ostsillogrammi tulemust (Joonis 3.22).



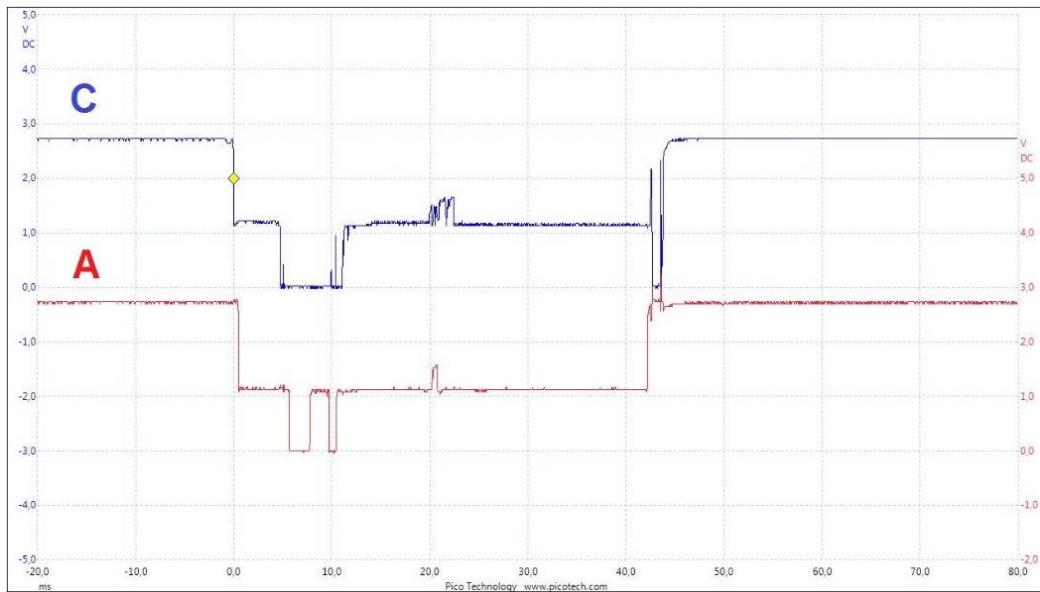
Joonis 3.22 Haapsalu C1T A ja C faasi lülitusprotsessi ostsillogramm [26]

Ostsillogramm (Joonis 3.22) kinnitab dünaamilise takistuse mõõtetulemuse A-faasi paaris astmetele lülitamisel kontaktide head seisukorda. Voolukatkestus puudub

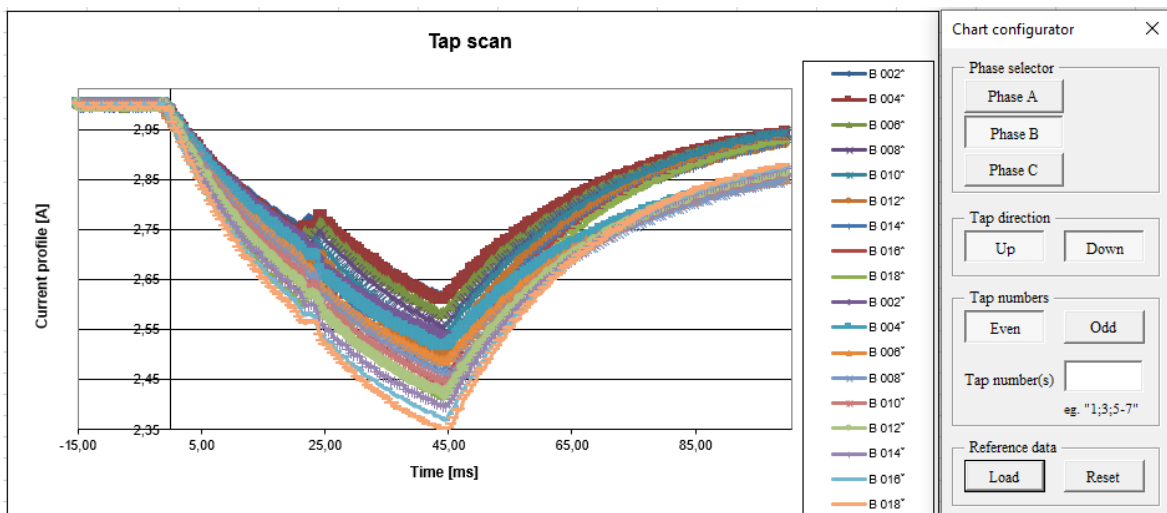


Joonis 3.23 Haapsalu C1T A-faasi paaritute astmete lülitusprotsess [26]

Joonisel 3.23 A-faasi paaritute astmete lülitusgraafikul on näha lülituse esimese etapi (Joonis 3.1) keskosas järsku voolulangust, mis päris katkestuseni ei jõua, sest see on ainult hetkeline (paar millisekundit). Ostsillogrammi (Joonis 3.24) kinnitab, et katkestus on olemas. Katkestus lülituse esimeses etapis viitab vigasele abikontaktile (Joonis 3.1).

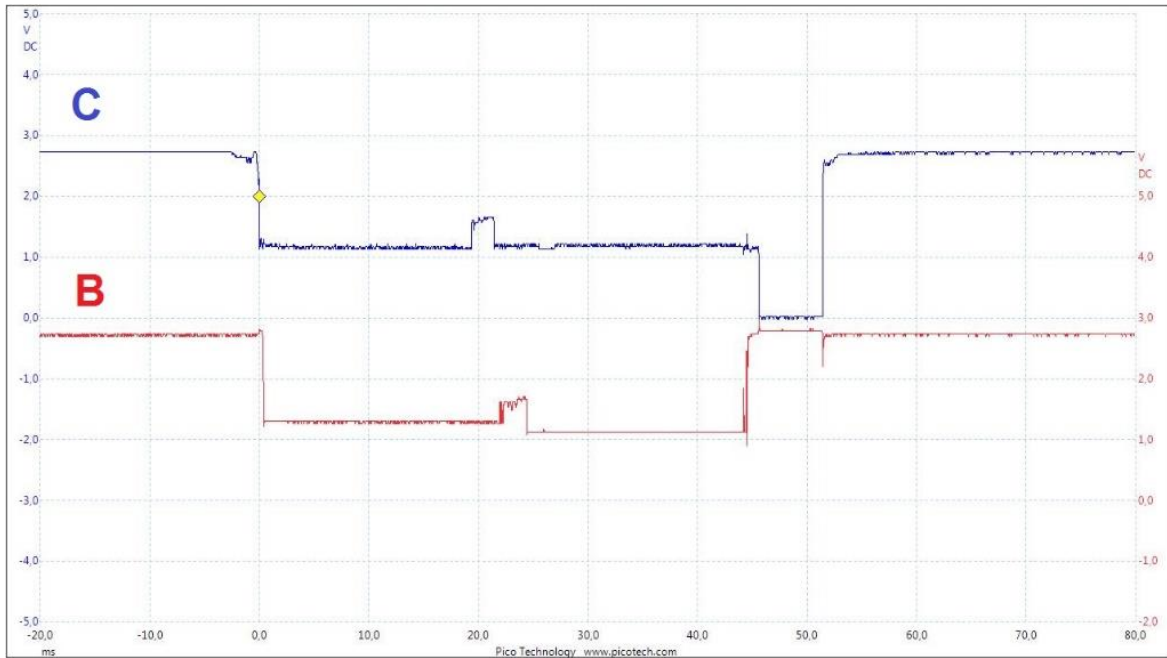


Joonis 3.24 Haapsalu C1T A ja C faasi paaritute astmete ostsillogramm [26]

