



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
INSENERITEADUSKOND

---

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

**KESKPINGEALAJAAMA KAITSE- JA  
AUTOMAATIKASÜSTEEM TSENTRALISEERITUD  
SÜSTEEMI PLATVORMINA SASENSORI NÄITEL**

CENTRALIZED SYSTEM PLATFORM AS PROTECTION AND AUTOMATION  
SYSTEM FOR HV/MV SUBSTATION WITH SASENSOR EXAMPLE

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Aleksandr Koskin

Üliõpilaskood: 144153AAVM

Juhendajad: Dots. Jako Kilter  
Priit Feldt

Tallinn, 2017.a.

## AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

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

“.....” ..... 201.....

Autor: .....

/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

“.....” ..... 201.....

Juhendajad: .....

.....

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....” .....201... .

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ nimi ja allkiri /

# Lõputöö kokkuvõte

*Autor:* Aleksandr Koskin

*Lõputöö liik:* Magistritöö

*Töö pealkiri:* KESKPINGEALAJAAMA KAITSE- JA AUTOMAATIKASÜSTEEM TSENTRALISEERITUD SÜSTEEMI PLATVORMINA SASENSORI NÄITEL

*Kuupäev:* 25.05.2017

92 lk

*Ülikool:* Tallinna Tehnikaülikool

*Teaduskond:* Inseneriteaduskond

*Instituut:* Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

*Töö juhendajad:* dots. Jako Kilter, Priit Feldt

*Sisu kirjeldus:*

Lõputöö eesmärk on lugejale alajaama tsentraliseeritud releekaitse- ja juhtimise süsteemi(CPC) vastu huvi tekitamine ja selle teadlikkuse tõstmine. Sujuvaks teema sissejuhatuses oli teostatud: alajaama varustuse tutvustamine; seire- ja juhtimise eesmärkide tutvustamine; digitaalsete alajaamade põhimõtete esile toomine; hajutatud- ja CPC süsteemi mõistete ning põhimõtete tutvustamine. Järgnevalt oli uuritud hajutatud ja tsentraliseeritud arhitektuuride võimekus. Uuringu käigus oli teostatud ka umbkaudne majanduslik analüüs, mis näitas CPC süsteemi ülekaalukat eelist. Seejärel olid tutvustatud CPC süsteemi SASensor® omadused ja põhimõtted ning uuriti Eesti esimest Elektrilevi CPC pilootprojekti alajaamas 808. Küsitleti SASensor® süsteemi kasutamiskogemusest Elektrilevi (Eesti) ja Ellevio (Rootsi) spetsialistidelt. Vastuste põhjal oli koostatud võrreldav analüüs, mis peegeldab praktilisi eeliseid ja probleeme tsentraliseeritud süsteemi kasutamisel alajaamades. Enne testimist TTÜ laboris koostati toite- ja andmeside skeem, mille järgi oli kokku pandud SASensor® demosüsteem. Jada katsetusi (mõõtmise, kaitsefunktsioonid, häiresalvesti, kommunikatsioon) oli läbi viidud ning nende tulemused on esile toodud ja analüüsitud. Analüüsi järgi autori poolt oli toodud esile CPC süsteemi positiivsed ja negatiivsed küljed. Autori arvates on tööd tervikuna võimalik kasutada põhjaliku analüüsi algpunktina CPC süsteemi kasutusele võtmiseks alajaamas.

*Märksõnad:* tsentraliseeritud süsteem, CPC, alajaama kaitse ja juhtimine, elutsükli kulud, rekonstrueerimine, alajaam, võrguettevõtte, kõrgresolutsioonilised mõõtmised, avatud platvorm, moodulpõhine süsteem, häiresalvesti, algoritm

