



Timo Algvere

JÕUTRAFODE ELUEA MÄÄRATLEMINE SEIREANDMETE PÕHJAL

LÕPUTÖÖ

Tehnikainstituut

Elektritehnika

Juhendaja: Heljut Kalda, *PhD*

Tallinn 2024

Lihtlitsents lõputöö reproduutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Timo Algvere

annan Tallinna Tehnikakõrgkoolile (edaspidi kõrgkool) tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

Jõutrafode eluea määratlemine seireandmete põhjal

1) reproduutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada ja teha üldsusele kättesaadavaks Tallinna Tehnikakõrgkooli digiarhiivi DSpace kaudu;

2) reproduutseerimiseks pärast piirangu lõppu juhul, kui instituudi direktori korraldusega on kehtestatud lõputöö avaldamisele tähtajaline piirang.

Olen teadlik, et nimetatud õigused jäävad alles ka autorile ja kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid ega muid õigusi.

Autorideklaratsioon

Mina, Timo Algvere

tõendan, et lõputöö on minu kirjutatud. Töö koostamisel kasutatud teiste autorite, sh juhendaja ja iseenda varasematele teostele on viidatud õiguspäraselt.

Kõik isiklikud ja varalised autorõigused käesoleva lõputöö osas kuuluvad autorile ainuisikuliselt ning need on kaitstud autorõiguse seadusega.

(allkirjastatud digitaalselt)

Juhendaja Heljut Kalda

Töö vastab lõputööle esitatavatele nõuetele.

(allkirjastatud digitaalselt)

(kuupäevad digiaallkirjades)

SISUKORD

SISSEJUHATUS	4
1. ÕLITRAFO EHITUS JA PROTSESSID	5
1.1. Jõutrafo eesmärk ja konstruktsioon	5
1.2. Õlitrrafode kuumenemine ja jahutus	7
1.3. Õlitrafo õli tüübид ja omadused	9
1.4. Ülesande püstitus.....	10
2. GAASIANALÜÜSIDE VÕIMALUSED JA METOODIKAD	13
2.1. Trafo õli keemilised protsessid	13
2.2. Kaasaskantav lahustunud gaaside analüsaator.....	16
2.3. <i>Online</i> -tüüpi gaasianalüsaatorid	19
2.4. Trafo eluea määratlemise metoodika	20
2.4.1. Võtmegaasid.....	22
2.4.2. Gaaside juurdekasvu määr	23
2.4.3. IEEE standardi alusel gaaside kontsentratsioonid	24
2.4.4. CIGRE gaaside suhe.....	24
2.4.5. Duvali kolmnurk	25
3. JÕUTRAFO SEISUKORRA HINDAMINE	28
3.1. Hinnang <i>Online</i> tüüpi gaasianalüsaatori andmete alusel	28
3.2. Hinnang eluea indeksi alusel.....	32
3.3. Arendusvõimalused	37
KOKKUVÕTE	39
SUMMARY.....	40
VIIDATUD ALLIKAD.....	42
LISAD	43
Lisa 1. Võtmegaaside skoor	44
Lisa 2. Gaasi juurdekasvu määr	45
Lisa 3. IEEE Gaaside kontsentratsioonid	46
Lisa 4. CIGRE Gaaside suhe.....	47
Lisa 5. Duvali analüüs	48

SISSEJUHATUS

Eesti jaotusvõrk on vananenud, kuid ootused ja vajadused tõusevad seoses taastuvenergia vajaduse kasvuga. Elektrivõrgu üks tähtsaim seade on jõutrafo, mille tootjate poolne hinnanguline eluiga on 21 aastat, kui koormata seda nimivõimsuseni. Elektrilevi OÜ keskmine trafo vanus on 28 aastat, mistõttu võib eeldada trafo rikete märkimisväärset tõusu, asjaolu võimendab võrgukoormuste tõus. Lõputöös käsitletakse metoodikat, kuidas määrata jõutrafo eluiga lahustunud gaaside analüüsi põhjal.

Lõputöö eesmärk on rakendada mudel õlitrafo eluea määramiseks plaaniga tulevikus protsess automatiserida.

Lõputöö esimeses peatükis käsitletakse trafo tööpõhimõtet õlitrafo soojenemise ja jahutamise protsessi ning mineraalõlis toimuvaid füüsikalisi ja keemilisi protsesse. Käsitletakse mis on trafo soojenemise peamised põhjused ja kuidas on trafo jahutus lahendatud. Käsitletakse õlitrafo õli tüüpe, keskendutakse mineraalõlidele kuna see on kõige rohkem kasutuses olev õli trafodes. Antakse ülevaade, kuidas trafo õlis keemilised protsessid algust saavad ja kuidas neid ennetada.

Teises peatükis käsitletakse õlitrafo eluea määramise meetodeid. Tutvustatakse lahustunud gaaside analüüsi. Tutvustatakse kaasaskantavat ja *online*-tüüpi gaasianalüsaatorit ning selgitatakse mõlema eeliseid ja puudusi. Tutvustatakse õlitrafo eluea määramise metoodikat, võttes aluseks viis erinevat lahustunud gaaside analüüsimise meetodit.

Õlitrafo eluea määramise eesmärk on saada ülevaadet trafo seisukorrast ja kriitilisusest eesmärgiga ära hoida trafo rikkeid. Trafo rikkeid ei esine tihti, kuid on varustuskindluse seisukohalt tõsised ja majanduslikult kulukad, mistõttu on tähtis omada ülevaadet trafo seisukorrast.

Viimases peatükis rakendatakse metoodikat erinevate trafode peal ja antakse ülevaade protsessist, autoripoole hinnang meetodile ja räägitakse tuleviku rakendustest.

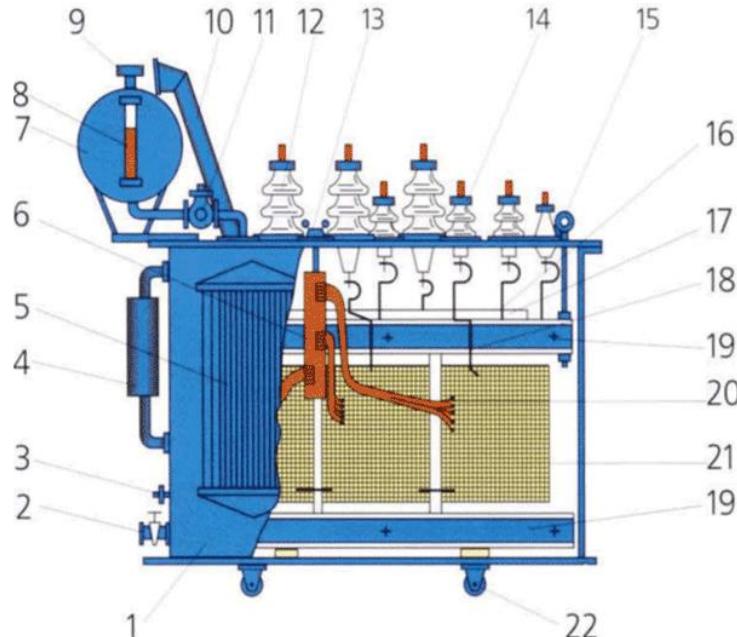
1. ŠÖLITRAFO EHITUS JA PROTSESSID

1.1. Jõutrafo eesmärk ja konstruktsioon

Trafo on elektromagnetilisel induksioonil põhinev elektriseade, mille eesmärk on elektrienergia muundamine. Trafo põhiosadeks on mähised ja südamik. Trafodes ei ole liikuvaid osi v.a jõutrafodes, kus liikuvaks osaks on astmelülit.

Jõutrafo koosneb tavaselt kahest mähisest, primaar- ja sekundaarmähisest, mis on omavahel magnetahelaga seotud. Rakendades primaarmähisele pinge, tekib magnetsüdamikus magnetväli, mis indutseerib sekundaarmähises elektromotoorjöö, mis tekitab voolu sekundaarmähises [1].

- 1 trafo paak;
- 2 õli väljalaske ventiil;
- 3 maanduspolt;
- 4 filter;
- 5 radiaator;
- 6 ümberlülit;
- 7 paisunõu;
- 8 õli koguse näitaja;
- 9 õhukuivati;
- 10 väljalasketoru;
- 11 gaasirelee;
- 12 kõrgepinge isolaator;
- 13 ümberlülit ajam;
- 14 madalpinge isolaator;
- 15 tõsteas;
- 16 madalpinge ühendusviik;
- 17 ike;
- 18 madalpinge mähise väljaviki;
- 19 ikke traavers;
- 20 kõrgepinge mähise väljaviki ümberlülitisse;
- 21 kõrgepinge mähis (tema sees on madalpinge mähis);
- 22 rullik.



Joonis 1. Trafo ehitus [2]

Põhiliselt jaotatakse trafod kahte tüüpi, õlitrafod ja kuvtrafod. Antud töös keskendutakse õlitrafodele, kuna need on kõige rohkem kasutuses olevad trafod Elektrilevi OÜ jaotusvõrgus. Jõutrafo õlipaagid on mahutid, kus hoitakse jõutrafode jahutamiseks, isoleerimiseks ja kaitsmiseks kasutatavat öli. Jõutrafo õlipaagi eesmärk on tagada öli piisav kogus, temperatuur, rõhk ja kvaliteet, et trafo saaks nõuetekohaselt toimida. Trafo õlipaak on tehtud terastest või alumiiniumist, kuna nad peavad taluma kõrget rõhku ja temperatuuri, enamasti asub konservaator (Joonis 2) jõutrafo õlipaagi küljes või selle sees. Jõutrafo õlipaagil on spetsiaalsed seadmed (Joonis 1), nagu õlitaseme näidik, õlrõhu näidik, õlitemperatuuri näidik, õlifilter, õlianalausaator, õliväljalaskeventiil, öli sissevooluventiil jne, mis võimaldavad jälgida ja kontrollida öli seisukorda ja vajadusel seda vahetada või lisada. Keskkonna ohutuse eesmärgil on trafodele alla ehitatud vannvundament, kus öli lekkimise puhul koguneb öli ja ei valgu laiali.



Joonis 2. Jõutrafo konservaator

1.2. Õlitrafode kuumenemine ja jahutus

Kuigi trafol ei ole liikuvaid osi, tekib seal ikkagi kuumenemine.

Trafo kuumenemise põhjused:

- vaseskaod ehk elektrilised kaod;
- hüstereesi- ja pöörisvoolukaod ehk teraseskaod;
- välistingimused.

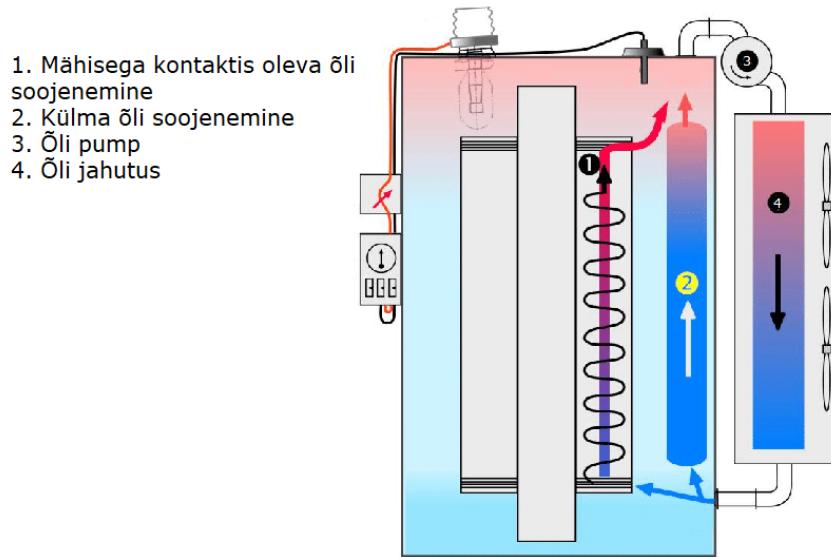
Vaseskaod sõltuvad materjali eritakistusest, voolutihedusest ja elektrilise ahela ruumalast. Vaseskadude vähendamiseks projekteeritakse trafo selliselt, et tekiks minimaalne puisteväli. Võetakse aluseks isolatsiooni lubatud temperatuuri tõus ja valitakse vastav jahutuse meetod, et saavutada tasakaalu kadude ja temperatuuri vahel. Kui eritakistus ja elektrilise ahela ruumala on muutumatud omadused, siis voolutihedus sõltub sellest kui palju on trafo koormatud [3].

Kaod magnetahelas sõltuvad magnetsüdamiku ruumalast, materjali erikadudest ja rakendatud pingest. Teraseskadude vähendamiseks on magnetsüdamik tehtud õhukestest, 0,35 kuni 0,50 mm paksusest elektrotehnilise terase lehtedest, sellega paraneb magnetiline induksioid ja vähenevad teraseskaod.

Väliskeskkonna mõju intensiivsus sõltub alajaama tüübist, üldiselt saame me jaotada alajaamu kahte tüüpi: välis- ja sisealajaamad.

Sisealajaamade temperatuuri reguleerimine käib ventilatsiooni ja klappajamite abil.

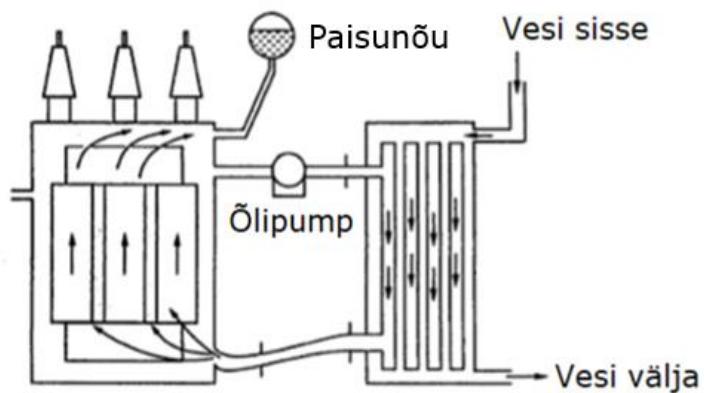
Välisalajaamades temperatuuri reguleerida ei saa, enamus Elektrilevi OÜ alajaamad on välisalajaamad.



Joonis 3. Õlitrafo konvektsioon [4]

Jõutrafo õlijahutus töötab põhimõttel, kus soojenemise tagajärjel tekib õlis konvektsioonivool (Joonis 3), soojem ja kergem õli tõuseb üles, samal ajal kui jahedam ja raskem õli vajub alla. See tekitab õlipaagis tsirkuleeriva õlivoolu, mis kannab soojuse trafo südamikust ja mähisest eemale. Konvektsiooni efektiivsuse tõstmiseks, on trafodel küljes radiaatorid.

Lisaks radiaatoritele saab lisada õli jahutamiseks ventilaatoreid või vesijahutuse. Vesijahutuse meetod (Joonis 4) on kõige tõhusam, kuid see on rahaliselt kulukam.



Joonis 4. Õlijahutuse skeem [5]

Selleks, et trafo õlil säiliks madal viskoossus ja soojuse juhtimise omadus, on tähtis, et õli oleks puhas ja gaaside sisaldus oleks minimaalne.

1.3. Õlitrafo õli tüübид ja omadused

Jõutrafo õli tüüpe on erinevaid, sõltuvalt nende koostisest ja omadustest.