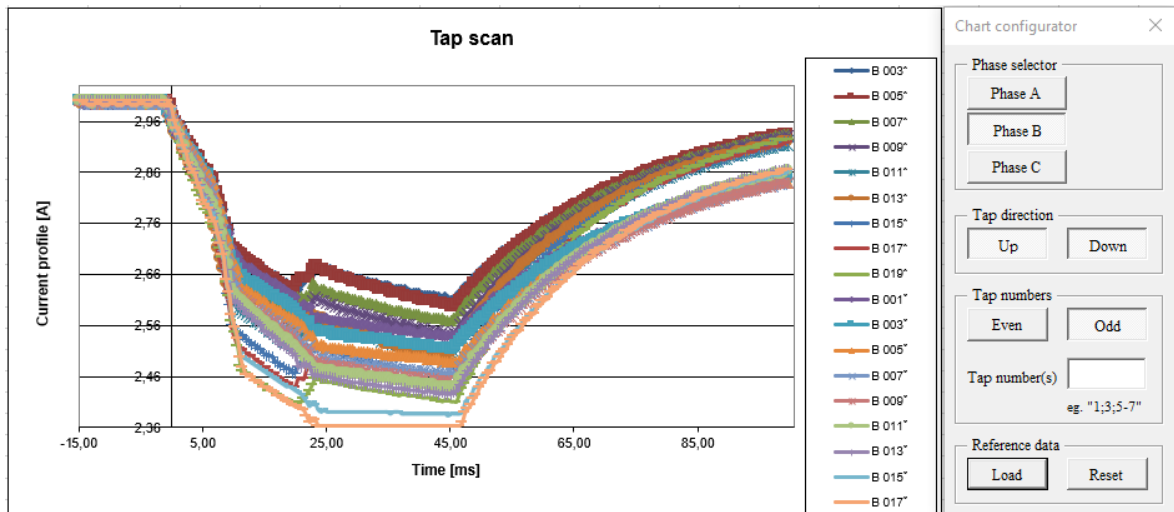


Joonis 3.25 Haapsalu C1T B-faasi paaris astmete lülitusprotsess [26]

Sarnaselt A-faasile on B-faasi paaris astmete kontaktide lülitusprotsess samuti korrektne. Puuduvad märgatavad defektid. Ostsillogramm (Joonis 3.26) kinnitab seda.

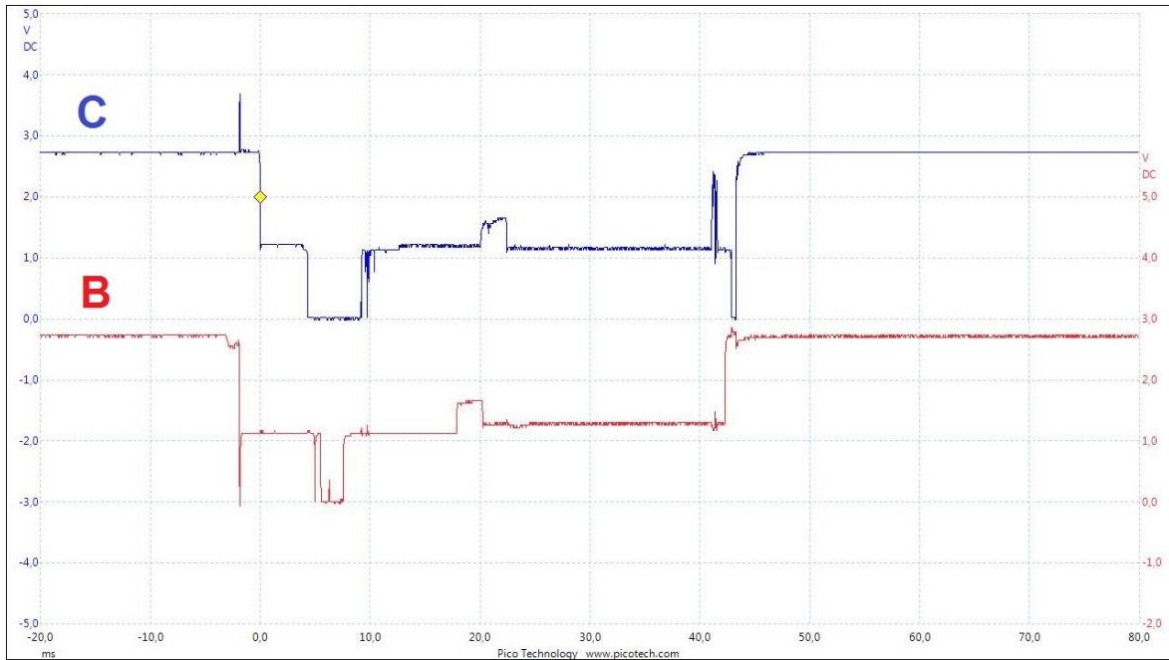


Joonis 3.26 Haapsalu C1T C ja B faasi paaris astmete lülitusprotsessi ostsillogramm [26]

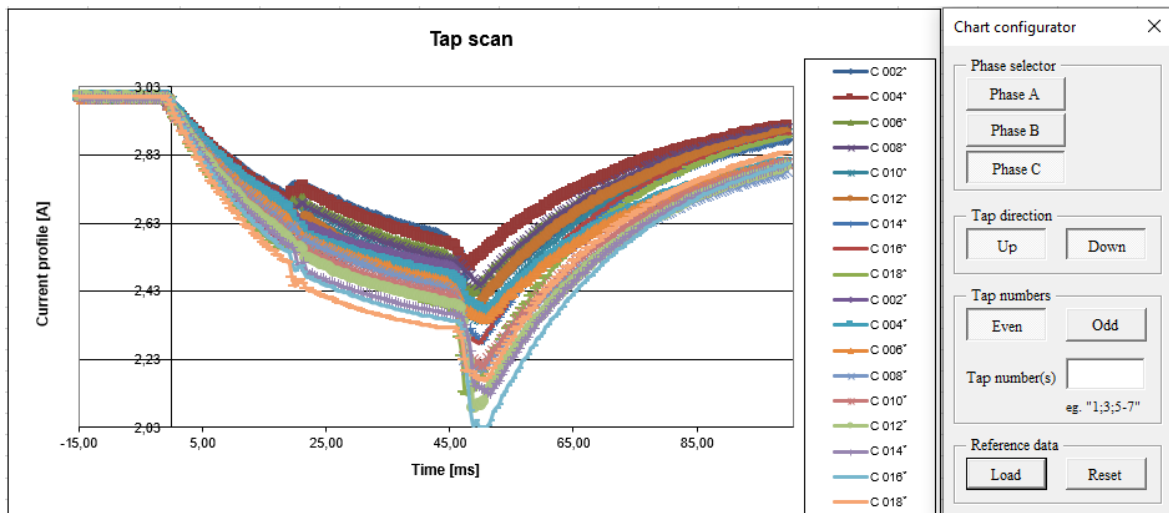


Joonis 3.27 Haapsalu C1T B-faasi paaritute astmete lülitusprotsess [26]

Joonisel 3.27 B-faasi paaritute astmete lülitusgraafikul on näha lülituse esimese etapi (Joonis 3.1) keskosas järsku voolulangust, mis päris katkestuseni ei jõua sest see on ainult hetkeline (paar millisekundit). Ostsillogrammi (Joonis 3.28) kinnitab, et katkestus on olemas. Katkestus lülituse esimeses etapis viitab vigasele abikontaktile.