# Summary of the Diploma Work

*Author:* Aleksandr Koskin

*Type of the work:* Master's thesis

*Title:* CENTRALIZED SYSTEM PLATFORM AS PROTECTION AND AUTOMATION SYSTEM FOR HV/MV SUBSTATION WITH SASENSOR EXAMPLE

*Date:* 25.05.2017

92 pages

*University:* Tallinn University of Technology

School of Engineering

*Department:* Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics

*Tutors of the work:* Associate professor Jako Kilter, Priit Feldt

*Abstract:*

The aim of this thesis is to awake reader's interest related to substation centralised protection and control(CPC) and raise awareness about this topic. For a smooth introduction to the topic several activities were performed: substation equipmend was presented; the aim of monitoring and control was introduced; main ideas of digital substation were shown; the terms and main ideas of distributed and centralised systems were presented. Further there were studied abilities of distributed and centralised architectures. In the course of the study a rough economic analysis was performed. As a result of analysis the CPC system has considerable advantage. After that the CPC system SASensor® properties and concept were introduced. The first CPC system in Estonia on the substation 808 of Elektrilevi was studied. A survey related to usage practice of the SASensor® system was conducted among Elektrilevi (Estonia) and Ellevio (Sweden) specialists. Based on the survey answers a comparative analysis, which reflects the practical benefits and problems of using the CPC on substations, was compiled. Before testing in TUT labor in order to assemble the SASensor® demo system the supply and communication schemes were drawn. A sequence of tests (measuring, protection functions, fault recorder, communication) were performed and the results were revealed and analyzed. After the analysis author brings forward pros and cons of the CPC system. In the opinion of the author the thesis can be utilized as the start point for further analysis evaluating the possibility of using the CPC system within a substation.

*Key words:* centralized system, CPC, substation protection and control, lifecycle costs, retrofit, substation, grid utility, high resolution measurements, open platform, module based system, digital fault recorder, algorhytm

# Sisukord

<b>Lõputöö kokkuvõte .....</b>	<b>3</b>
<b>Summary of the Diploma Work.....</b>	<b>4</b>
<b>Lõputöö ülesanne.....</b>	<b>7</b>
<b>Eessõna .....</b>	<b>9</b>
<b>Lühendite loetelu .....</b>	<b>10</b>
<b>Sissejuhatus.....</b>	<b>11</b>
<b>1. Alajaam – elektrivõrgu arukas juhtimissõlm .....</b>	<b>14</b>
1.1. Elektrivõrgu juhtimine primaarseadmetest dispetšikeskuseni .....	15
1.1.1. Elektrivõrgud ja alajaamad.....	15
1.1.2. Alajaama primaar- ja sekundaarvarustuse ühendamine .....	16
1.1.3. Andmete kogumine ja selle eesmärgid .....	19
1.2. Digitaalne alajaam - elektrivõrgu juhtimissõlm.....	20
1.2.1. Alajaama sekundaarvarustus .....	20
1.2.2. Digitaalse alajaama kontseptsioon .....	22
1.3. Alajaama kaitse ja juhtimine hajutatult ning tsentraliseeritult .....	30
1.3.1. Hajutatud kaitse- ja juhtimissüsteem.....	30
1.3.2. Tsentraliseeritud kaitse- ja juhtimissüsteem.....	32
<b>2. Alajaama releekaitse ja juhtimise süsteemide arhitektuurid.....</b>	<b>35</b>
2.1. Releekaitse ja juhtimise süsteemi hajutatud ja tsentraliseeritud arhitektuuride näidised.....	36
2.1.1. Hajutatud arhitektuuri näidis .....	36
2.1.2. Tsentraliseeritud arhitektuuride näidised .....	38
2.2. Alajaama kaitse ja automaatika arhitektuur ja võrguettevõtte kulud .....	42
2.2.1. Hajutatud arhitektuuri elutsükli kulud.....	44
2.2.2. Tsentraliseeritud arhitektuuri elutsükli kulud.....	46
2.2.3. Arhitektuuride elutsükli kulude võrdlemine.....	48
<b>3. Tsentraliseeritud kaitse- ja juhtimissüsteemi rakendamise kogemus Eestis ja Rootsis .....</b>	<b>50</b>
3.1. Tsentraliseeritud kaitse- ja juhtimissüsteemi rakendamine Eesti jaotusvõrgus pilootprojektina .....	50
3.1.1. Tsentraliseeritud süsteemi SASensor® omadused ja riistvara .....	50
3.1.2. AJ 808 tutvustava ekskursiooni väljundid.....	56
3.2. Elektrilevi ja Ellevio automaatika spetsialistide arvamused SASensor®-i kasutamisest alajaamades 808 ja Kyrkviken .....	62
3.2.1. Elektrilevi ja Ellevio automaatika spetsialistide vastuste kokkuvõte .....	62
3.2.2. Elektrilevi ja Ellevio automaatika spetsialistide arvamuste eripärad .....	64
<b>4. Tsentraliseeritud kaitse- ja juhtimissüsteemi SASensor® praktiline väärtus ja katsetused.....</b>	<b>67</b>
4.1. Kõrge resolutsioonilised mõõtmised ja kaabli lühikeste ülimööduvate rikete tuvastamise meetodika tutvustamine .....	73
4.2. Kaitse testimine liigvoolu kaitse näitel ning häiresalvesti graafikute võrdlemine RTDS-i graafikutega.....	77
4.3. Kommunikatsiooni protokoll IEC 60870-5-104 Slave võimekuse testimine .....	81
4.4. Tsentraliseeritud süsteemi katsetamisel märgatud positiivsed ja negatiivsed küljed.....	83
<b>Kokkuvõte .....</b>	<b>84</b>