Jõutrafo õli tüübidi:

- Mineraalõlid: Kõige tavalisemad on jõutrafo õli tüübidi, mis on valmistatud nafta destilleerimisel saadud parafinidest või naftaleenidest. Mineraalõlid on odavad, kergesti kättesaadavad, kõrge dielektrilise läbitavusega ja hea soojusjuhtivusega. Mineraalõlide puuduseks on nende madal tulekindlus, kõrge viskoossus ja suur niiskuse imendumine.
- Sünteetilised õlid: Valmistatud keemiliste reaktsioonide abil sünteesitud orgaanilistest ühenditest. Sünteetilised õlid on kallimad, kuid neil on paremad omadused, nagu kõrge tulekindlus, madal viskoossus, väike niiskuse imendumine ja hea oksüdatsioonikindlus.
- Biolagunevad õlid ehk looduslikud estrid: Valmistatud looduslikest taimsetest või loomsetest õlidest või rasvadest. Biolagunevad õlid on keskkonnasõbralikud, kuna nad lagunevad kiiresti ja ei reosta pinnast ega vett. Biolagunevate õlide puuduseks on nende kõrge hind, madal oksüdatsioonikindlus ja kõrge niiskuse imendumine.

Eestis jaotusvõrgus on kõige rohkem kasutuses mineraalõliga täidetud trafosid, mistõttu lõputöös keskendutakse neile.

Jõutrafo õlide puhul tuleb arvestada ka nende mõju keskkonnale, mis on pigem negatiivne. Elusorganismidele on see kergelt mürgine, mistõttu tuleb vältida kokkupuudet veega. Pinnasse sattudes kahjustab õli pinnase viljakust ja ummistab taimede juuri, mis takistab vee ja toitainete kättesaadavust.

Jõutrafo õli on oluline isolaator, jõutrafo õli takistab elektrivoolu ülelööki mähiste vahel. Selleks, et seda tagada peab trafo õlit olema:

- Kõrge dielektriline läbitavus – omadus salvestada suures hulgas elektrienergiat, ilma läbilööki tekitamata.
- Kõrge elektritakistus – takistab voolu lekkeid.
- Kõrge läbilöögitugevus – selleks, et suurtel pingetel ei tekiks elektrilist läbilööki.

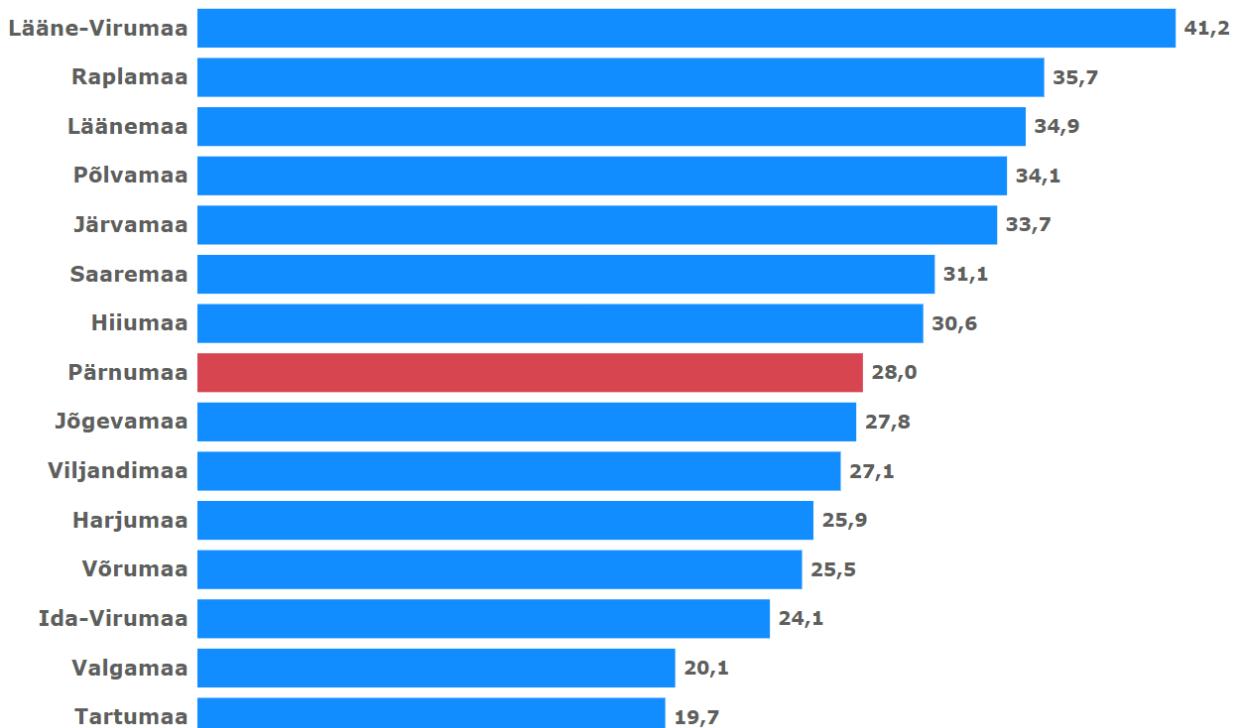
Selleks, et kõiki soovitud omadusi säilitada, peab tagama, et jõutrafo õli oleks puhas, niiskuse sisaldus oleks madal, et vältida korrosiooni ja temperatuur oleks normi piirides.

Trafo õil on kaitsefunktsioon, mis on kaitseks keskkonnamõjude ja kulumise vastu:

- Moodustab südamiku ja mähise ümber õhukese kihi, mis kaitseb niiskuse ja hapniku kokkupuute eest.
- Õli lahustab ja neutraliseerib happeid, mis annab kaitset korrosiooni eest.
- Õli vähendab hõordumist (antud kontekstis hõordumine vibratsiooni ja sarnaste mõjude tõttu) ja toimib kui määardeaine.

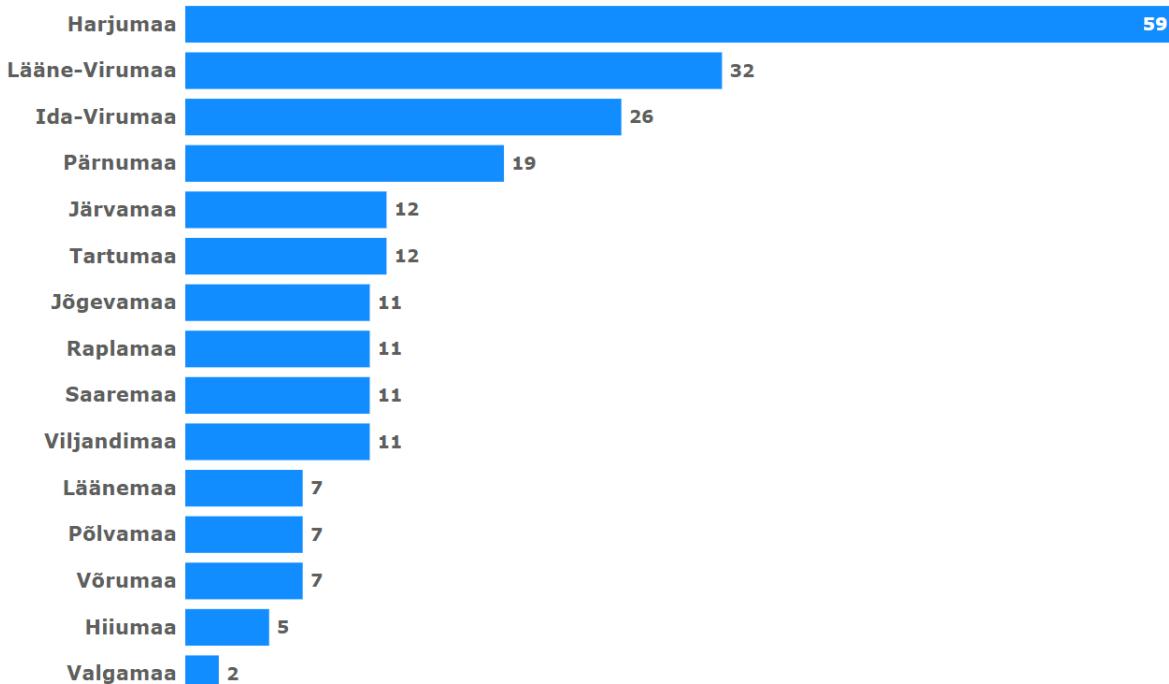
1.4. Ülesande püstitus

Elektrilevi OÜ piirkonna-ja jaotusalajaamades on 430 õlitrrafot, mille keskmene tööiga on 28 aastat (Joonis 5), trafo tootja hinnangul on õlitrafo tööiga 180 000 tundi ehk ~21 aastat [6].



Joonis 5. Elektrilevi OÜ jaotusvõrgu õlitrafode keskmene vanus maakondade kaupa, aastates, kus punane tähistab keskmist vanust

Elektrilevi OÜ jaotusvõrgus on 232 õlitrrafot (Joonis 6), mille tööiga on üle 21 eluaasta ehk 55% jaotusvõrgus olevatest trafodest, on ületanud oma hinnangulise tööea. Igal aastal tõusevad jaotusvõrgule nõutavad koormused seoses taastuvenergia tootjate liitumiste ja inimeste tarbimisvajaduste kasvuga, mistõttu on tähtis omada ülevaadet trafode seisukorrast, et vältida ootamatuid trafo rikkeid. Uue trafo soetamine on kulukas protsess, mis võtab aega üle aasta.



Joonis 6. Elektrilevi OÜ jaotusvõrgus üle 21 aasta vanuste trafode arv maakondade kaupa

Peamine kuumenemise tekke põhjus on koormuste kasv, mis tingib mähises voolutiheduse suurenemise. Koormuste kasvu võivad tekitada ajutised jaotusvõrgu koormuste reserveerimised, kus viiakse koormused üle ühele trafoole, tarbija vajaduste suurenemine, linnastumine, mille tagajärjel tekivad tiheasutustes suuremad koormused ja suurte tootjate liitumine. Trafo tootja poolt on soovitus hoida õli temperatuuri trafodes kuni 65°C , üle selle temperatuuri hakkab tekkima kiire paberisolatsiooni lagunemine, mis vähendab trafo eluiga.

Alates 2015. aastast hakkas Elektrilevi OÜ tegema kord aastas õliproove piirkonna- ja jaotusalajaamade trafodele, võttes kasutusele kaasaskantava lahustunud gaaside analüsaatori. Analüsaatori mõõtetulemuste alusel hinnatakse trafode seisukorda vastavalt järgmissele tabelile (Tabel 1):

Tabel 1. Elektrilevi OÜ juhendist J3355 gaasiproovide tehnilise seisukorra näitajad

Gaaside hulk, ppm									
Tehniline seisukord	Hooldusperiood, Kalendrikuu	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂	CO	CO ₂	
Hea	12	<118	<85	<56	<111	<5	<700	<6300	
Rahuldag	6	<200-280	<135-180	<120-200	<210-300	<19-40	<970-1180	<11600-16700	
Kriitiline	1	<725	<400	<800	<900	<450	<2100	<50000	

Tänapäeval uuritakse võimalusi mõõteandmete sihipärasemaks rakendamiseks, üks nendest on trafo eluea hindamise uuring [7].

Lõputöö eesmärk on koostada ja rakendada mudel õlitrafo eluea määratlemiseks, plaaniga tulevikus arvutusprotsess automatiserida.

Selleks tuleks täita järgmised ülesanded:

1. Uurida trafoõlis toimuvaid keemilisi protsesse.
2. Võrrelda õli parameetrite mõõtmise võimalusi.
3. Koostada juhendi alusel mudel õlitrafo eluea määratlemiseks.
4. Analüüsida mudeli alusel konkreetseid trafosid.

Kui on olemas ülevaade kriitilises seisukorras olevatest trafodest, siis on võimalik võtta tulemused aluseks alajaamade rekonstruktsioonide ja trafo vahetuse kavandamisel, mille abil saab riske vähendada.

2. GAASIANALÜÜSIDE VÕIMALUSED JA METOODIKAD

2.1. Trafo õli keemilised protsessid

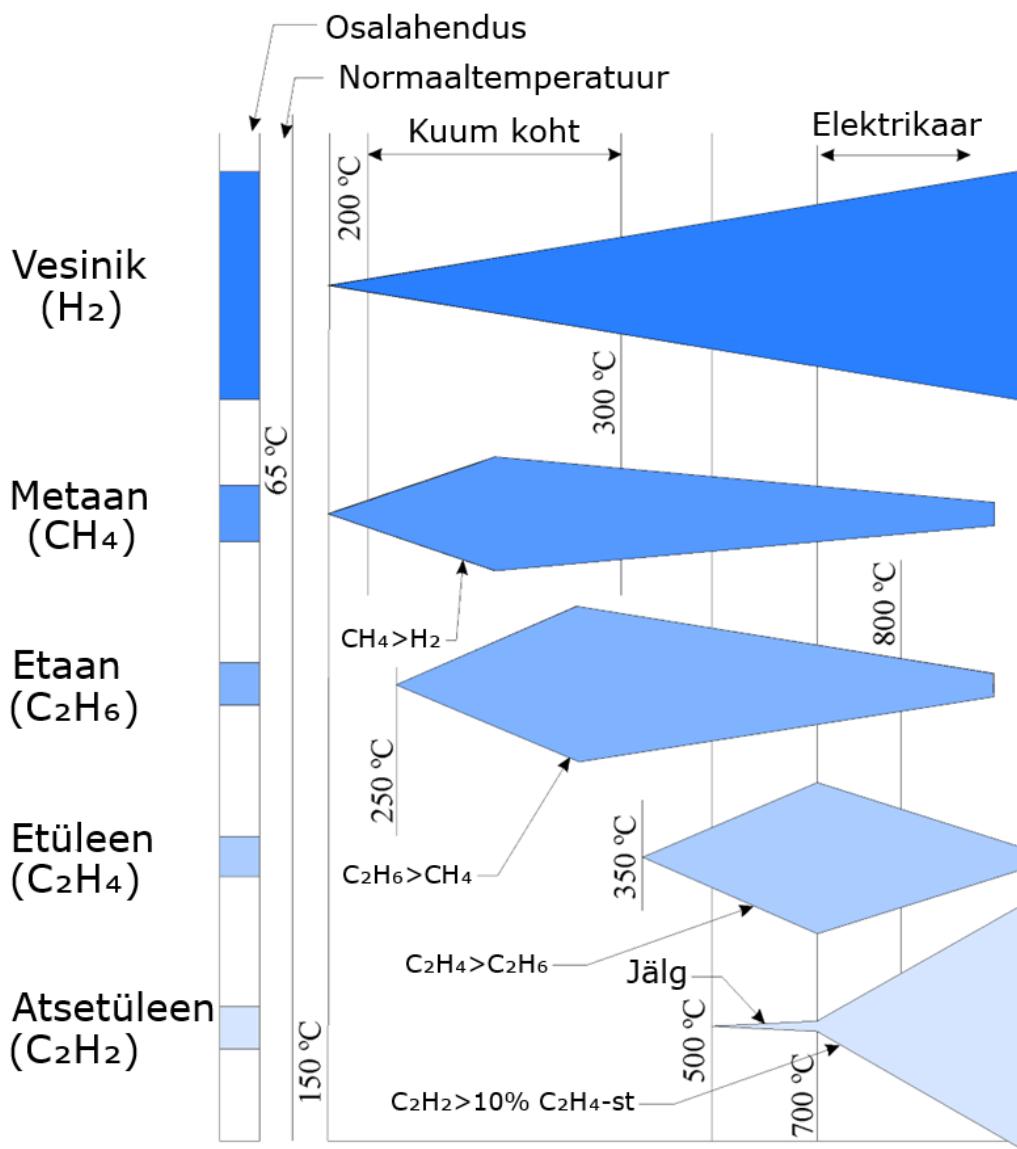
Õlitrafo keemilised protsessid on reaktsioonid, mis toimuvad trafo õlis ja mõjutavad selle kvaliteeti ja seisukorda [8], [9].