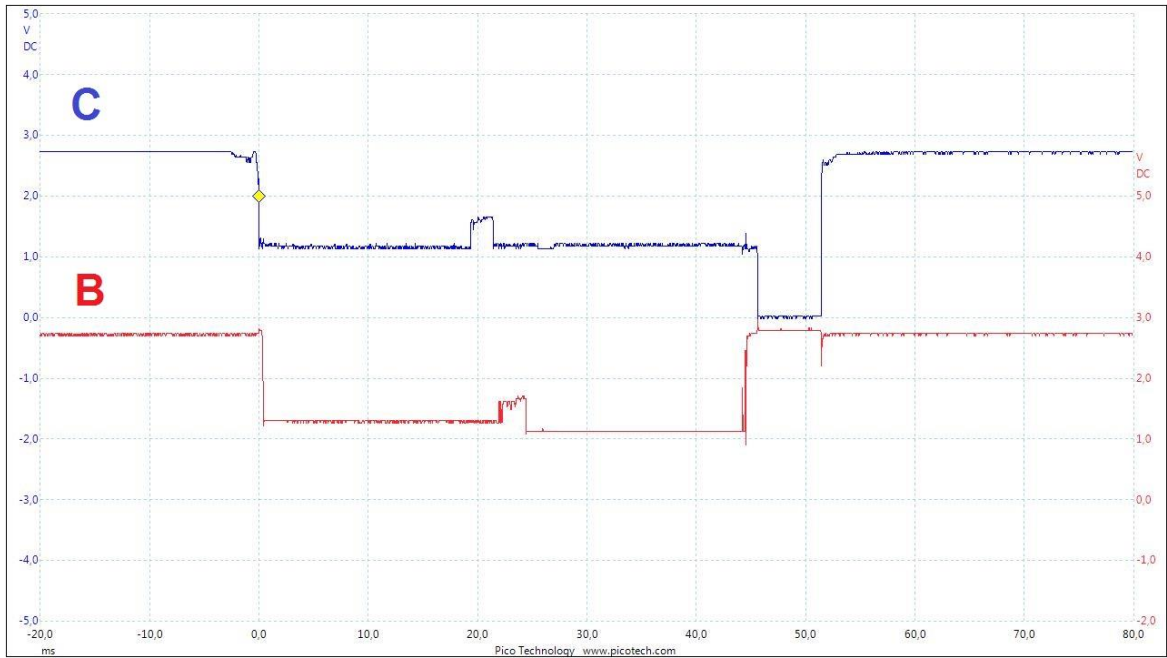
Joonis 3.28 Haapsalu C1T C ja B faasi paaritute astmete lülitusprotsessi ostsillogramm [26]



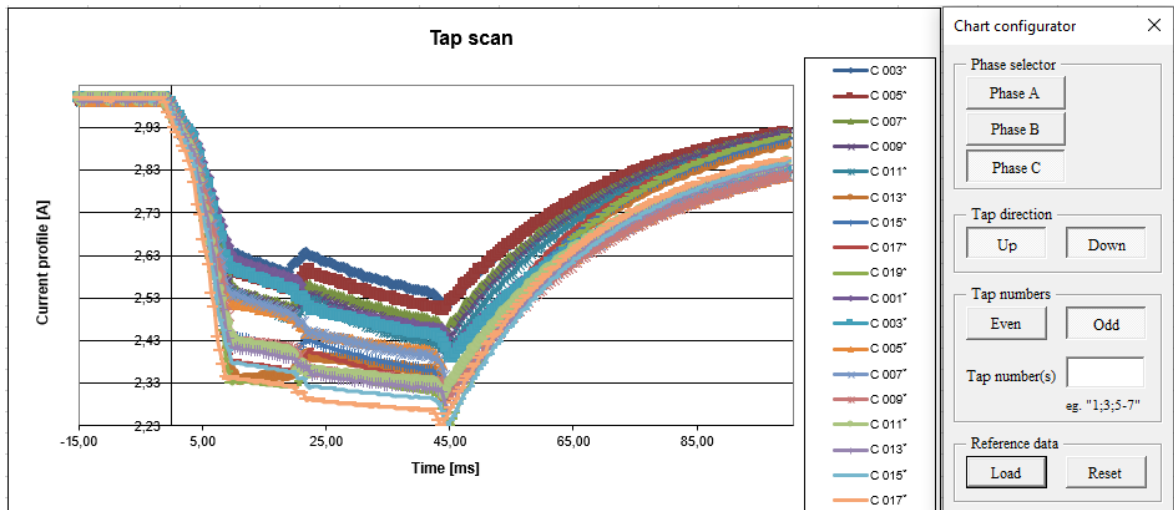
Joonis 3.29 Haapsalu C1T C-faasi paaris astmete lülitusprotsess [26]

Joonisel 3.28 on näha ebakorrektsed lülitusprotsessi. Kolmanda lülitusetapi lõpus või neljanda alguses (Joonis 3.1) on näha järsku voolulangust. Graafiku põhjal kestab katkestus ainult mõni millisekundi. Teades, et dünaamilise takistuse mõõtmisel mähise induktiivuse tõttu vool ei lange hetkega, siis nii lühikesel katkestusel vool ei jõua täiesti nulli langeda. Kuid katkestus on näha ostsilogrammil (Joonis 3.30).



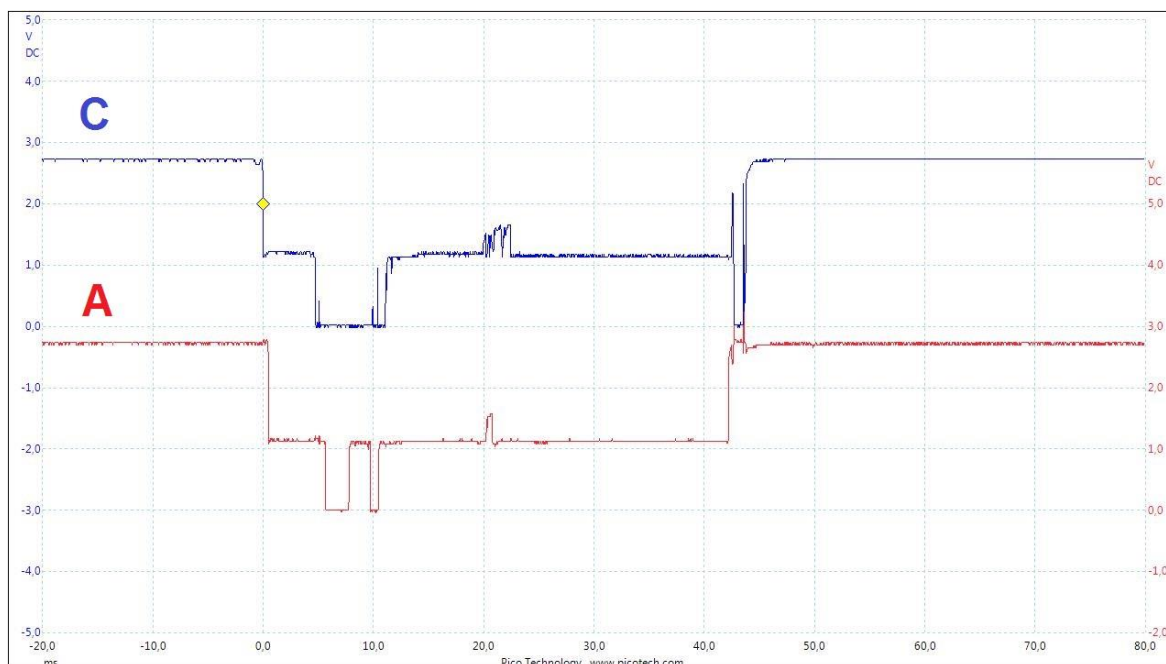


Joonis 3.30 Haapsalu C1T C ja B faasi paaris astmete lülitusprotsessi ostsillogramm [26]



Joonis 3.31 Haapsalu C1T C-faasi paaritute astmete lülitusprotsess [26]

Sarnaselt A ja B faasi paaritute astmete lülitusprotsessis on näha C-faasis katkestus esimeses etapis. Seda kinnitab ka ostsillogramm (Joonis 3.32)



Joonis 3.32 Haapsalu C1T C ja B faasi paaris astmete lülitusprotsessi ostsillogramm [26]

### Järeldus:

Kui võrrelda Audru C2T ja Haapsalu C1T sama tüüpi astmelülite mõõtetulemusi, siis on näha erinevusi lülitusprotsessis. Haapsalu astmelüliti kontaktides esineb katkestusi, mis on tuvastatavad dünaamilise takistuse mõõtmise teel. Neid katkestusi kinnitab ostsillogramm. Täpseima hinnangu andmiseks tuleks võimalusel mõõtmistulemusi võrrelda varasemate mõõtetulemustega.