Tabel 2. Trafo õlis toimuvad keemilised protsessid

Keemiline protsess	Kuidas tekib	Tagajärjed	Kuidas ära hoida
Oksüdatsioon	Mineraalõli kokkupuutel hapnikuga	Õli reostumine, hapete ja vabade radikaalide teke	Õli temperatuuri reguleerimine, õli filtreerimine, trafo regulaarne hooldus
Hüdrolüüs	Õli reageerimisel veega	Õli omaduste halvenemine, isolatsiooni nõrgenemine	Õli niiskusesisalduse kontrollimine, trafo hermeetiline sulgemine
Pürolüüs	Õli lagunemisel kõrgtel temperatuuridel	Gaaside teke, tahkete jääkide ja lahustuvate oksiidide teke	Õli temperatuuri reguleerimine, trafo jahutamise efektiivsuse tagamine
Polümerisatsioon	Paberisolatsiooni lagunemisel	Õli viskoossuse suurenemine, jahutuse halvenemine	Õli stabiliseerivate lisandite kasutamine, õli regulaarne vahetamine
Elektrolüüs	Õlile rakendatava pinge toimel	Õli molekulide lagunemine ioonideks, isolatsiooni kahjustamine	Õli filtreerimine, isolatsioonimaterjalide valik, trafo maandamine
Gaaside teke	Õli lagunemisel	Jahutamise halvenemine, isolatsiooni nõrgenemine, trafo rikkeohu suurenemine	Õli temperatuuri reguleerimine, gaaside välja laskmine trafst, gaaside analüüs diagnostika eesmärgil
Kleepumine	Õli lagunemise tagajärvel tekivate tahkete osakeste kleepumisel trafo komponentidele	Jahutamise halvenemine, isolatsiooni nõrgenemine, trafo rikkeohu suurenemine	Õli filtreerimine, trafo komponentide regulaarne puastamine
Korrosioon	Õli lagunemisel tekivate hapete reageerimisel trafo metallkomponentidega	Trafo konstruktsiooni nõrgenemine, trafo rikkeohu suurenemine	Õli temperatuuri reguleerimine, korrosionikindlate materjalide valik, trafo katoodilise kaitse rakendamine
Lahustumine	Õli lagunemisel tekivate lahustuvate oksiidide lahustumine õlis	Õli omaduste halvenemine, dielektrilise tugevuse vähenemine	Õli filtreerimine, õli regulaarne vahetamine

Kui õli satub termilise või elektrilise pinge alla, võivad aatomite vahelised sidemed puruneda, mille tagajärjel tekivad erinevad gaasid (Tabel 3. Õlitrafos tekkivad gaasid).

Moodustuva gaasi tüüp sõltub rikke raskusastmest ja tüübist. Näiteks vesinik ja metaan tekivad tavaiselt madalamal temperatuuril, samas kui etüleen ja atsetüleen tekivad kõrgemal temperatuuril (Joonis 7).



Joonis 7. Gaaside tekkimine temperatuuride järgi [10]

Tabel 3. Õlitrafiltri tekkevad gaasid

Gaas	Tekke põhjus	Rikke tüüp	Tekkimise temperatuur	Struktuur
CH ₄ (metaan)	Termiline lagunemine õlis ja isoleerimismaterjalides.	Ülekuumenemise punkt või õli ülekuumenemine	>150 °C	$\begin{array}{c} \text{H} \\ \\ \text{H}-\text{C}-\text{H} \\ \\ \text{H} \end{array}$
C ₂ H ₆ (etaan)	Isolatsiooni lagunemine kõrgetel temperatuuridel.	Termilised pinged, isolatsiooni halvenemine	>250 °C	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \\ \text{H}-\text{C}-\text{C}-\text{H} \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array}$
C ₂ H ₄ (etüleen)	Isolatsiooni lagunemine eriti kõrgetel temperatuuridel.	Termilised pinged, isolatsiooni halvenemine	>350 °C	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \\ \text{H}-\text{C}=\text{C}-\text{H} \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array}$
C ₂ H ₂ (atsetüleen)	Tõsised elektririkked kõrgetel temperatuuridel	Kaarlahendus või koroonalahendus.	>500 °C	H—C≡C—H
H ₂ (vesinik)	Intensiivsed elektrilahendid	Õli ülekuumenemine, kaarlahendus, sädemelöök või lekkimine	>150 °C	H — H
H ₂ O (veearu)	Välisest keskkonnast või hüdrolüüsist	Tihendite leke, isolatsiooni oksüdeerumine	Puudub.	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{O} \quad \text{H} \\ \quad \backslash \quad / \\ \text{H} \quad \text{O} \quad \text{H} \end{array}$
CO (vingugaas)	Tekib paberis oksüdeerumisel.	Näitab paberi kõrget temperatuuri või oksüdeerumist.	>200 °C	c ⁻ ≡ o ⁺
CO ₂ (süsihappegaas)	Tekib paberis oksüdeerumisel.	Näitab paberi kõrget temperatuuri või oksüdeerumist.	>300 °C	O=C=O

2.2. Kaasaskantav lahustunud gaaside analüsaator

Trafo õli gaaskromatograafia on analüütiline meetod, mida kasutatakse trafo õlis lahustunud gaaside eraldamiseks ja tuvastamiseks. Trafo õlis lahustunud gaasid iseloomustavad trafo seisundit ja rikkeid, mis võivad olla põhjustatud ülekoormusest, lühisest, kaare tekkimisest, isolatsiooni kahjustusest, korrosionist, lekkimisest. Trafo õli gaaskromatograafia abil saab määrata trafo õlis lahustunud gaaside, nagu vesinik, metaan, etaan, etüleen, atsetüleen, süsinikmonooksiid, süsinikdioksiidi ja furaanide olemasolu ja koguse. See võimaldab hinnata trafo seisukorda ning ennetada võimalikke probleeme.

Elektrilevi OÜ jaotusvõrgus kasutatakse kaasaskantavat gaasianalüsaatorit (Joonis 10), millega teostatakse lahustunud gaaside analüüs (edaspidi DGA ehk *dissolved gas analysis*).

Õliproov võetakse spetsiaalse süstla abil trafo õlipaagist ja kontaktori paagist, õlipaagist võetakse kord aastas ja kontaktori paagist iga kahe aasta tagant.



Joonis 8. Trafo õliproovid

Trafo õli normaalne värvus on heledast kollastest kuni oranžini (Joonis 8), tähelepanu peaks pöörama asjaolule, kui trafo õli värvus muutub tumedaks. Trafo õli värv on protsessi indikaator, kuna värvust mõjutab, kui trafos toimub oksüdatsioon, kuumenemine või saastumine.

Seadmega on kaasas õlianum, mille sees on magnetkapsel. Protsessi käigus pannakse anuma sees olev magnetkapsel pöörlema induktiooni abil. Selleks, et magnet suudaks saavutada vajalikud kiirused gaaside eralduseks, on vaja õliproov lahjendada (Joonis 9).



Joonis 9. Trafo õliproovi lahjendamine

Proov kuumutatakse ja segatakse, mille tulemusena eralduvad gaasid, mis liiguvad torusse. Toru on pikk, et võimaldada komponentide paremat eraldumist. Toru lõpus on detektor, mis tuvastab osakesed ja edastab signaalid gaasianalüsaatorisse. Seade genereerib kromatogrammi, mis näitab detektori poolt tuvastatud signaali tugevust erinevatel hetkedel. Kromatogrammi abil saab ülevaate trafo õlis lahustunud gaaside osakestest.

1. Teflon filter
2. Õli sissepritse ventiil
3. Temperatuuriandur
4. Õli anum
5. Gaasi sisse- ja väljalaskeava



Joonis 10. Lahustunud gaaside analüsaator ehk gaaskromatograaf

Proovinõu otsas käib pudeli kork, millega ulatub välja kaks toru, mõlema toru ees on teflon filtrid. Filtri pooride suurus peab vastama vähemalt 22 µm, et tulemused oleksid korrektsed. Üks toru reguleerib gaasi sissetõmmet ja teine väljalaset. Gaasitorudega on kaasas temperatuuriandur.

Tabel 4. Kelman Transport X andmed [11]

Rikkegaas	Kalibreeritud vahemik, ppm
Vesinik (H_2)	5 - 5,000
Süslinikdioksiid (CO_2)	2 - 50,000
Süslinikmonooksiid (CO)	1 - 50,000
Metaan (CH_4)	1 - 50,000
Etaan (C_2H_6)	1 - 50,000
Etüleen (C_2H_4)	1 - 50.000
Atsetüleen (C_2H_2)	0,5 - 50,000
Vesi (H_2O)	0 - 100 % (suhteline küllastus)
Mõõtetäpsus	Gaas: ± 5% või 2 ppm Vesi: ± 3 ppm

Võrreldes *online*-tüüpi gaasianalüsaatoritega, on kaasaskantav gaasianalüsaator täpsem ja mõõdab osakeste koguseid mitte kontsentratsiooni.

2.3. *Online*-tüüpi gaasianalüsaatorid

Peale kaasaskantava DGA on olemas *online* tüüpi DGA gaasianalüsaatorid, mis paigaldatakse trafo põhipaagi külge. Lõputöö autor on välja toonud põhilised *online* DGA tootjad ja mudelid (Joonis 11). Seadmete valikul lähtuti põhimõttest, et mõõtetsükli aeg oleks võimalikult lühike ja oleks võimekus mõõta järgmisi gaase: C₂H₂, C₂H₄ ja CH₄, et oleks võimekus teha rikke analüüs kasutades Duvali kolmnurga meetodit. Käsitletud gaasianalüsaatoritel on kõigil SCADA (*Supervisory Control and Data System*) ühendamise võimekus. SCADAsse tulevad signaalid on seadistatud kindlale nivoole, mille ületamisel tuleb juhtimiskeskuse dispetšerile alarmsignaal.

Seame nimetus	Mõõdetavad gaasid	Mõõtevahemik	Mõõtetäpsus	Mõõtetsükkel
MTE Hydrocal 1001+	TDCG	0...5000 ppm	± 15% ± 20 ppm	20 minutit
	H ₂		± 10% ± 15 ppm	
	CO		± 20% ± 25 ppm	
	CH ₄		± 20% ± 25 ppm	
	C ₂ H ₂		± 20% ± 25 ppm	
	C ₂ H ₄		± 20% ± 25 ppm	
	C ₂ H ₆		± 20% ± 25 ppm	
	H ₂ O	0...100%	± 3%	
MTE Hydrocal 1008	Mineraalõli niiskus	0...100 ppm	± 3% ± 3 ppm	4 tundi
	H ₂	0...2000 ppm	± 15% ± 25 ppm	
	CO	0...5000 ppm	± 20% ± 25 ppm	
	CO ₂	0...20 000 ppm	± 20% ± 25 ppm	
	CH ₄	0...2000 ppm	± 20% ± 25 ppm	
	C ₂ H ₂	0...2000 ppm	± 20% ± 5 ppm	
	C ₂ H ₄	0...2000 ppm	± 20% ± 10 ppm	
	C ₂ H ₆	0...2000 ppm	± 20% ± 15 ppm	
MS Calisto 5	H ₂ O	0-100%	± 3%	80 minutit
	Mineraalõli niiskus	0...100 ppm	± 3% ± 3 ppm	
	H ₂	0...20 000 ppm	± 5% ± 5 ppm	
	CO	0...30 000 ppm	± 5% ± 5 ppm	
	CO ₂	0...100 000 ppm	± 5% ± 5 ppm	
	CH ₄	0...100 000 ppm	± 5% ± 5 ppm	
	C ₂ H ₂	0...200 000 ppm	± 5% ± 5 ppm	
	C ₂ H ₄	0...200 000 ppm	± 5% ± 5 ppm	
	C ₂ H ₆	0...200 000 ppm	± 6% ± 5 ppm	
	O ₂	0...100 000 ppm	± 15% ± 15 ppm	
Kelman DGA 900	N ₂	0...150 000 ppm	± 15% ± 15 ppm	30 minutit
	H ₂ O	0...100%	± 3% ± 3 ppm	
	H ₂	5...5000 ppm	± 5% ± 5 ppm	
	CO	1...50 000 ppm	± 3% ± 1 ppm	
	CO ₂	20...50 000 ppm	± 3% ± 20 ppm	
	CH ₄	2...50 000 ppm	± 3% ± 2 ppm	
	C ₂ H ₂	0,5...50 000 ppm	± 3% ± 1 ppm	
	C ₂ H ₄	1...50 000 ppm	± 3% ± 1 ppm	
	C ₂ H ₆	1...50 000 ppm	± 3% ± 1 ppm	
	O ₂	100...50 000 ppm	± 3% ± 100 ppm	

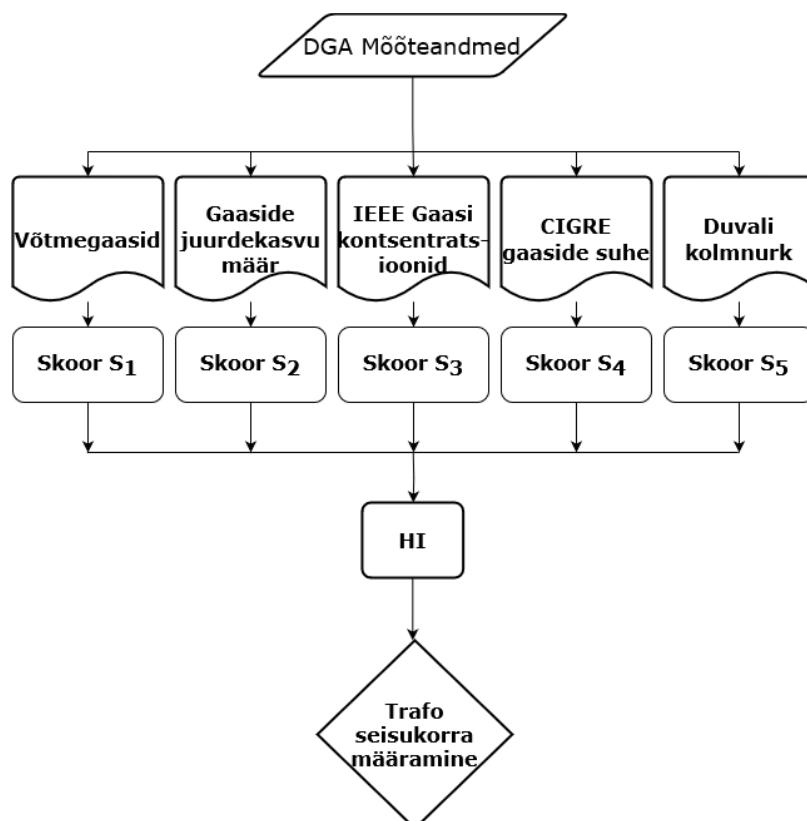
Joonis 11. *Online*-tüüpi gaasianalüsaatorid

Online gaasianalüsaatorite suurimad puudused on mõõtetsükli aeg ja võimekus mõõta ainult põhipaagist. Prioriteet on võimalikult kiire veateade, milles MTE Hydrocal 1001+ on kõige lühema mõõtetsükliga – 20 minutit. Selleks, et trafo rikkeid ennetada oleks meil vaja võimalikult lühikest mõõtetsüklit, 20 minutiline mõõtetsükk ei pruugi olla piisav, et ennetada kiireloomulisi kriitilisi rikkeid. Selle jaoks on viimaseks kaitseks gaasirelee. Elektrilevi OÜ jaotusvõrgus kasutatakse MTE Hydrocal 1003, mis on sama pika mõõtetsüliga, mis MTE Hydrocal 1001+, kuid mõõdab kolme gaasi (H_2 , CO ja H_2O).