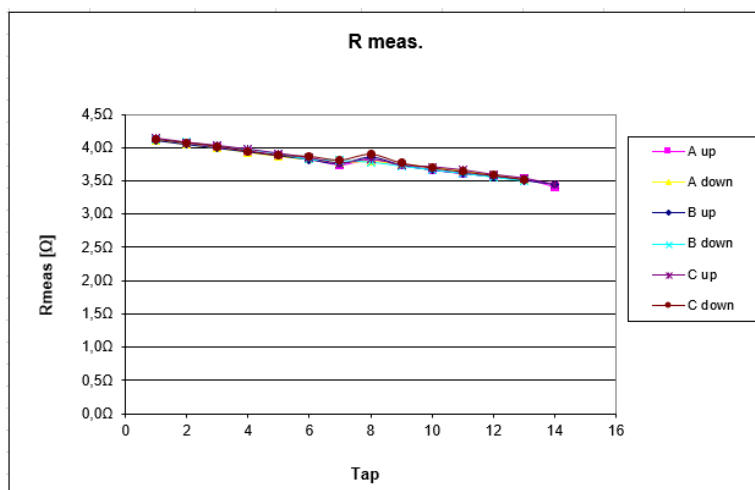
### 3.3.3. Mõõtmine 3 – Koeru AJ, trafo T1T

Alajaam: Koeru  
 Trafo tähis: T1T  
 Trafo tüüp: TMN-2500/35  
 Astmelüliti tüüp: RNTA-35/320, valik tüüpi (*eng selector type*), ümberlülitiga

Tabel 3.3 Koeru T1T mõõtmise sätted:

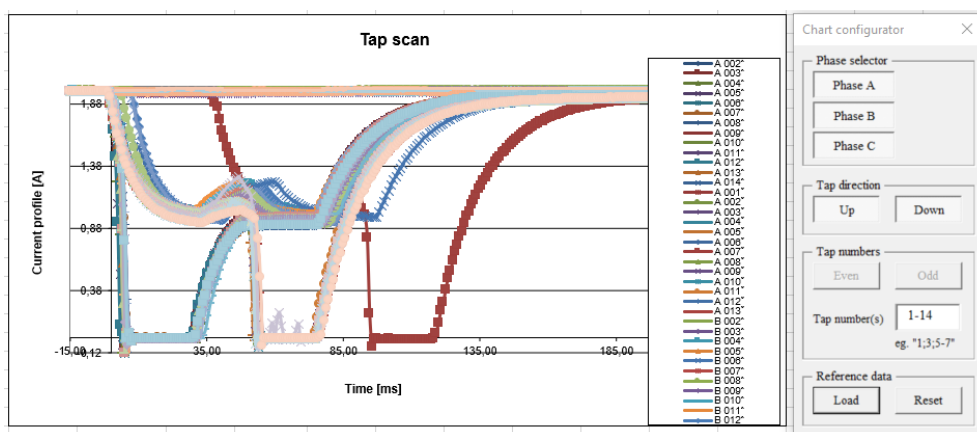
Range:	DC 6A	Recording time:	0,2
I test:	2,0A	Number of taps:	14
T meas.:	10,0°C	Tap start position:	Bottom
T ref.:	75,0°C	Manual wiring:	NO
Switchboxmode:	Full Operation	Autostabilization time:	10,0
Tap switching:	Auto tap operation	Autotolerance:	0,002
Recording mode:	Omicron	Topologies:	Y

Kuna trafo mähis on tähtühenduses, siis mõõdeti järgnevalt: faas A (mõõdeti A-B), faas B (mõõdeti B-C), faas C (mõõdeti A-C).



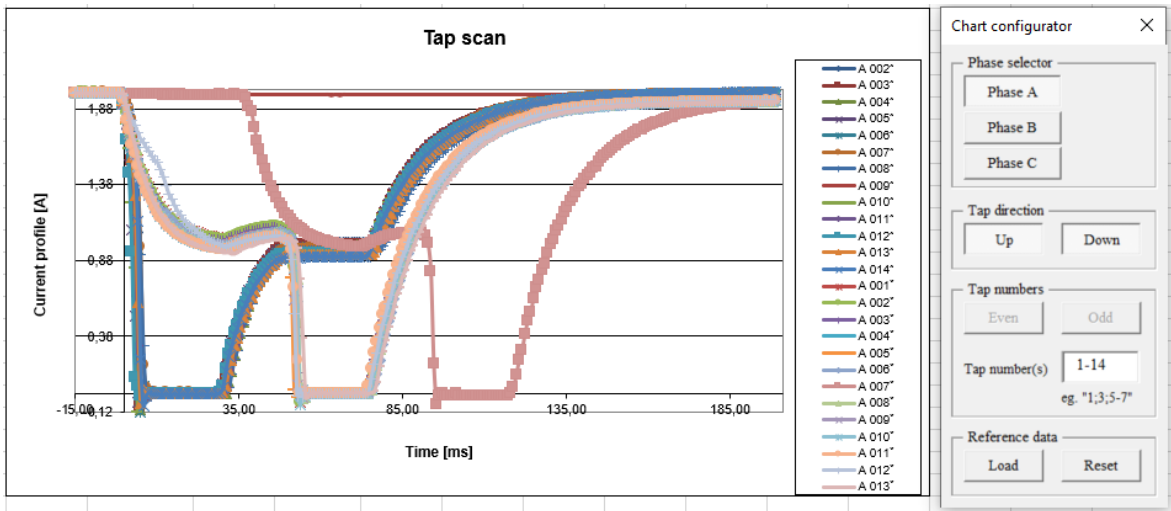
Joonis 3.33 Koeru T1T astmete mõõdetud takistus [26]

Joonisel 3.33 on näha astmete oomiline takistus ja selle järgi tundub jõutrafo mähis ja astmete staatiline ehk oomiline takistus korras, kuid astmelüliti seisukorda hinnata ei saa. Mõõtevead saab välistada.



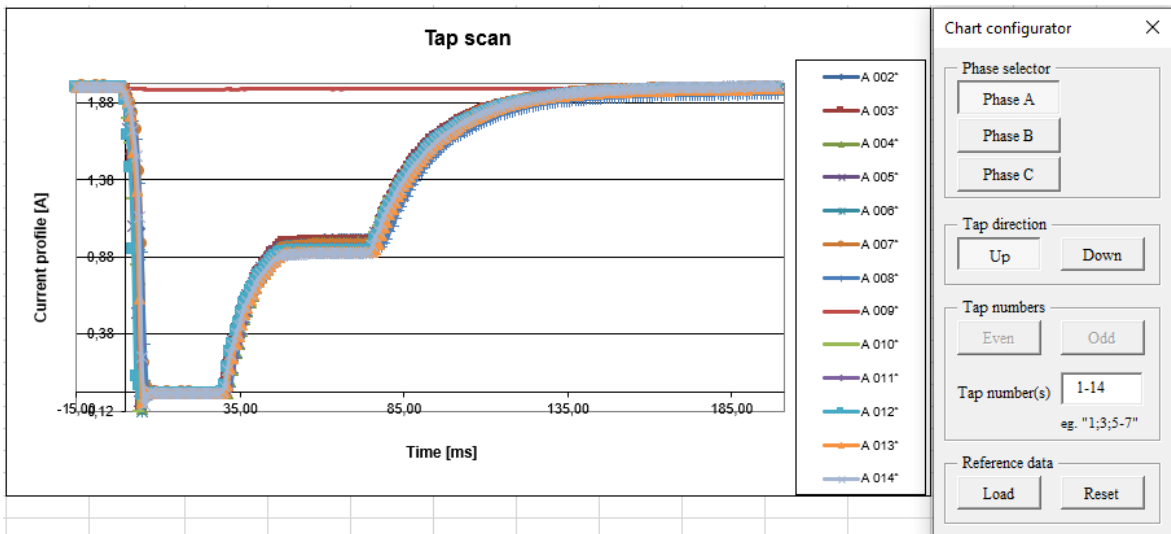
Joonis 3.34 Koeru T1T astmelüliti graafikul on kuvatud kõigi 14 astme ja kolme faasi lülitusprotsess [26]

Graafikul (Joonis 3.34) on selgelt näha ebakorrapärane lülitus. Tuvastatav on järsk volulangus, mis viitab katkestusele. Lisaks ei lülitu faasid sünkroonis, mis viitab peakontakti ebaloomulikule või abiahela takistuse puudulikule tööle.



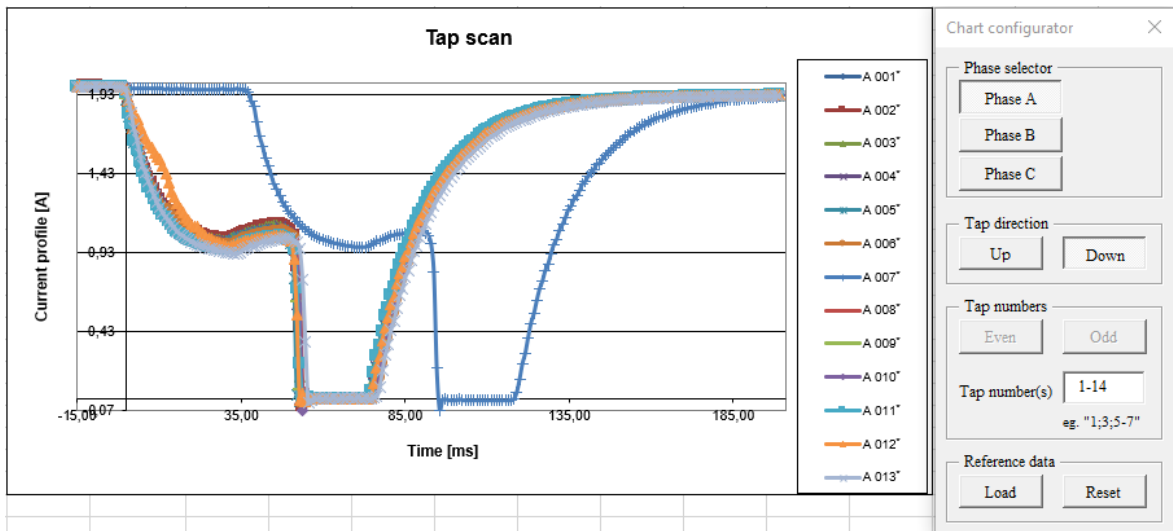
Joonis 3.35 Koeru T1T A faas (möödeti A-B) [26]

Ebakorrapärane lülitus on näha A-faasis (Joonis 3.35). Arvestades selektor-tüüpi astmelüliti tööpõhimõtet tuleks täpsemaks vea lokaliseerimiseks vaadata eraldi üles ja alla astmete liikumist. Nende suundade eraldi vaatlus annab palju kasulikku infot ja on võimalik tuvastada kas viga on peakontaktis või abikontaktis.



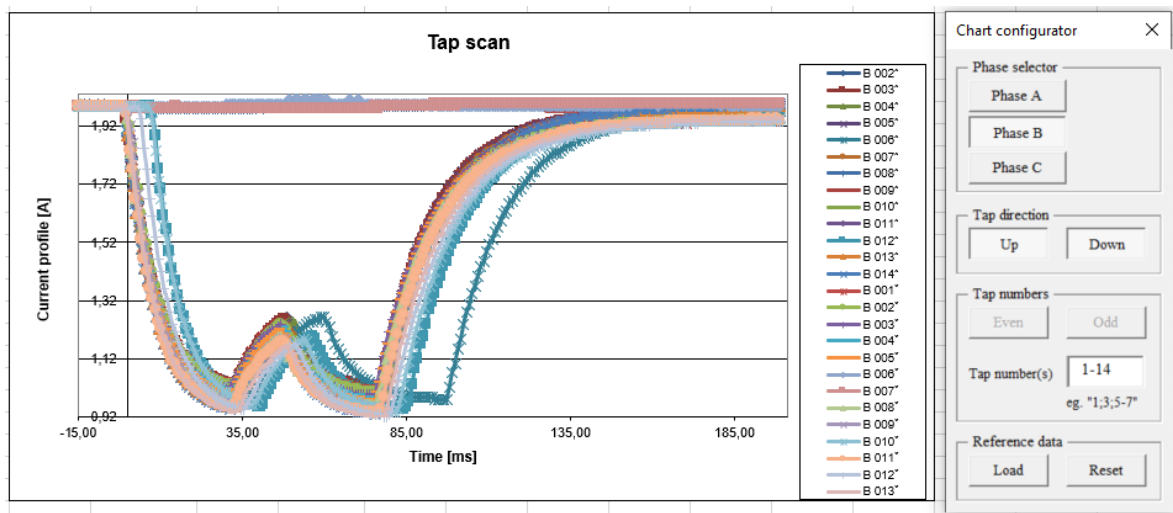
Joonis 3.36 Koeru T1T A faas astmed üles lülitades [26]

Joonise 3.36 graafikult nähtub, et kui lülitada astmeid üles, siis tekib koheselt volukatkestus. Arvatavasti põhjustab katkestuse peakontaktist paremal pool asuv takistiga abikontakt. Paremale poolele viitab astmelüliti astmete asetus – päripäeva astmed kasvavad (näha Lisa 1. Koeru T1T astmelüliti skeem).



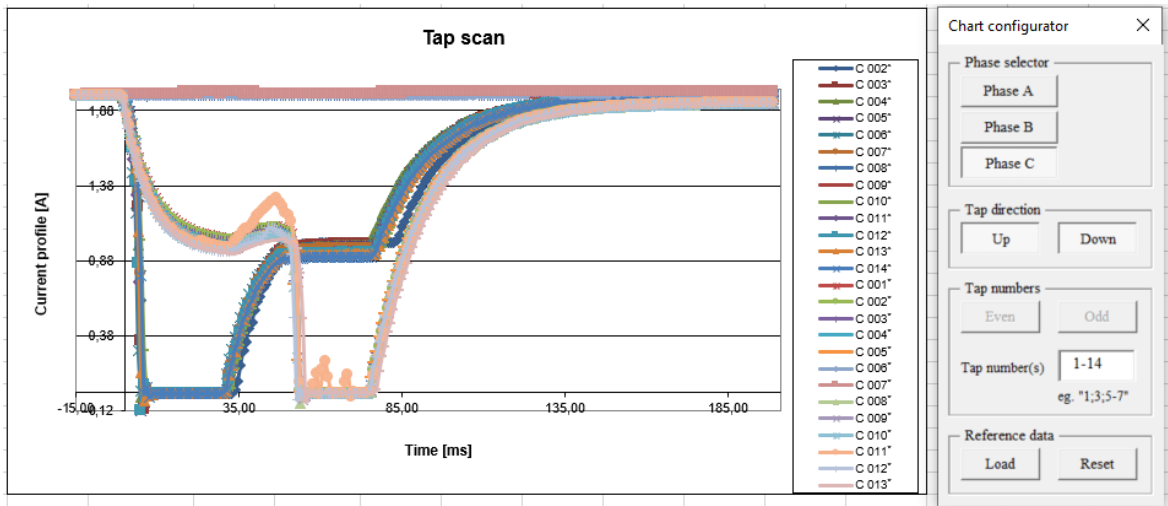
Joonis 3.37 Koeru T1T A faas astmed alla lülitades [26]

Joonisel 3.37 on näha, et lülituse esimene pool on normaalne. Kuna alla lülitamisel lülitub esimesena peakontaktist vasakul pool asuv abikontakt, siis võib selle lugeda terveks. Katkestus tekib kui lülituma peab parempoolne abikontakt. Sellest jäeldub, et katki või vigastatud on parempoolne abikontakt.