Kokkuvõtteks on DGA tähtis meetod hindamaks jõutrafo seisukorda, kuigi see pole mõeldud kiireloomuliste trafo rikete ennetamiseks on see hetkel teadaolevalt kõige kiirem meetod trafo seisukorra hindamiseks ja rikke tuvastamiseks. Trafo rikkeid, mis ei ole kiireloomulised, on võimalik ennetada kasutades *online* DGA vahendeid.

2.4. Trafo eluea määratlemise metoodika

Lõputöö eesmärk on hinnata jõutrafo seisukorda, võttes aluseks hetkel Elektrilevi OÜ jaotusvõrgus kasutuses olevaid seireandmeid. Autor on valinud eluea indeksi metoodika trafo seisukorra määramiseks.



Joonis 12. Trafo eluea indeksi määramise protsess

Analüüsimiseks kasutatakse kombinatsioone erinevatest meetoditest, mille põhjal arvutatakse välja jõutrafo eluea indeks (Joonis 12). Metoodika koosneb viiest analüütilisest meetodist, mille alusel antakse jõutrafole eluea indeks ja mille põhjal me saame hinnata õlitrafo seisukorda [7].

Viidatud uurimuses on skoori vahemik 0...3, kus 3 näitab, et trafo on normaaltingimustes ja 0 tähendab, et trafo on kriitilises seisus.

Jõutrafo eluea indeksi arvutamise valem [7, lk 3]

$$HI = \frac{\sum_{i=1}^5 S_i \cdot W_i}{\sum_{i=1}^5 W_i}, \quad (1)$$

kus HI – eluea indeks;

S_i – analüütiliste meetodi skoor;

W_i – skoori mõju.

Igal meetodil on kindel mõju skoorile (Tabel 5), kus võtmegaaside meetod on kõige suurema mõjuga. Kui suure mõjuga meetod on, tuleneb standardist IEEE C57.104-2019 [12, lk 34].

Tabel 5. Analüütiliste meetodite skooride mõju

Meetod	W_i
Võtmegaasid	7,5
Gaaside juurdekasvu määr	0,2
IEEE Standardi gaaside kontsentratsioonid	0,3
CIGRE gaaside suhe	0,1
Duvali kolmnurk	0,2

Järgnevalt autor vaatab viite meetodit täpsemalt.

2.4.1. Võtmegaasid

Võtmegaaside meetodil vaadeldakse viie gaasi mõõteandmeid ja nende põhjal määräatakse skoor. Gaaside koguseid vaadeldakse kombineeritult ja võetakse aluseks kõige väiksema skooriga väärthus.

Tabel 6. Võtmegaaside skoori määratlemine eluea indeksi arvutuseks [7]

Mõõtetulemused, ppm	Skoor, S_1	Tegevus
H ₂ < 300 ja	3	Jätkata tavapärase perioodsusega. Proov võetakse iga 12 kuu tagant
C ₂ H ₂ < 3 ja		
C ₂ H ₄ < 100 ja		
C ₂ H ₆ < 200 ja		
CH ₄ < 300 ja		
301 < H ₂ < 500 ja	2	Monitoorimise periood viia 6 kuu peale
4 < C ₂ H ₂ < 15 ja		
101 < C ₂ H ₄ < 200 ja		
201 < C ₂ H ₆ < 300 ja		
301 < CH ₄ < 400 ja		
501 < H ₂ < 700 ja	1	Monitoorimise periood viia 1 kuu peale. Varustuskindluse poolelt tähtsatele trafoodele tellida analüüsides
16 < C ₂ H ₂ < 35 ja		
201 < C ₂ H ₄ < 300 ja		
301 < C ₂ H ₆ < 400 ja		
401 < CH ₄ < 500 ja		
H ₂ > 701	0	Tellida täiendavad analüüsides
C ₂ H ₂ > 36		
C ₂ H ₄ > 301		
C ₂ H ₆ > 401		
CH ₄ > 501		

Skoor S_1 (Tabel 6) on kõige suurema kaaluga trafo eluea indeksi määramisel. Uurimuses on välja toodud soovituslikud hooldustegevused vastavalt skoorile, kus täiendavate analüüside puhul on mõeldud mähise isolatsioonitakistuse ja tan δ mõõtmisi, tühijooksukatseid, ülekandeteguri määramist.

2.4.2. Gaaside juurdekasvu määär

Standardi IEEE C57.104-2019 järgi on välja toodud, et O_2/N_2 suhet kasutati trafo tüübi määratlemiseks, kui lämmastiku suhe on üle 0,2 oli tegemist hingava trafoga, kuna on teada, et Elektrilevi OÜ jaotusvõrgus on silikageeliga trafod, siis lähtutakse tabelist $O_2/N_2 > 0,2$. MTE Hydrocal 1011 genX P on tänase päeva seisuga ainuke turul olev kaasaskantav DGA, millel on võimekus mõõta hapniku ja lämmastiku gaaside sisaldust (Tabel 7).

Tabel 7. Gaaside juurdekasvu määra skoor eluea indeksi arvutamiseks

Gaaside juurdekasvu määär, ppm								
Gaasid	$O_2/N_2 \leq 0,2$				$O_2/N_2 > 0,2$			
H ₂	0-20	21-30	31-40	> 41	1-10	11-20	21-25	> 26
CH ₄	0-10	11-20	21-30	> 31	0-5	6-8	9-10	> 11
C ₂ H ₆	0-10	11-15	16-25	> 26	0-2	3-4	5-6	> 7
C ₂ H ₄	0-5	6-10	11-20	> 21	0-10	11-15	16-20	> 21
C ₂ H ₂	0	0	> 1	> 2	0	0	1	> 2
CO	0-100	101-150	151-250	> 251	0-50	51-100	101-175	> 176
CO ₂	0-500	501-1000	1001-2500	> 2501	0-500	501-1000	1001-1750	> 1751
Skoor, S₂	3	2	1	0	3	2	1	0

Väärtused saadakse kahe järgneva mõõtmise mõõtetulemuse vahega, mis on tavaliselt aastase perioodilisusega ja vörreldakse tabelis oleva väärtustega. Jälgitakse just gaaside koguse juurdekasvu.

2.4.3. IEEE standardi alusel gaaside kontsentratsioonid

Võttesks aluseks IEEE C57.104-2019 standardis välja toodud tabel 2 saab anda mõõtmistele skoori (Tabel 8), mille põhjal arvutada eluea indeksi [7], [12, lk 38].

Tabel 8. IEEE standardist tulenev gaaside kontsentratsioon

IEEE gaaside kontsentratsiooni skoor, ppm									
Gaasid	$O_2/N_2 \leq 0.2$				$O_2/N_2 > 0.2$				
H ₂	< 200				< 90				
CH ₄	0-100	101-150	151-200	> 201	0-30	31-40	41-60	> 61	
C ₂ H ₆	0-70	71-175	176-250	> 251	0-20	21-30	31-40	> 41	
C ₂ H ₄	0-40	41-95	96-175	> 176	0-80	81-100	101-125	> 126	
C ₂ H ₂	< 2	< 2	< 2	< 2	< 7	< 7	< 7	< 7	
CO	< 1100				< 600				
CO ₂	<5000	5001-10000	10001-15000	>15001	< 5000	5001-7000	7001-8000	> 8001	
Skoor, S₃	3	2	1	0	3	2	1	0	

Tabelis on välja toodud gaaside kontsentratsiooni normpiirid ja nende skoorid. DGA mõõteandmeid võrreldakse tabelis olevate väärustega, mille põhjal määratatakse skoor S₃.

2.4.4. CIGRE gaaside suhe

CIGRE (*International Council on Large Electric Systems*) töögrupp on loonud juhised, kus gaaside suhte põhjal on võimalik diagnoosida trafo rikke põhjust (Tabel 9). Uurimuses on sõltuvalt rikke raskusest lisatud skoor [13].

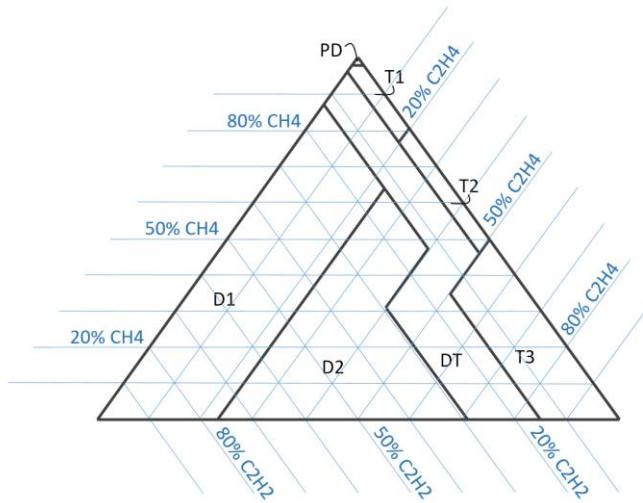
Tabel 9. CIGRE juhendist tulenev gaaside skoor

Gaaside suhe	Rikke diagnoos	Skoor, S ₄
Kõik gaasid on IEEE standardi piires	Normaalne	3
H ₂ /CH ₄ > 10	Osalahendus	2
C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆ > 1	Termiline rike	1
C ₂ H ₂ /C ₂ H ₆ > 1	Elektrikaar	0

Rikke diagnoosi on hea võrrelda Duvali kolmnurga meetodi tulemustega, et saada paremat ülevaadet trafos toimunud protsesside kohta.

2.4.5. Duvali kolmnurk

Võttes aluseks kolme mõõdetava gaasi kontsentratsiooni ja kuvades need kolmnurgale saame me hinnata, mis tüüpi rike on jõutrafos toimunud. Duvali kolmnurk on levinud meetod, mille abil hinnata trafo seisukorda. Täpsem meetod on Duvali viisnurk, kus kasutatakse viie gaasi suhet ja vektorarvutusega leitakse keskpunkt, antud uurimustöös ei käsitleta seda meetodit.



Joonis 13. Duvali kolmnurga jaotus [14]

Kolme gaasi suhtelised kogused arvutatakse protsentuaalselt valemiga:

$$\omega_{protsent} = \frac{C_{gaas-A}}{C_{gaas-A} + C_{gaas-B} + C_{gaas-C}}, \quad (2)$$

kus $\omega_{protsent}$ – gaasi protsentuaalne suhe koguhulgast, %;

C_{gaas-A} – gaasi A mõõdetud kogus, ppm;

C_{gaas-B} – gaasi B mõõdetud kogus, ppm;

C_{gaas-C} – gaasi C mõõdetud kogus, ppm.

Protsendid kantakse võrdkulgsele kolmnurgale (Joonis 13), kus iga gaas on esindatud ühel küljel.

Esitatud *Pythoni* keskkonnas loodud programmikood (Joonis 14) on autori loodud. Programm võtab Exceli tabelist mõõteandmed, kalkuleerib kontsentratsiooni ja kuvab need kolmnurgale (Joonis 15).

```
import pandas as pd
import duvals_triangle_plotter as dtp

# Võtab andmed koondfailist
data = pd.read_excel(r'faili_asukoht')

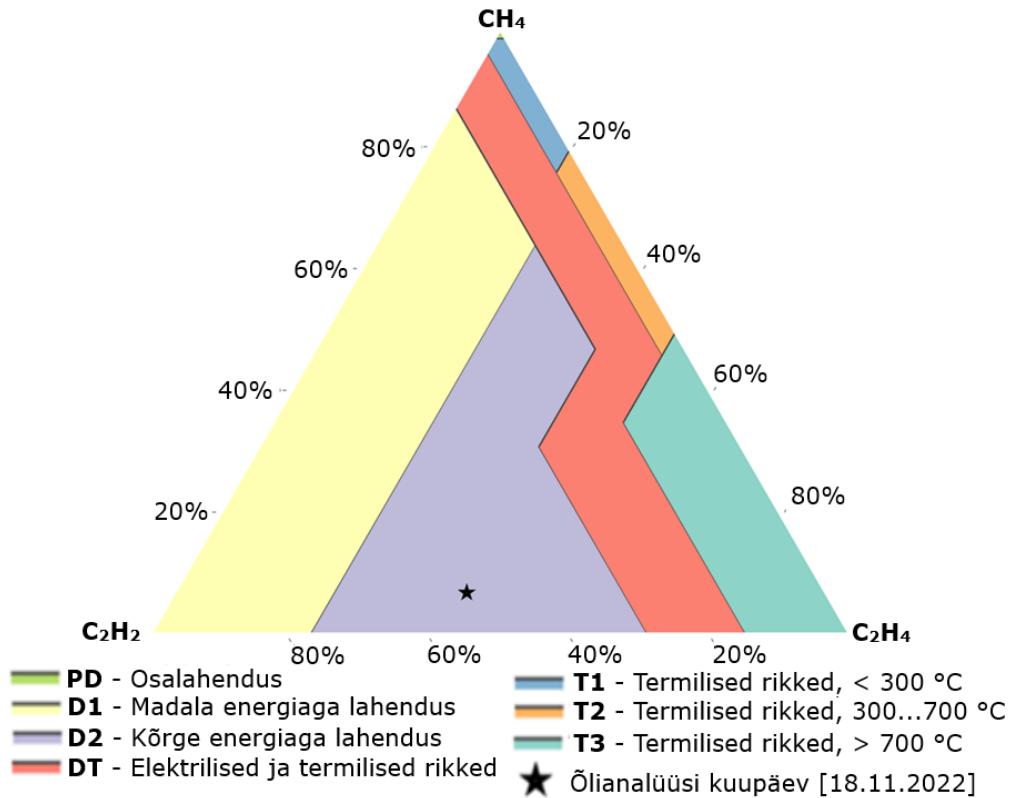
# Muudab kuupäeva loetavasse formaatti
data['Kuupäev'] = pd.to_datetime(data['Kuupäev'])

# Konsetratsioonid ja kuupäev failist
CH4 = data['CH4'].tolist()
C2H2 = data['C2H2'].tolist()
C2H4 = data['C2H4'].tolist()
dates = data['Kuupäev'].dt.strftime('%d-%m-%Y').tolist()

duval_points = [
    dtp.get_duval_points_traces(
        CH4, # CH4 - Metaani Konsetratsioon
        C2H2, # C2H2 - Atsetüleeni Konsetratsioon
        C2H4, # C2H4 - Etüleeni Konsetratsioon
        dates # Kuupäev
    )
]

dtp.get_duvals_triangle_plot(duval_points, show_plot=True)
#-FAILI LÖPP-
```

Joonis 14. Duvali kolmnurga genereerimise *Python* kood



Joonis 15. Mõõteandmete põhjal joonestatud Duvali kolmnurk

Joonistatud punkti asukoht kolmnurgas aitab tuvastada trafos esineva rikke põhjuse. Kolmnurk on jagatud erinevateks tsoonideks, millest igaüks vastab konkreetsele veatüübile. Joonis 15 välja toodud kolmnurgal on rikke diagnoosiks D2 ehk kõrge energiaga lahendus. Rikke diagnoosidele on määratud skoor S_5 (Tabel 10), kus skoor on määratud vastavalt sellele, kui kriitiline on rikke mõju.

Tabel 10. Duvali kolmnurga skoor

Rikke diagnoos	Skoor, S_5
Kõik rikked on alla IEEE standardi	3
PD, D1, T1	2
T2	1
D2, DT, T3	0

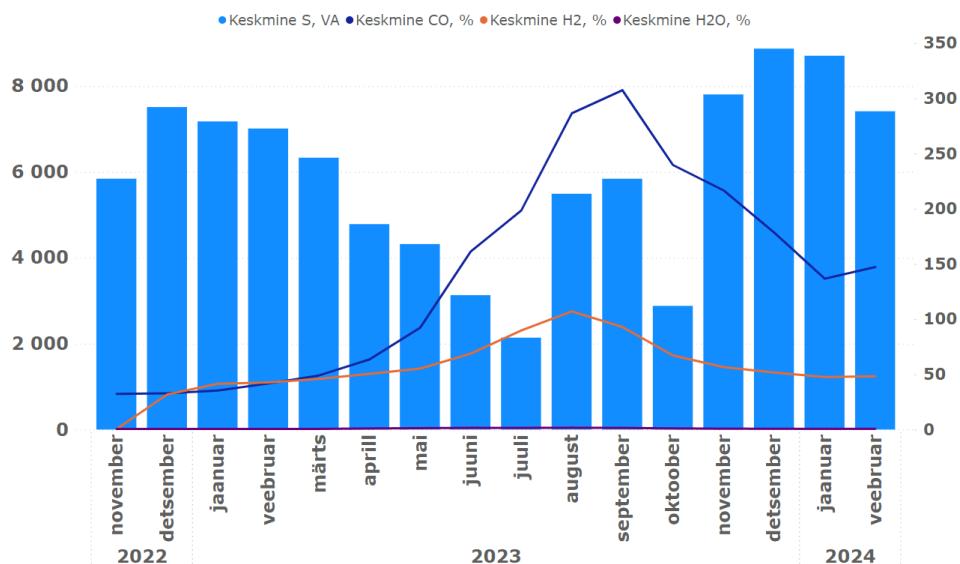
Trafo eluea indeksi määratlemiseks määratakse iga kirjeldatud meetodi järgi skoorid $S_1 \dots S_5$ ja arvutatakse eluea indeks. Tulemused on esitatud järgmises peatükis.

3. JÕUTRAFO SEISUKORRA HINDAMINE

3.1. Hinnang *online*-tüüpi gaasianalüsaatori andmete alusel

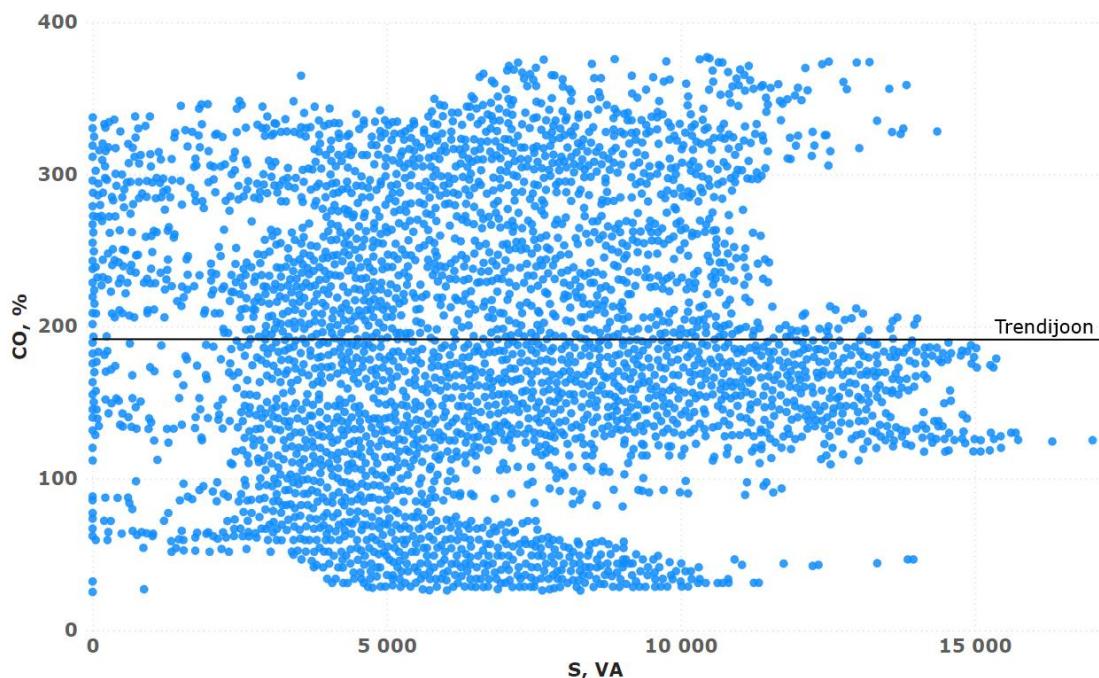
Lõputöös on üheks katseobjektiks võetud Sikassaare 110/30/10 kV piirkonnaalajaama trafo C2T, tegemist on 13 aastat vana trafoga, mille nimivõimsus on 40 MVA. *Online* tüüpi gaasianalüsaatorid mõõdavad gaaside koguseid, mis kuvatakse kontsentratsioonina protsentides, mistõttu täpset gaaside kogust ei tea ja tulemused ei ole piisavalt täpsed, et nende põhjal teha seisukorra arvutusi, ebatäpsust suurendab analüsaatorite suur mõõtevig, mis sõltub seadmest, kuid tavaliselt on $\pm 20\%$. Seadme paigaldus sõltub trafost ehk kõikidele trafodele analüsaatoreid paigaldada ei saa. Analüsaatorite seadistused ei ole normaliseeritud ja on erinevalt seadistatud, mistõttu mõõtetulemused on erinevad. Hetkel on Elektrilevi OÜ gaasianalüsaatorid eesmärgiga anda indikatsiooni, et mingisugune protsess on toimumas ja anda alarmsignaal dispetšerile.

Autori algne hüpotees oli gaasianalüsaatorite põhjal rikete ennetamine, kuid kiiremate seadmete mõõtetsükkel on 20 minutit, mistõttu rikke ennetamine ei ole võimalik. Järgnevalt autor uurib trafo võimsuse ja gaaside kontsentratsioonide vahelisi korrelatsioone, eesmärgiga leida seoseid ja mõõteandmetele rakendust. Autor võttis välja viimase 3 aasta iga tunni mõõtmised SCADAst ja koondas need kokku ühte faili. Esimestel mõõtmistel esines ebatäpsusi, mistõttu need eemaldati, alles jäi viimase 16 kuu mõõteandmed.



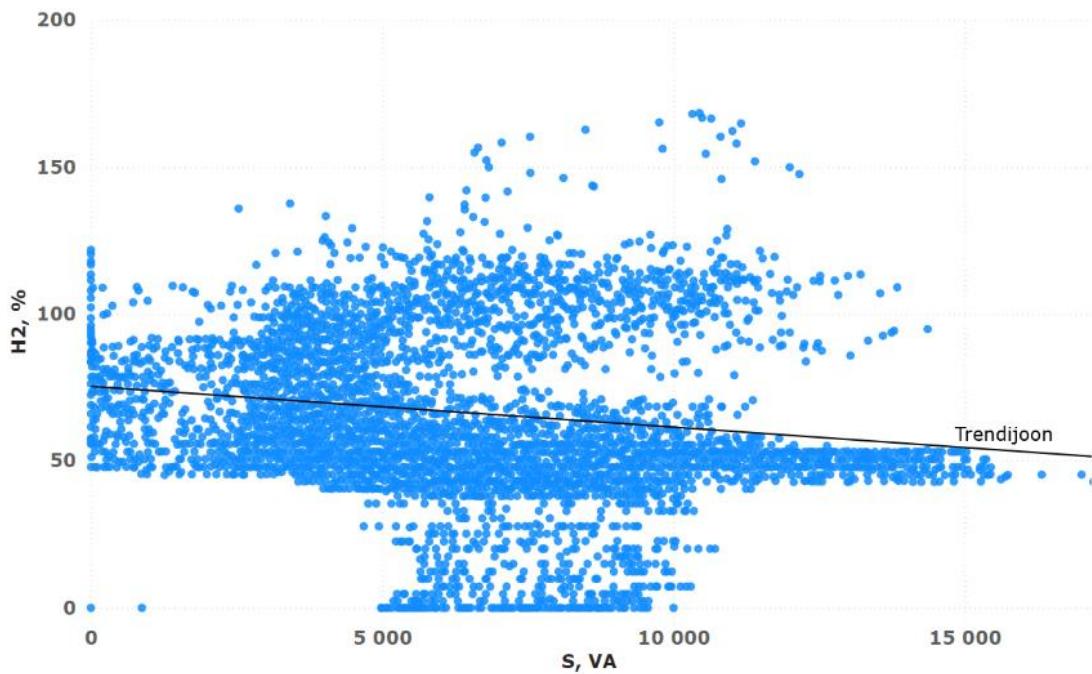
Joonis 16. Sikassaare piirkonnaalajaama trafo C2T 16 kuu võimsused koos gaaside kontsentratsioonidega

Sikassaare piirkonnaalajaama trafos C2T on hakanud toimuma protsessid, mille käigus CO ja H₂ gaaside kontsentratsioonid on tõusma hakanud (Joonis 16), vaatleme gaaside ja võimsuste korrelatsioone täpsemalt.



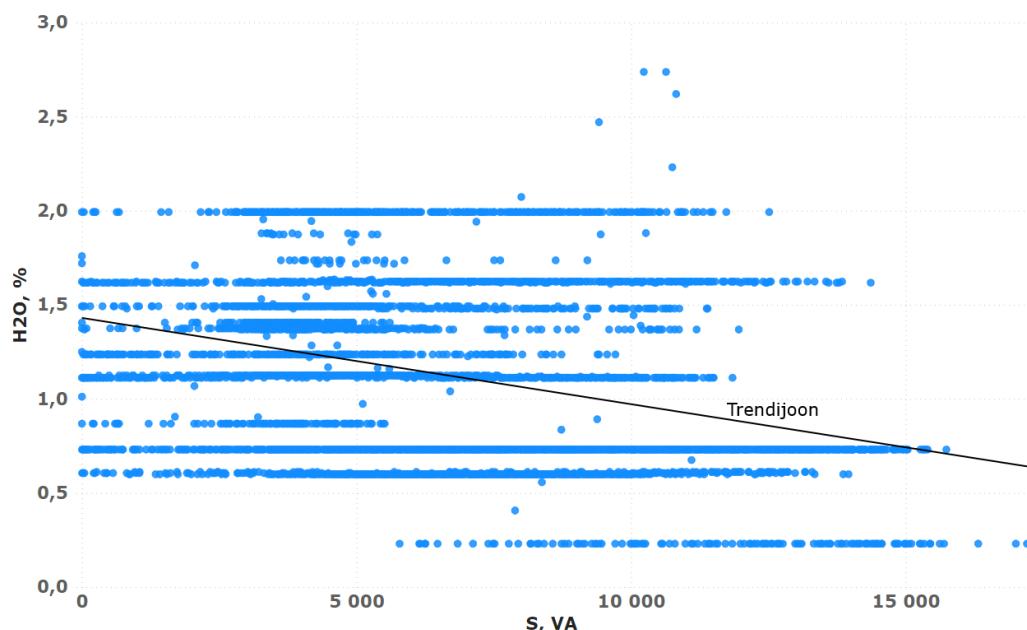
Joonis 17. Sikassaare piirkonnaalajaama trafo C2T näivvõimsuse, kVA ja CO kontsentraatsiooni, %, seosed

Trafo koormatuse ja CO gaaside kontsentraatsiooni vahel on väga nõrk negatiivne korrelatsioon (Joonis 17), kus korrelatsiooni koefitsient on -0,12, kuid ei ole piisav, et selle põhjal järeldusi teha.



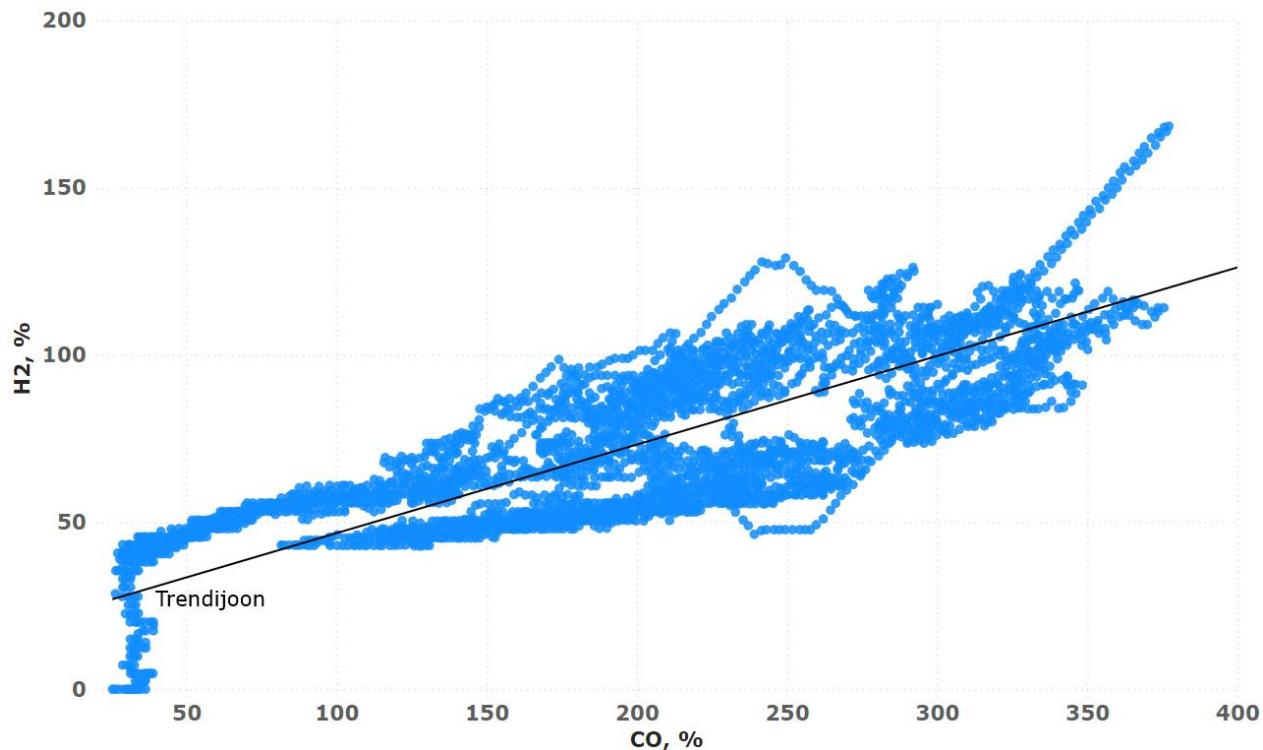
Joonis 18. Sikassaare piirkonnaalajaama trafo C2T näivvõimsuse, kVA ja H_2 kontsentraatsiooni, %, seosed

Trafo koormatuse ja H_2 kontsentraatsiooni vahel on nõrk negatiivne korrelatsioon (Joonis 18), kus korrelatsiooni koefitsient on -0,24 ehk sellest saab järelle daa, et trafo koormuste suurenemisel, vesiniku kontsentraatsioon trafo põhipaagis väheneb.