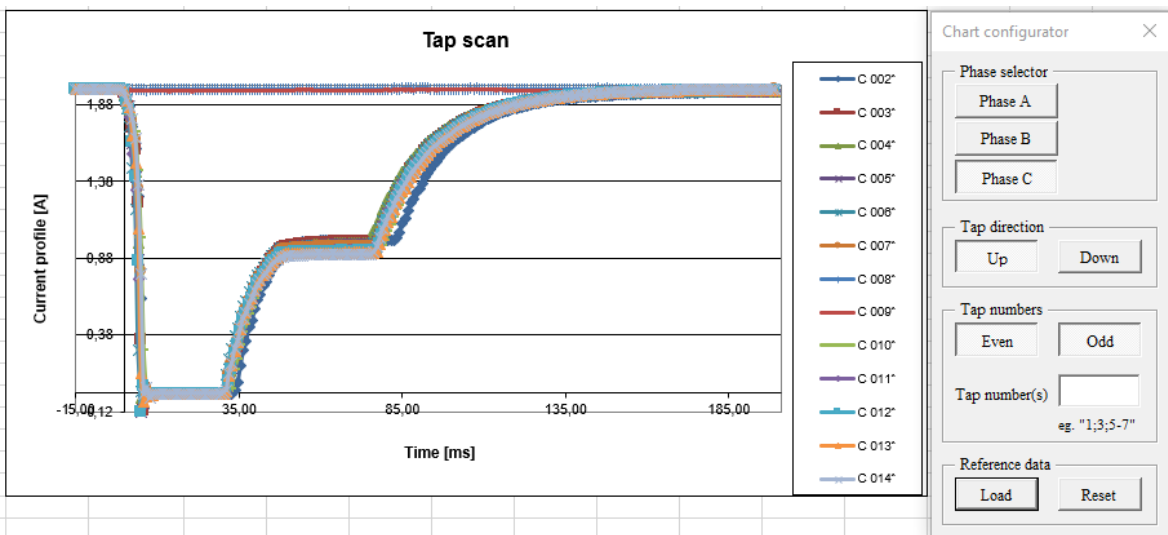
Joonis 3.38 Koeru T1T B faas (möödeti B-C) [26]

Kõigist kolmest faasist lülitub B-faas märgatavalt paremini (Joonis 3.38). On näha hästi eristavaid ja selgeid korrektseid lülitusetappe. Stabiilselt muutumatu vooluga astmed (7-9) on seda tüüpi astmelüliti eripära. Seda põhjustab astmelüliti ümberlülitu töö.



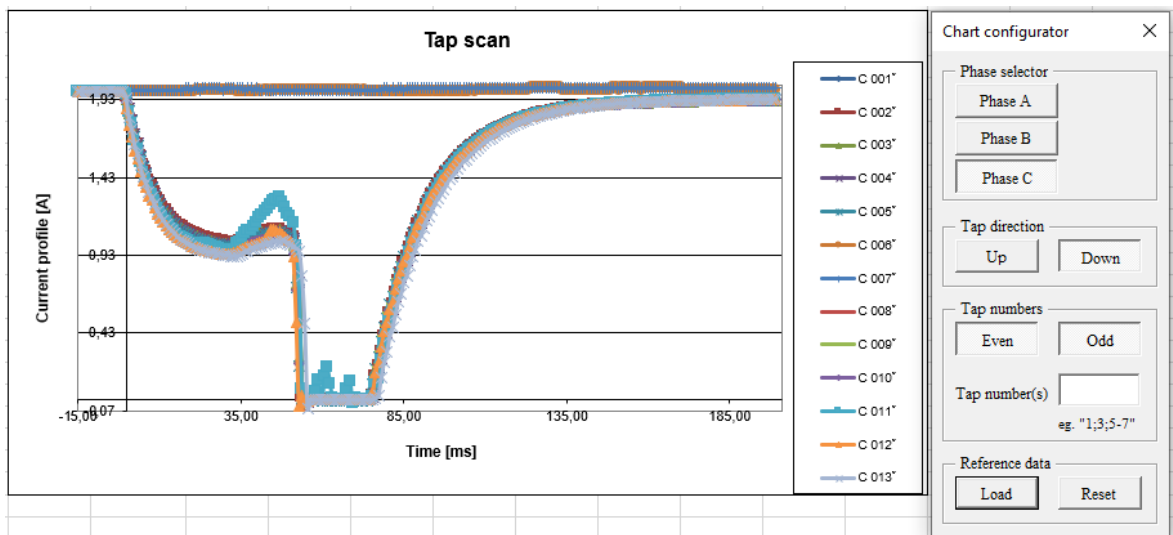
Joonis 3.39 Koeru T1T C faas (mõõdeti A-C) lülitusprotsess [26]

Ootuspäraselt ebaloomulikku lülitusprotsessi on näha ka Joonisel 3.39. Ootuspärane on see sellepärast, et mõõtes trafot tähtühenduses peab ilmema viga kahes faasis.



Joonis 3.40 Koeru T1T C faas üles lülitades [26]

Joonisel 3.40 näha, et kui lülitada astmeid üles, siis tekib koheselt volukatkestus. Arvatavasti põhjustab katkestuse peakontaktist paremal pool asuv takistiga abikontakt. Paremale poolele viitab astmelüliti astmete asetis – päripäeva astmed kasvavad (näha Lisa 1. Koeru T1T astmelüliti skeem).



Joonis 3.41 Koeru T1T C faas alla lülitades [26]

Sarnaselt joonise 3. graafikule on Joonise 3.41 graafikul näha, et lülituse esimene pool on normaalne. Kuna alla lülitamisel lülitub esimesena peakontaktist vasakul pool asuv abikontakt, siis võib selle lugeda terveks. Katkestus tekib kui lülituma peab parempoolne abikontakt. Sellest järeldub, et katki või vigastatud on parempoolne abikontakt.

### Järeldus:

Mõõtetulemustest selgub, et tegemist on kas kontakti või takisti veaga A-faasis. Sellele viitab pidev katkestus kui astmelüliti lülitub kindlale kontaktipaarile. Veale A faasis viitab mõõteskeem: Kuna trafo mähis on tähtühenduses, siis mõõdeti järgnevalt: faas A (mõõdeti A-B), faas B (mõõdeti B-C), faas C (mõõdeti A-C). Graafikult on selgelt näha, et B faas on võrreldes teiste faasidega paremas korras ja kui mõõdeti läbi A-faasi, siis esines volukatkestus.

Graafikute põhjal tehtud järeldusi kinnitab selle trafo astmelüliti sektsiooni hilisem lahtivõtmine, kus selgus, et üks astmelüliti kontakt oli tõesti murdunud (Joonis 3.42) Kuna remonti ei teostatud AS Connecto Eesti poolt, siis kahjuks täpsem info puudub.



Joonis 3.42 Koeru T1T koormusastmelüiti rootori lahtimurdunud kontakt [31]



## KOKKUVÕTE

Töö eesmärk oli tutvustada dünaamilise takistuse mõõtmise mõõtemetodit jõutrafo astmelüliti kontaktide seisukorra hindamiseks. Teema paremaks mõistmiseks tutvustati töö esimeses osas jõutrafo. Selgitati selle seadme töötamispõhimõtet ja kirjeldati, mis põhikomponentidest see koosneb ja mis on iga komponendi töö ülesanne.