Joonis 19. Sikassaare piirkonnaalajaama trafo C2T näivvõimsuse, kVA ja H_2O kontsentraatsiooni, %, seosed

Trafo koormatuse ja H_2O kontsentratsioonide vahel on negatiivne seos (Joonis 19), kus korrelatsiooni koefitsient on -0,37 ehk mida rohkem on trafo koormatud seda vähem H_2O gaase tekib trafos.



Joonis 20. Sikassaare piirkonnaalaajaama trafo C2T CO, %, ja H_2 kontsentratsiooni, %, seosed

Kõige suuremad tõusud olid CO ja H_2 kontsentratsioonides (Joonis 16), mistõttu on tähtis uurida omavahelisi seoseid (Joonis 20). CO ja H_2 vahel on tugev positiivne korrelatsioon, kus korrelatsiooni koefitsient on 0,79. Selle põhjal saab järeldada, et CO ja H_2 sõltuvad üksteisest ja suurenevad samaaegselt.

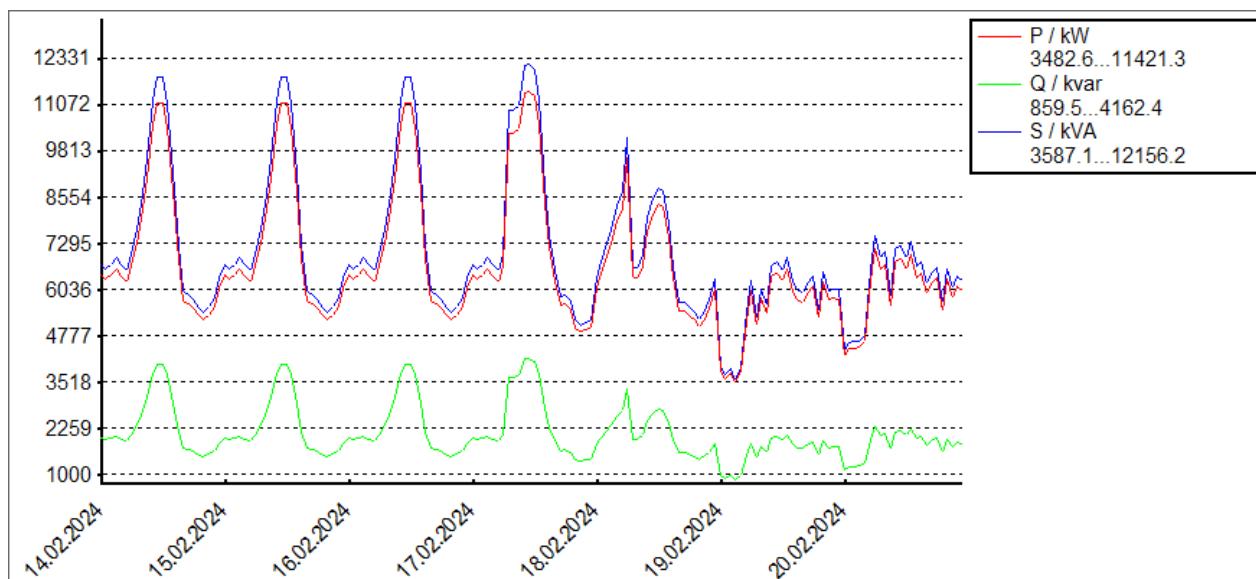
Andmete põhjal võib spekuleerida, et trafos on toimunud intensiivsed elektrilahendused, mille tagajärvel on paberisolatsioon saanud kahjustada (Tabel 3). Tuleb meeles pidada, et korrelatsioon ei tähenda põhjus-tagajärg seost, mistõttu oleks tarvis teha lisa analüüse normaliseeritud seadistustega, et leida kindlaid seoseid.

Hetke seisuga on Elektrilevi OÜ jaotusvõrgus olevate *online* gaasianalüsaatorite eesmärk anda alarmsignaali enne gaasirelee rakendumist.

3.2. Hinnang eluea indeksi alusel

Eluea indeksi arvutusnäide on tehtud Imavere piirkonnaalajaama trafo C1T eluea indeksi, kasutades tarkvara Microsoft Excel. Imavere C1T sai valitud, kuna jõutrafo rikete ajalugu on teada ja mõõteandmeid ulatub aastasse 2015, millal Elektrilevi OÜ hakkas DGA analüüse teostama, mistõttu on see hea objekt analüüsimiseks.

Imavere 110/15 kV piirkonnaalajaam on välistüüp, kahe trafoga alajaam, kus trafo C1T on nimivõimsusega 16 MVA ja C2T nimivõimsusega 12 MVA. Normaalskeemi järgselt on trafo C2T reservis ja 15kV latistuse sektsioonid on koos, mistõttu koormus langeb trafore C1T. Trafo C1T on trafo eluea mõistes uus, trafo on toodetud 2011. aastal ja sellest ajast kasutuses. Alajaama suuremad tarbijad on saeveski ja päikesepargid, kus trafo C1T kolme aasta keskmise koormus on 6 MVA ja tipukoormused 12 MVA (Joonis 21).



Joonis 21. Imavere piirkonnaalajaama trafo C1T koormused

Sikassaare piirkonnaalajaama trafore C1T on alates 2015. aastast tehtud iga aasta DGA analüüse (Tabel 11), 2016. aastal tehti kolm mõõteanalüüs kuna esines ebatäpsusi mõõtmisvalemustes. Õliproove traforest võtab partnerettevõte aasta jooksul, mida analüüsatakse gaasianalüsaatoritega aasta lõpus. Hetkel kasutuses olev protsess tekitab trafo seisukorra hindamisel raskusi, kuna raske on seostada trafo protsessi ja analüüside kuupäevi.

Tabel 11. Imavere piirkonnaalajaama trafo C1T DGA mõõtete proovide andmed

Mõõtetulemused, ppm							
Kuupäev	H₂	CH₄	C₂H₆	C₂H₄	C₂H₂	CO	CO₂
18.10.2023	5,00	2,97	2,55	1,00	0,50	358,33	1437,52
05.12.2022	5,00	3,34	2,95	1,00	0,50	518,15	1269,04
05.11.2020	8,93	11,81	5,99	13,12	75,89	416,53	1062,39
23.10.2019	5,00	5,49	4,44	4,60	12,79	407,72	1005,33
31.10.2017	5,00	2,48	6,10	5,64	0,50	20,60	765,43
22.11.2016	5,00	4,05	13,28	7,79	0,53	16,67	826,97
22.03.2016	5,00	1,51	8,98	2,44	1,70	328,42	663,48
10.03.2016	5,00	1,71	8,13	8,02	18,99	13,21	660,73
28.10.2015	31,25	16,97	8,03	8,05	0,50	425,70	2323,69

S_1 kuni S_5 on tabelitest saadud skoorid, mis on koondatud kokku (Tabel 12). Iga gaasi skoorid on toodud lisades (Lisa 1 kuni Lisa 5). Kasutades valemit (1) arvutatakse välja jõutrafo eluea indeks.

Tabel 12. Imavere piirkonnaalajaama trafo C1T eluea indeks

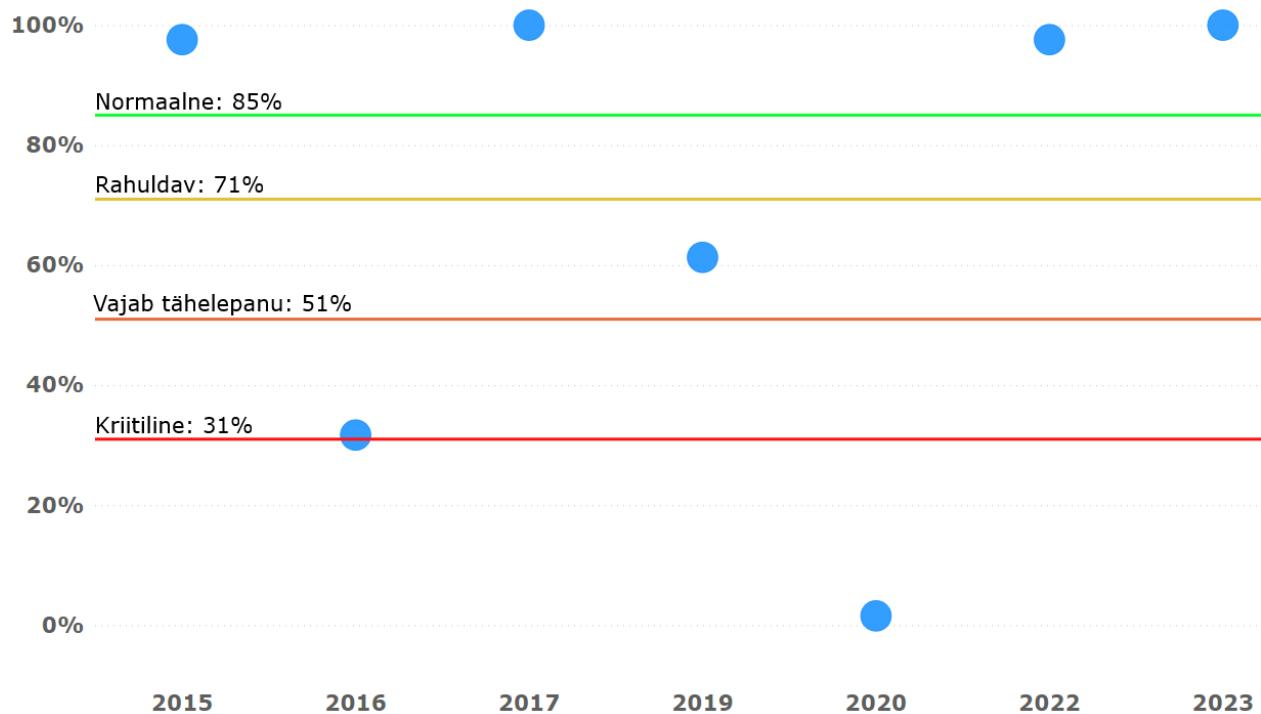
Kuupäev	S₁	S₂	S₃	S₄	S₅	HI	HI, %
18.10.2023	3	3	3	3	3	3,00	100
05.12.2022	3	1	3	3	3	2,93	98
05.11.2020	0	0	0	0	2	0,05	2
23.10.2019	2	0	0	0	2	1,86	62
31.10.2017	3	3	3	3	3	3,00	100
22.11.2016	3	2	3	3	3	2,96	99
22.03.2016	3	3	3	3	3	3,00	100
10.03.2016	1	0	0	0	2	0,95	32
28.10.2015	3	0	3	3	3	2,89	96

Selleks, et tulemused oleksid paremini mõistetavad on eluea indeks ümber arvutatud protsentuaalseteks väärustusteks (Tabel 13).

Tabel 13. Eluea indeksi jaotus [7]

Staatus	HI	HI, %
Normaalne	2,55 – 3,00	85 - 100
Rahuldag	2,13 – 2,54	71 - 84
Vajab tähelepanu	1,53 – 2,12	51 - 70
Kriitiline	0,93 – 1,52	31 - 50

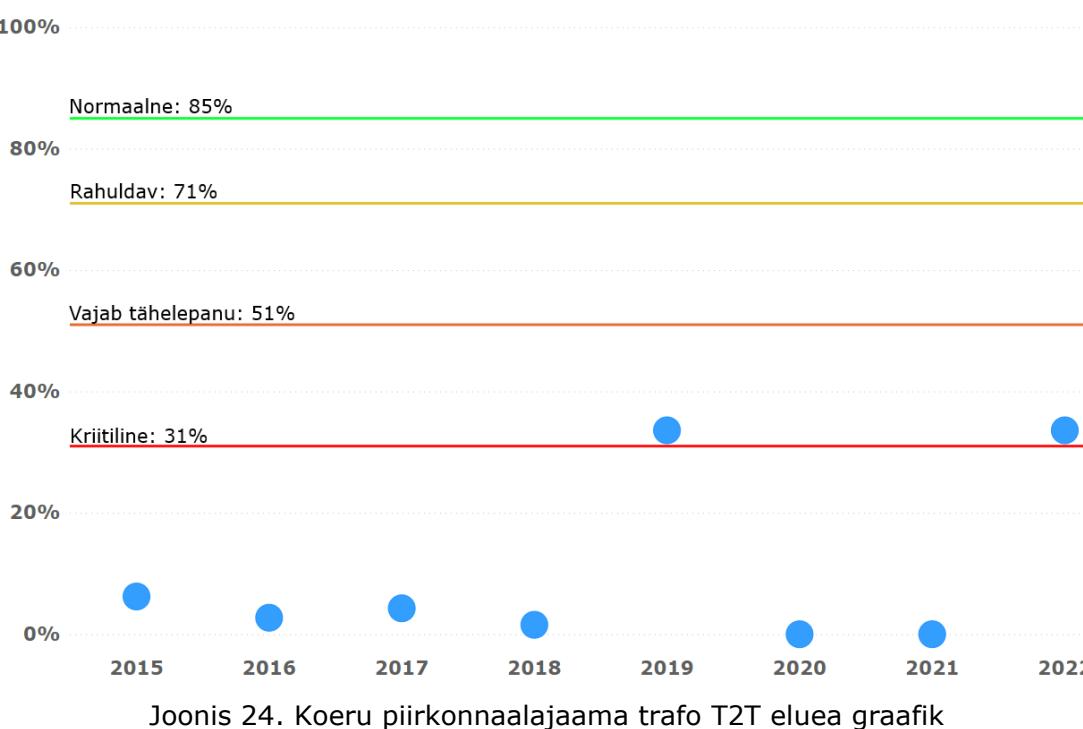
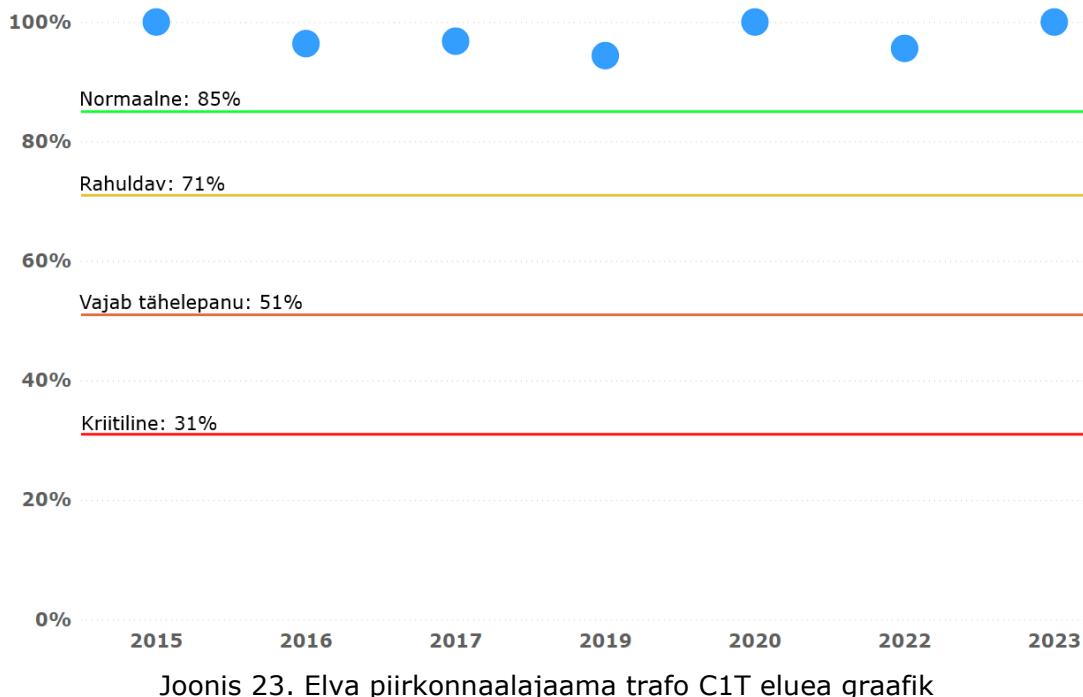
Kui väärthus jäääb alla 31% siis loetakse trafo seisukorda samuti kriitiliseks.



Joonis 22. Imavere piirkonnaalajaama trafo C1T eluea hinnang erinevatel aastatel

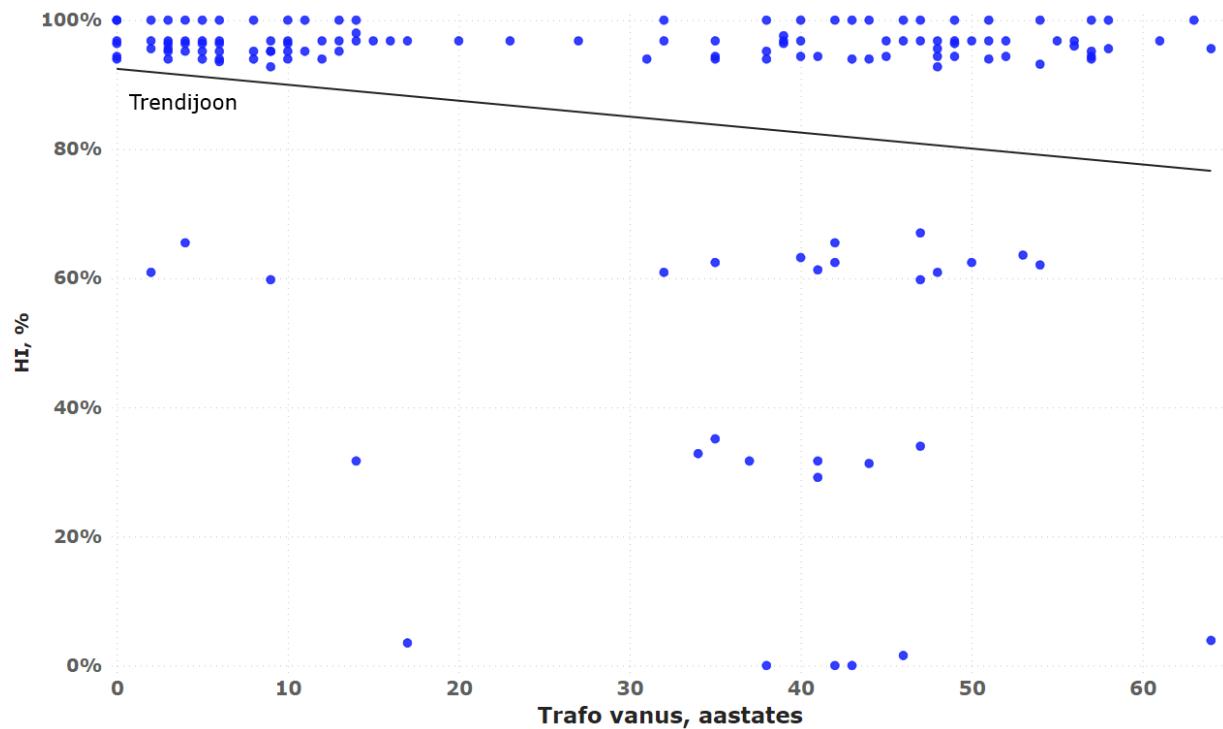
Eluea graafiku kõikumine on tingitud atsetüleeni kogusest, mis on tulemuste järgi kõikunud läbi aastate. Selleks, et täpsemalt aru saada, mis protsess seal toimus, kasutati Duvali kolmnurga meetodit, mis diagnoosis D1 ehk madala energiaga lahenduse, ja võtmegaaside meetodit, mille hinnangul oli tegemist ülekuumenenud paberisolatsiooniga. Trafo õli kuumenemisel kiireneb paberisolatsiooni vananemine (Joonis 27), kui oleks furaanide mõõtmise võimekus, saaksime hinnata paberisolatsiooni kulumist ja seisukorda.

Toon võrdlusesse veel kahe erineva õlitrafo graafikud.

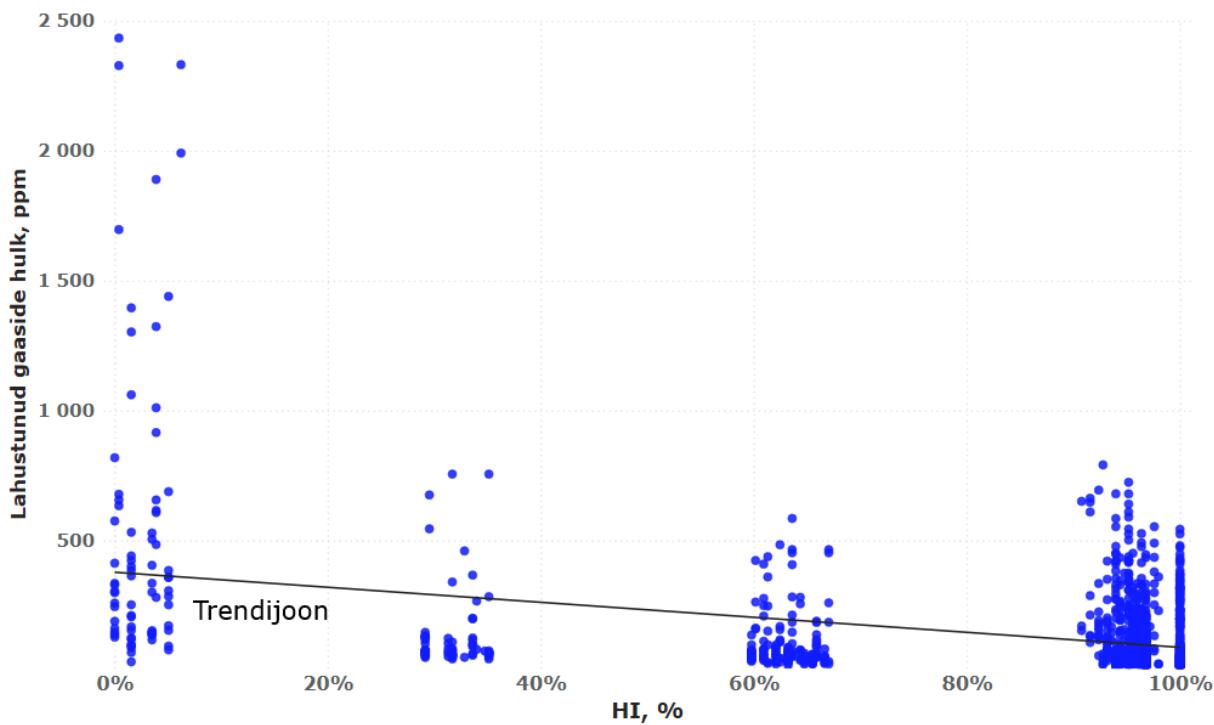


Autor on võrdlusesse toonud kaks erineva väärtsusega trafot, kus Elva piirkonnaalajaama trafo C1T on uus trafo mille seisukord on hea (Joonis 23) ja Koeru piirkonnaalajaama trafo T2T mille seisukord oli kriitiline (Joonis 24).

Selleks, et leida kasulikke seoseid ja kinnitada meetodi õigsust uuris lõputöö autor gaaside korrelatsioone.



Joonis 25. Trafo vanuse ja eluea indeksi, %, seos 2023. aasta mõõteandmete põhjal



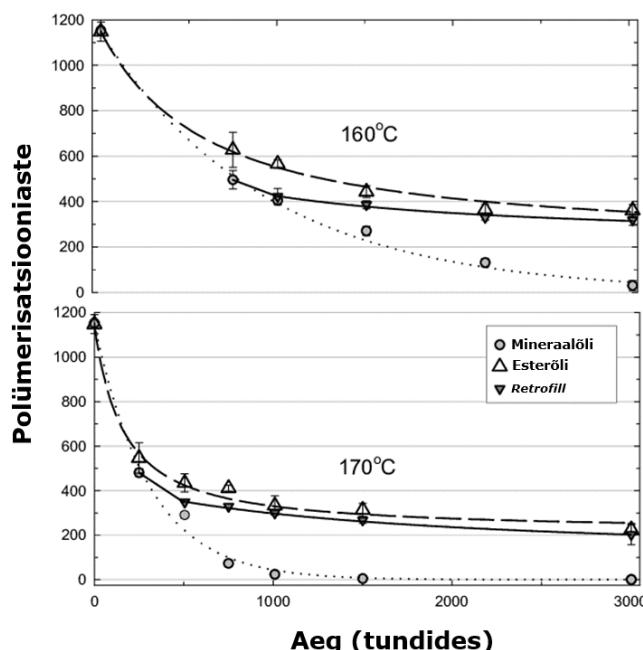
Joonis 26. Trafo eluea indeksi, %, ja kogu lahustunud gaaside, ppm, seos

Analüüs tulemustest selgus (Joonis 25), et mida vanem on trafo, seda madalam on trafo eluea indeks, selline tulemus on ootuspärane ja kinnitab, et meetodit saab usaldada. Rõhku tuleb panna just kriitilistele trafode välja selgitamisele, kuna need on varustuskindluse vaates kõige riskantsemad. Analüüs selgusid 14 kriitilises seisus trafot, millest 11 on vanuse vahemikus 30...50 ehk see on trafode riskigrupp. Alajaama rekonstrueerimise ja trafo vahetuse kavandamisel oleks mõistlik võtta antud info arvesse.

Uurides lahustunud gaaside hulga seost trafo eluea indeksiga (Joonis 26) saab järeldada, et mida rohkem lahustunud gaase on trafos, seda halvem on tema seisukord. Väljatoodud seost saab rakendada *online*-tüüpi gaasianalüsaatoritega, millel on lahustunud gaaside hulga mõõtmise võimekus näitamaks, et trafos on toimumas protsessid, mis vähendavad trafo eluiga.

3.3. Arendusvõimalused

Õlitrafo eluea peamine mõjutaja on õli temperatuur. Trafo paberisolatsioon koosneb lineaarsetest polümeeridest, kus me saame võtta keskmise tselluloosi molekulide pikkuse ja selle põhjal hinnata polümerisatsiooniastet, uutes trafodes on paberisolatsiooni polümerisatsiooniaste 900-1200 ja eluea lõpus 200. Polümerisatsiooniaste on otseeses seoses trafo õli temperatuuriga (Joonis 27), kus kõrgematel temperatuuridel laguneb paberisolatsioon ehk tselluloos kiiremini ja tekivad furaanid [15].



Joonis 27. Polümeeride tekke ja aja seos [16]

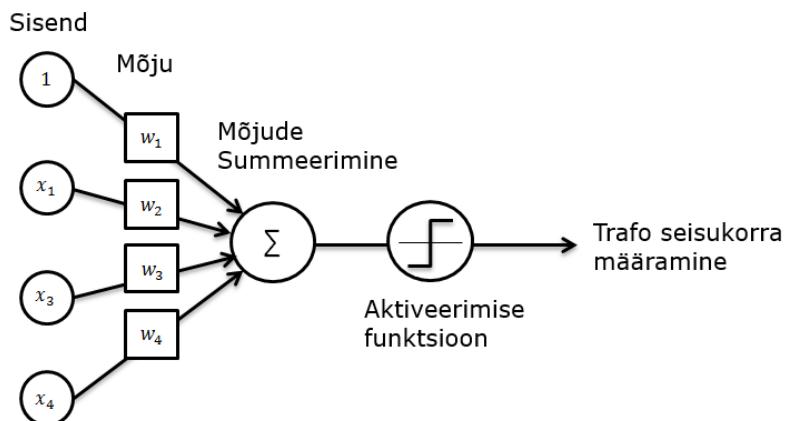
Furaanide analüüs jaoks on vaja gaaskromatograaf-massispektromeetrit ehk labori olemasolu mida Elektrilevi OÜ hetkel ei oma.

Edaspidi saab uurida masinõppe rakendamist gaasianalüüside hindamiseks ja eluea indeksi arvutamiseks, kus saame rakendada järgnevaid aktiveerimise funktsioone või algoritme:

- ANN-LM ehk *artificial neural network – Levenberg Marquardt*
- ANN-BR ehk *artificial neural network – Bayesian Regularisation*
- ANN-SCG ehk *artificial neural network – Scaled Conjugate Gradient*

ANN-BR (*artificial neural network - Bayesian Regularisation*) algoritm annab käsitsi arvutustele köige ligilähedasemaid tulemusi [7, lk 5].

Masinõppimise protsess trafo seisukorra hindamiseks (Joonis 28).



Joonis 28. Masinõppimise protsess

Masinõppe õpetamise mudelil annab inimene ette sisendi, lõputöö raames on sisendiks DGA mõõteandmed ja meetodi mõju. Mõjude summeerimine ja aktiveerimise funktsioon toimub masinõppe mudeli sees, kus kasutatakse tehisneuroneid. Masinõppe mudel summeerib kokku väärused ja aktiveerib funktsiooni algoritmi.

KOKKUVÕTE

Elektrilevi OÜ jaotusvõrgus on keskmise jõutrafo vanus 28 aastat, nimikoormusele koormatud jõutrafode eluiga on trafo tootja hinnangul 180 000 tundi ehk ~21 aastat. Jaotusvõrgule ootused ja vajadused kasvavad seoses inimeste tarbimise vajaduste suurenemisega, päikeseparkide liitumiste ja mikrotootjate kasvuga. Trafo hinnangulise eluea kasvuga ja koormuste suurenemisest tingituna on tähtis omada ülevaadet trafode seisukorrast, eluea indeks on selleks tõhus meetod. Lõputöös selgus, et kõige kriitilisem vanus trafodele on 30...50 aasta vahel. Elektrilevi OÜ jaotusvõrgus olevad trafod on heas seisukorras ja lõputöös selgus 14 kriitilist trafot, mis vajaksid tähelepanu. Parandama peaks gaasianalüüside teostamise protsessi, kus hetkel kasutuses olevas protsessis raskendab trafo seisukorra hindamist.