Töö teises osas kirjeldati detailsemalt astmelüliti. Tutvustati põhilisi astmelüliti tüüpe ja ehitust. Lisaks tutvustati astmelüliti üldlevinud kontrollmõõtmisi.

Töö viimases kolmandikus tutvustati dünaamilise takistuse mõõtmise teoreetilist osa astmelüliti kontaktide seisukorra hindamiseks. Samuti mõõteseadet.

Viimases osas hinnati kontaktide seisukorda praktilise mõõtmiste põhjal. Praktilise osa mõõtmistulemusi analüüsidest sai selgeks, et teoreetilise osa tundmisel on astmelüliti kontaktide üldine seisukord graafiku põhjal tuvastatav. Selgelt eristatav on heas korras astmelüliti kontaktid (1. mõõtmine) ja täielik katkestus lüliti töös (3. mõõtmine).

Keerulisem on analüüsida defektset, kuid mitte täielikku katkestust põhjustavat kontakti ja selle seisukorda hinnata ainult dünaamilise takistuse mõõtemetodi abil (2. mõõtmine). Sellise seadme seisukorra kohta täpse hinnangu andmine eeldab sama seadme varasemat mõõtmist ehk nii öelda etalon mõõtmist (inglise keeles *fingerprint*) ajast kui seade oli teadaolevalt korras või teist tüüpi lisamõõtmist (2. mõõtmise puhul kontaktori ostsillogramm), mis täpsustaks dünaamilise takistuse mõõtmise tulemust.

Et tulevikus saada võimalikult täpset infot kontaktide seisukorrast ainult selle mõõtemetodiga, peaks kõikidele uutele paigaldatud seadmetele tegema koheselt kontrollmõõtmise ja hiljem seda tulemust kasutama etalonina. Hilisemate mõõtmiste võrdlusest on võimalik defektid lihtsamini tuvastada.

## SUMMARY

The aim of this thesis was to introduce a dynamic resistance measurement method for evaluating the condition of power transformer tap changer contacts. In order to better understand the topic, a power transformer was introduced in the first part of the work. The principle of operation of this device was explained and it was described what the main components it consists of and what is the function of each component.

The second part of the work describes tap changer in more detail. The main types and construction of tap changers were introduced. In addition, common control measurements of the tap changer were introduced.

In the last third of the work, the theoretical part of dynamic resistance measurement was introduced to evaluate the condition of tap-changer contacts. And also a measuring device.

In the last part, the condition of the contacts was assessed on the basis of practical measurements. Analyzing the measurement results of the practical part, it became clear that knowing the theoretical part, the general condition of the contacts of the tap changer can be identified on the basis of the graph. There is a clear distinction between the contacts of the tap-changer in good condition (measurement 1) and the complete interruption in the operation of the switch (measurement 3).

It is more difficult to analyze a contact that causes a defective but not a complete break and to assess its condition only using the dynamic resistance measurement method (measurement 2). An accurate assessment of the condition of such a device requires an earlier measurement of the same device, so to speak a reference measurement (fingerprint) from the time the device was known to be in good condition, or another type of additional measurement (contactor oscillogram for measurement 2) to specify the dynamic resistance measurement.

In order to obtain as accurate information as possible on the condition of the contacts in the future with this measurement method only, a control measurement should be performed immediately on all new equipment installed and this result should be used as a reference at a later stage. Defects can be more easily identified by comparing later measurements.

## KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] R. Võrk ja V. Mägi, *Elektrotehnika*, kolmas, täiendatud trükk. Tallinn: Valgus, 1989
- [2] P. Taklaja, „Sissejuhatus elektroenergeetikasse“ loengumaterjal, TTÜ, Tallinn, 2019.
- [3] Elering [Online]. [www.elering.ee](http://www.elering.ee) [kasutatud 04.2020].
- [4] Elektrilevi [Online]. [www.elektrilevi.ee](http://www.elektrilevi.ee) [kasutatud 04.2020].
- [5] R. Oidram ja P. Raesaar, „Alajaamad I osa“ loengumaterjal, TTÜ, Tallinn, 2013.
- [6] *Jõutrafod. Osa 1: Üldist*, EVS-EN 60076-1:2012. [Online]. [www.evs.ee](http://www.evs.ee) [kasutatud 04.2020].
- [7] R. Jansikene ja J. Joller, „Elektroonika ja jõupooljuhttehnika“ loengumaterjal, TTÜ, Tallinn, 2003.
- [8] [www.electrical-engineering-portal.com](http://www.electrical-engineering-portal.com), *Power Transformer Construction – The Core*, 2012. [Online] <https://electrical-engineering-portal.com/power-transformer-construction-core> [kasutatud 04.2020]
- [9] [www.electrical-engineering-portal.com](http://www.electrical-engineering-portal.com), *Power Transformer Construction – Windings*, 2012. [Online] <https://electrical-engineering-portal.com/power-transformer-construction-windings> [kasutatud 04.2020]
- [10] B. Kurth, „On Load Tap Changer Fundamentals“, *Life of a Transformer Seminar*, Huntington Beach California USA, 2017
- [11] J. G. Korpikiewicz ja P. Mysiak, „Classical and Solid-state Tap-changers of HV/MV regulating Transformers and their Regulators,“ *ActaEnergetica*, number 3/32, september 2017, doi: 10.12736/issn.2300-3022.2017309
- [12] J. J. Erbrink, „On-load Tap Changer Diagnosis on High-Voltage Power Transformers using Dynamic Resistance Measurements,“ [Doktoridissertatsioon], Technische Universiteit Delft, Netherlands, 2011. [Online] <http://resolver.tudelft.nl/uuid:f2ab34c0-46eb-421d-b602-bda0881a1d2f> [kasutatud 03.2020]
- [13] C. Plath ja M. Putter, „Dynamic analysis and testing of on-load tap changer; Dynamic resistance measurement“, *Transformers Magazine*, volume 3, issue 3, pp 104-109, 6. juuli 2016. [Online]. <https://transformers-magazine.com/magazine/3304-dynamic-analysis-and-testing-of-on-load-tap-changer/> [kasutatud 04.2020]
- [14] *1ZSE 5492-155 et, Rev. 4, Koormusastmelülitid, tüüp UC*, Kasutaja käsiraamat, ABB AB Components, Rootsi, 2013. [Online] <https://library.e.abb.com/public/81ed6f35d223e3a5c1257bc10030156c/1ZSE%205492-155%20et%20Rev%204.pdf> [kasutatud 04.2020]
- [15] J. Seo, „*Intelligent Condition Monitoring and Diagnosis of a Power Transformer: On-Load Tap Changer (OLTC) and Main Winding*,“ [Doktoridissertatsioon], The University of Queensland, Australia, 2019. [Online] <https://espace.library.uq.edu.au/view/UQ:1d5ecd3> [kasutatud 04.2021]