Tänaseks päevaks *online*-tüüpi DGA ei ole piisavalt kiire, et kasutada neid rikete ennetamiseks, kuid varustuskindluse seisukohalt on need tähtsad, kuna need annavad ülevaate jõutrafos toimuvatest protsessidest ja annavad indikatsiooni enne gaasikaitse rakendumist. *Online*-tüüpi gaasianalüsaatorid on kallid ja nõuavad spetsiifilist paigaldust vastavalt trafo tüübile.

Lõputöös käsitletud metoodikat ja tulemusi saaks kasutada alajaamade rekonstrueerimise ja trafode vahetuse kavandamisel, lisaks hetkel kasutuses olevatele metoodikatele. Uurimuses on välja toodud soovituslikud tegevused kriitiliste mõõteandmete puhul, mida võiks rakendada hooldustööde kavandamisel. Probleemeks kohaks kujuneb metoodika arvutused, kuna need on enamasti käsitsi tegevused, mida tuleks teha iga aasta ~300...450 trafo mõõteandmetega, mistõttu oleks mõistlik arendada välja masinõppimise mudel, mis teeks arvutusprotsessi automaatselt. Uurimuses käsitletud indeksi metoodika on sobilik masinõpppe mudeli arenduseks, kus ANN-BR (*artificial neural network - Bayesian Regularisation*) algoritm annab käsitsi arvutustele ligilähedasemaid tulemusi.

SUMMARY

The title of the thesis is "*Estimation of Remaining Life of Power Transformers Based on Monitoring Data*".

This thesis presents an analytical study conducted within the Elektrilevi OÜ distribution network, focusing on the estimation of the remaining operational life of oil-filled power transformers. The average operational age of these transformers is observed to be 28 years, exceeding the anticipated service duration of 21 years, as designated by transformer manufacturers. The increase of large-scale solar parks and the rise of energy production heighten the importance of accurately assessing the remaining life of power transformers. Utilizing the health index methodology proves to be effective for evaluating the condition of transformers.

Online Dissolved Gas Analyzers (DGA) are not suited for immediate transformer fault prevention, but they are important for ensuring supply security. They offer an overview of the internal processes of power transformers and provide preemptive indications prior to the activation of relay protection mechanisms. This research investigates the correlations between transformer load characteristics and gas concentration levels to derive meaningful patterns that can inform assessments of transformer longevity. The prohibitive costs and specific installation requirements associated with online gas analyzers render portable gas analyzers a more economical and versatile alternative, although at the expense of continuous monitoring capabilities.

The thesis methodology consists of five methods to evaluate the condition and remaining life of power transformers. This methodology was selected to lay the groundwork for future development of a machine learning model. The findings and methodologies presented in this thesis are recommended for application in the strategic planning of distribution substation upgrades and oil transformer replacements. Suggestions for essential measurements on transformers nearing the end of their expected lifespan have been made, emphasizing the importance of incorporating these recommendations into the maintenance planning process. One limitation of the methodology is the labor-intensive nature of its calculations, which must be performed manually for approximately 300 to 450 power transformers annually, so machine learning model capable of automating this process is recommended. The methodology used in this thesis is suitable for machine learning adaptation, with the Artificial

Neural Network - Bayesian Regularization (ANN-BR) algorithm giving most accurate estimations to manual computations.

VIIDATUD ALLIKAD

- [1] R. M. D. V. Ahuja Bertrand Poulin, Pierre T. Feghali, Dilipkumar M. Shah, Rajendra, *Transformer Design Principles: With Applications to Core-Form Power Transformers*. London: CRC Press, 2001. doi: 10.1201/9781420021943.
- [2] „Силовой масляный трансформатор третьего габарита устройство | Трансформаторы | Справка”. Vaadatud: 27. jaanuar 2024. [Online]. Available at: <https://forca.ru/spravka/transformatory/silovoy-maslyany-transformator-tretego-gabarita-ustroystvo.html>
- [3] „EE_ins_EEV5090_TRAFO_V2.pdf”. Vaadatud: 30. aprill 2024. [Online]. Available at: https://haldus.taltech.ee/sites/default/files/2020-02/EE_ins_EEV5090_TRAFO_V2.pdf
- [4] „Figure 3: Inner convection circle of an OFAF transformer”, ResearchGate. Vaadatud: 29. märts 2024. [Online]. Available at: https://www.researchgate.net/figure/Inner-convection-circle-of-an-OFAF-transformer_fig2_237425866
- [5] O. J. C, „Cooling of Transformers”, Owlcation. Vaadatud: 29. märts 2024. [Online]. Available at: <https://owlcation.com/stem/Cooling-of-transformers>
- [6] „What is the life expectancy of a transformer? 20, 30, or 40+ years? | Bowers Electrical Ltd”. Vaadatud: 1. aprill 2024. [Online]. Available at: <https://www.bowerselec.co.uk/insights/life-expectancy-of-a-transformer/>
- [7] A. M. Abd Aziz, A. M. M. Muhayeddin, M. F. I. M. Supian, M. A. Talib, A. F. Abidin, ja S. A. M. Al Junid, „Assessment of Transformer Health Index Based on Dissolved Gas Analysis”, *2023 IEEE International Conference on Applied Electronics and Engineering (ICAEE)*, sept 2023, lk 1–5. doi: 10.1109/ICAEE58583.2023.10331147.
- [8] „Transformer Oil: Testing, Types & Properties | Electrical4U”, <https://www.electrical4u.com/>. Vaadatud: 28. jaanuar 2024. [Online]. Available at: <https://www.electrical4u.com/transformer-insulating-oil-and-types-of-transformer-oil/>
- [9] Edwell. T. Mharakurwa, George. N. Nyakoe, ja A. O. Akumu, „Transformer Insulation Degree of Polymerization Estimation through Adaptive Neuro Fuzzy Inference System Approach”, *2019 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*, juuni 2019, lk 160–162. doi: 10.1109/EIC43217.2019.9046632.
- [10] S. Bustamante, M. Manana, A. Arroyo, P. Castro, A. Laso, ja R. Martinez, „Dissolved Gas Analysis Equipment for Online Monitoring of Transformer Oil: A Review”, *Sensors*, kd 19, nr 19, Art. nr 19, jaan 2019, doi: 10.3390/s19194057.
- [11] „GE_Kelman_TRANSPORT_X_User_Manual.pdf”. Vaadatud: 27. jaanuar 2024. [Online]. Available at: https://www.cse-uniserve.com.au/pdf/GE_Kelman_TRANSPORT%20X_User_Manual.pdf
- [12] „IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Mineral Oil-Immersed Transformers”, *IEEE Std C57104-2019 Revis. IEEE Std C57104-2008*, lk 1–98, nov 2019, doi: 10.1109/IEEESTD.2019.8890040.
- [13] „Transformer reliability survey”. Vaadatud: 1. mai 2024. [Online]. Available at: <https://www.e-cigre.org/publications/detail/642-transformer-reliability-survey.html>
- [14] „The Duval triangle explained in 3 minutes”. Vaadatud: 28. jaanuar 2024. [Online]. Available at: <https://www.reinhauen.com/the-duval-triangle-explained-in-3-minutes>
- [15] „IEEE Standards Association”, IEEE Standards Association. Vaadatud: 1. aprill 2024. [Online]. Available at: <https://standards.ieee.org>
- [16] „Figure 2: Degree of polymerization versus time at temperature for...”, ResearchGate. Vaadatud: 1. aprill 2024. [Online]. Available at: https://www.researchgate.net/figure/Degree-of-polymerization-versus-time-at-temperature-for-thermally-upgraded-Kraft-paper-in_fig2_4049856

LISAD

Lisa 1. Võtmegaaside skoor

Lisa 2. Gaasi juurdekasvu määär

Lisa 3. IEEE Gaaside kontsentratsioonid

Lisa 4. CIGRE Gaaside suhe

Lisa 5. Duvali analüüs

Lisa 1. Võtmegaaside skoor

Võtmegaaside skoor, ppm												
Kuupäev	H ₂	S _{1.1}	CH ₄	S _{1.2}	C ₂ H ₆	S _{1.3}	C ₂ H ₄	S _{1.4}	C ₂ H ₂	S _{1.5}	S ₁	
18.10.2023	5,00	3	2,97	3	2,55	3	1,00	3	0,50	3	3	
05.12.2022	5,00	3	3,34	3	2,95	3	1,00	3	0,50	3	3	
05.11.2020	8,93	3	11,81	3	5,99	3	13,12	3	75,89	0	0	
23.10.2019	5,00	3	5,49	3	4,44	3	4,60	3	12,79	2	2	
31.10.2017	5,00	3	2,48	3	6,10	3	5,64	3	0,50	3	3	
22.11.2016	5,00	3	4,05	3	13,28	3	7,79	3	0,53	3	3	
22.03.2016	5,00	3	1,51	3	8,98	3	2,44	3	1,70	3	3	
10.03.2016	5,00	3	1,71	3	8,13	3	8,02	3	18,99	1	1	
28.10.2015	31,25	3	16,97	3	8,03	3	8,05	3	0,50	3	3	

Lisa 2. Gaasi juurdekasvu määr

Gaaside juurdekasvu määr, Δ ppm																
Kuupäev	H ₂	S _{2.1}	CH ₄	S _{2.2}	C ₂ H ₆	S _{2.3}	C ₂ H ₄	S _{2.4}	C ₂ H ₂	S _{2.5}	CO	S _{2.6}	CO ₂	S _{2.7}	S ₂	
18.10.2023	0,00	3	-0,37	3	-0,40	3	0,00	3	0,00	3	-159,82	3	168,48	3	3	
05.12.2022	-3,93	3	-8,47	3	-3,04	3	-12,12	3	-75,39	3	101,62	1	206,65	3	1	
05.11.2020	3,93	3	6,32	2	1,55	3	8,52	3	63,10	0	8,81	3	57,06	3	0	
23.10.2019	0,00	3	3,01	3	-1,66	3	-1,04	3	12,29	2	387,12	0	239,90	3	0	
31.10.2017	0,00	3	-1,57	3	-7,18	3	-2,15	3	-0,03	3	3,93	3	-61,54	3	3	
22.11.2016	0,00	3	2,54	3	4,30	2	5,35	3	-1,17	3	-311,75	3	163,49	3	2	
22.03.2016	0,00	3	-0,20	3	0,85	3	-5,58	3	-17,29	3	315,21	3	2,75	3	3	
10.03.2016	-26,25	3	-15,26	3	0,10	3	-0,03	3	18,49	0	-412,49	3	-1662,96	3	0	

Lisa 3. IEEE Gaaside kontsentratsioonid

IEEE Standardist tulenevad gaaside kontsentratsioonid, ppm																
Trafo paigalduse aasta 2011																
Kuupäev	H ₂	S _{3.1}	CH ₄	S _{3.2}	C ₂ H ₆	S _{3.3}	C ₂ H ₄	S _{3.4}	C ₂ H ₂	S _{3.5}	CO	S _{3.6}	CO ₂	S _{3.7}	S ₃	
18.10.2023	5,00	3	2,97	3	2,55	3	1,00	3	0,50	3	358,33	3	1437,52	3	3	
05.12.2022	5,00	3	3,34	3	2,95	3	1,00	3	0,50	3	518,15	3	1269,04	3	3	
05.11.2020	8,93	3	11,81	3	5,99	3	13,12	3	75,89	0	416,53	3	1062,39	3	0	
23.10.2019	5,00	3	5,49	3	4,44	3	4,60	3	12,79	0	407,72	3	1005,33	3	0	
31.10.2017	5,00	3	2,48	3	6,10	3	5,64	3	0,50	3	20,60	3	765,43	3	3	
22.11.2016	5,00	3	4,05	3	13,28	3	7,79	3	0,53	3	16,67	3	826,97	3	3	
22.03.2016	5,00	3	1,51	3	8,98	3	2,44	3	1,70	3	328,42	3	663,48	3	3	
10.03.2016	5,00	3	1,71	3	8,13	3	8,02	3	18,99	0	13,21	3	660,73	3	0	
28.10.2015	31,25	3	16,97	3	8,03	3	8,05	3	0,50	3	425,70	3	2323,69	3	3	

Lisa 4. CIGRE Gaaside suhe

CIGRE Gaaside suhe, Δ ppm																
Kuupäev	H ₂	CH ₄	H ₂ /CH ₄	S _{4.1}	Diagoos	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆	S _{4.2}	Diagoos	C ₂ H ₂	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂ /C ₂ H ₆	S _{4.3}	Diagoos	S ₄
18.10.2023	5,00	2,97	2	3	Normaalne	1,00	2,55	0	3	Normaalne	0,50	2,55	0	3	Normaalne	3
05.12.2022	5,00	3,34	1	3	Normaalne	1,00	2,95	0	3	Normaalne	0,50	2,95	0	3	Normaalne	3
05.11.2020	8,93	11,81	1	3	Normaalne	13,12	5,99	2	1	Termiline rike	75,89	5,99	13	0	Kaar	0
23.10.2019	5,00	5,49	1	3	Normaalne	4,60	4,44	1	3	Normaalne	12,79	4,44	3	0	Kaar	0
31.10.2017	5,00	2,48	2	3	Normaalne	5,64	6,10	1	3	Normaalne	0,50	6,10	0	3	Normaalne	3
22.11.2016	5,00	4,05	1	3	Normaalne	7,79	13,28	1	3	Normaalne	0,53	13,28	0	3	Normaalne	3
22.03.2016	5,00	1,51	3	3	Normaalne	2,44	8,98	0	3	Normaalne	1,70	8,98	0	3	Normaalne	3
10.03.2016	5,00	1,71	3	3	Normaalne	8,02	8,13	1	3	Normaalne	18,99	8,13	2	0	Kaar	0
28.10.2015	31,25	16,97	2	3	Normaalne	8,05	8,03	1	3	Normaalne	0,50	8,03	0	3	Normaalne	3

Lisa 5. Duvali analüüs

Duvali kolmnurk							
Kuupäev	H ₂	C ₂ H ₄	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₆	Diagnoos	S ₅
18.10.2023	5,00	1,00	2,97	0,50	2,55	Normaalne	3
05.12.2022	5,00	1,00	3,34	0,50	2,95	Normaalne	3
05.11.2020	8,93	13,12	11,81	75,89	5,99	D1	2
23.10.2019	5,00	4,60	5,49	12,79	4,44	D1	2
31.10.2017	5,00	5,64	2,48	0,50	6,10	Normaalne	3
22.11.2016	5,00	7,79	4,05	0,53	13,28	Normaalne	3
22.03.2016	5,00	2,44	1,51	1,70	8,98	Normaalne	3
10.03.2016	5,00	8,02	1,71	18,99	8,13	D1	2
28.10.2015	31,25	8,05	16,97	0,50	8,03	Normaalne	3