- [16] *1ZSE 5492-156 et, Rev.4, Koormusastmelülitid, tüüp UBB*, Kasutaja käsiraamat, ABB AB Components, Rootsi, 2013. [Online]  
<https://library.e.abb.com/public/670e471b13b1ed2bc1257bc1003221cc/1ZSE%205492-156%20et%20Rev%204.pdf> [kasutatud 04.2020]
- [17] *1ZSE 5492-118 en, Rev. 5, On load tap-changers, type UBB*, Installation and commissioning guide, ABB AB Components, Rootsi, 2014. [Online]  
<https://library.e.abb.com/public/6517b4587ff344bfbbf921fb3a835ea9/1ZSE%205492-118%20en%20Rev%205.pdf> [kasutatud 04.2020]
- [18] [www.electrical-engineering-portal.com](http://www.electrical-engineering-portal.com), *Voltage Regulation by Transformer Off-Load Tap Changer, On-Load Tap Changer and AVR*, 2017. [Online] <https://electrical-engineering-portal.com/transformer-voltage-regulation> [kasutatud 04.2020]
- [19] CIGRE working group A2.37, *Transformer reliability survey*. 2015. [Online]  
<https://e-cigre.org/publication/642-transformer-reliability-survey> [kasutatud 04.2020]
- [20] Anton Moltsar e-kiri 16.03.2020 8:23
- [21] L. Allard, „Presentation on OLTC diagnostics“, ABB Secheron, Euro TechCon Chester, UK, 2010.
- [22] N. Cincar ja G. Milojevic, „On-Load Tap Changer Testing Methods“ 2019. [Online]  
[https://www.dv-power.com/download/n-cincar-g-milojevic\\_on-load-tap-changer-testing-methods/](https://www.dv-power.com/download/n-cincar-g-milojevic_on-load-tap-changer-testing-methods/) [kasutatud 04.2020]
- [23] *1171 1903-4E , Dissolved gas analysis and supervision of oil condition in transformers and reactors*, Product Information, ABB AB Power Transformers, Rootsi. [Online]  
<https://library.e.abb.com/public/4e6465f22c2f401cb7ff596695381d28/Dissolved%20Gas%20Analysis%20and%20Oil%20Condition%20Testing.pdf> [kasutatud 04.2020]
- [24] F. Brikci, „Vibro-Acoustic testing applied on Tap Changers and Circuit Breakers“. [Online] <https://www.zensol.com/general-articles-about-circuit-breaker-testings/vibro-acoustic-testing/> [kasutatud 04.2020]
- [25] E. Osmanbasic ja G. Skelo, „Tap changer Condition Assessment Using Dynamic Resistance Measurement,“ *Procedia Engineering* 202 lk 52-64, 2017. [Online]  
<https://pdf.sciencedirectassets.com/> [kasutatud 18.04.2021]
- [26] AS Connecto Eesti kõrgepingelabori mõõteprotokollide arhiiv
- [27] D. B. Purohit ja D. Karvat, „Development of the Dynamic Resistance Measurement (DRM) for condition assessment of OLTC“, *International Journal of Research in Engineering and Technology*, volume 3, issue 4, pp 625-629, aprill 2014. [Online]  
[https://www.academia.edu/7552176/DEVELOPEMENT\\_OF\\_THE\\_DYNAMIC\\_RESISTANCE\\_MEASUREMENT\\_DRM\\_METHOD\\_FOR\\_CONDITION\\_ASSESSMENT\\_OF\\_OLTC](https://www.academia.edu/7552176/DEVELOPEMENT_OF_THE_DYNAMIC_RESISTANCE_MEASUREMENT_DRM_METHOD_FOR_CONDITION_ASSESSMENT_OF_OLTC) [kasutatud 03.2021]

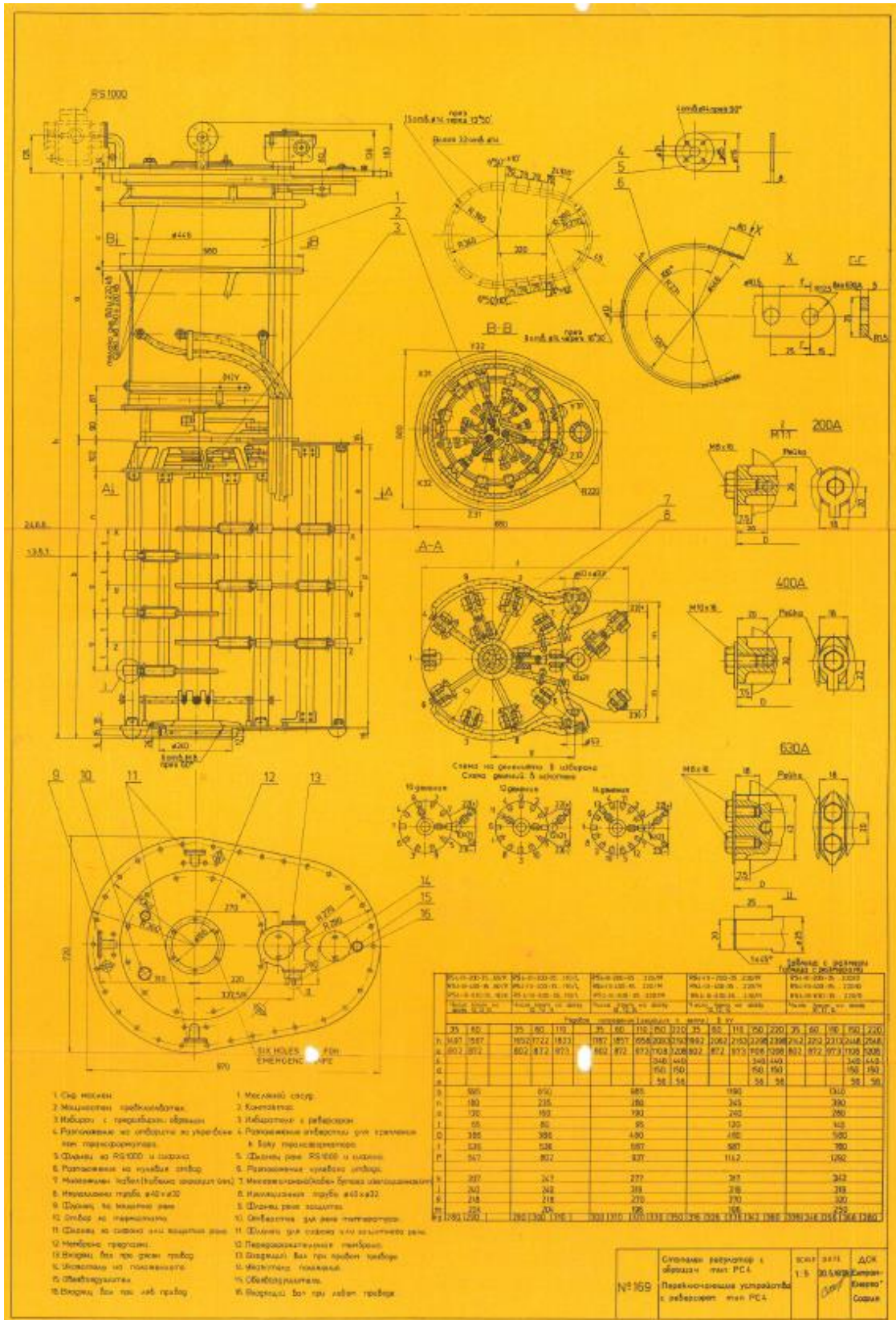
- [28] J. Hillergren ja M. Lindahl, „On Moving Contacts in On-Load Tap Changers“, [Magistritöö], Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2010. [Online] <https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/128506.pdf> [kasutatud 04.2021]
- [29] *CPSB1.AE.1, CP SB1 Transformer switch box for measuring ratio and winding resistance and testing the tap changer of power transformers*, User manual, Omicron electronics GmbH, 2009. [Online] [www.omicronenergy.com](http://www.omicronenergy.com) [kasutatud 04.2021]
- [30] *CPC100LITE.AE.5, CPC 100 User Manual*, Omicron electronics GmbH, 2007. [Online] [www.omicronenergy.com](http://www.omicronenergy.com) [kasutatud 04.2021]
- [31] Leonhard Weiss OÜ pildi arhiiv. Saadetud e-kirja teel 08.06.2018 kell 11:18

## **LISAD**

Lisa 1 astmelüliti RS4 [26]

Lisa 2 astmelüliti RNTA-35/320 skeem [26]

# LISA 1 - ASTMELÜLITI RS4



# LISA 2 – KOERU T1T ASTMELÜLITI RNTA-35/320 SKEEM