<b>Kirjandus .....</b>	<b>89</b>
<b>Lisad .....</b>	<b>92</b>
L.1. Küsimustiku eesti keelse variandi küsimused .....	92

# Lõputöö ülesanne

Lõputöö teema:	<b>Keskpingealajaama kaitse- ja automaatikasüsteem tsentraliseeritud süsteemi platvormina SASensori näitel</b>
Üliõpilane:	<b>Aleksandr Koskin, 144153AAVM</b>
Eriala:	<b>Elektroenergeetika</b>
Lõputöö liik:	Magistritöö
Lõputöö juhendajad:	Dots. Jako Kilter, Priit Feldt
Lõputöö ülesande kehtivusaeg:	1.07.2017
Lõputöö esitamise tähtaeg:	<b>25.05.2017</b>

---

Üliõpilane (allkiri)

---

Juhendajad (allkiri)

---

Instituudi direktor (allkiri)

## Teema põhjendus:

Alajaama tsentraliseeritud kaitse ja juhtimise süsteem sisuliselt ei ole uudis, kuid uute tänapäevaste IT tehnoloogiate ja alajaama seadmete arengu juures see sai uut arengu keerist. Euroopa kogemus *CPC(Centralised Protection and Control)*[6] kasutamises näitab, et see on võimas ja paindlik süsteem, mida on võimalik laiendada ilma selleta, et peaks riistvarat muutma. *CPC* arengut soodustab avatud platvormi idee, mis annab võimalust kasutada tarkvarat erinevatest arendajatest, mis ei sõltu riistvarast. Lihtsad ja töökindlad moodulid, mis asuvad primaarseadmete juures, annavad infot keskjuhtimisseadmele sidekanali kaudu ning kehtivad sama kaua, nagu primaarvarustus. Eestis ilmus võimalus katsetada seadet SASensor® *CPC* platvormi näidisena ning näha selle toimimist jaotusvõrgu alajaamas 808.

Teema on oluline autorile, nagu huvitatud isikule, võrguettevõtetele ja ülikoolile. Võrguettevõtte on sunnitud oma kulusi võrgu moderniseerimisele optimeerida, sest selle resurss on piiratud, aga võrgu arendus peab tagama võrgu püsivust aastaid ette. Teadlikkus *CPC* potentsiaalidest annab võimalust mõelda alternatiivsete lahenduste peale (antud juhul *CPC* pakub alternatiivseid lahendusi). Ülikool võib huvituda, näiteks, *CPC* algorütmide arendamisega, kuna IT teaduskonnas on palju andekaid ja silmapaistvaid tudengeid.

Isiklik huvi seisneb selles, et uurida kuidas antud süsteem oma ülesannetega hakkama saab, mis on selle eelised ja puudused, kuidas seda paigaldada ja katsetada. Antud töö parandab autori teadmisi automaatika ja releekaitse valdkonnas, andmesides ja suure andmehulga läbi töötamises.

### **Töö eesmärk:**

Töö eesmärgiks on tõsta teadlikkust tsentraliseeritud releekaitse ja automaatika süsteemidest ning selgitada välja nende eeliseid, puuduseid, tööpõhimõtet. Katsetada *CPC SASensor®* süsteemi ülikoolis. Vastata küsimusele kas on selle süsteemi kasutamine tulevikus Eesti elektrivõrkudele kasulik või mitte?

### **Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:**

1. Mis on *CPC*?
2. Kuidas näeb välja *CPC* arhitektuur ja palju kulub selle ehitamisele?
3. Mis on reaalne kasutamiskogemus Eestis ja Rootsis?
4. Mis on võimalik katsetada laboris *SASensor*-i abiga?

### **Lähteandmed:**

Andmete kogumist põhiliselt aitab juhendaja Priit Feldt. Lisaks, autor kasutab IEEEExplore andmebaasi, allikaid TTÜ raamatukogust, veebi otsingut.



# Eessõna

Töö idee algatajaks on autor. Täpsema teema sõnastust pakkus välja juhendaja Priit Feldt. Kooli poolt teema „Keskpingealajaama kaitse- ja automaatikasüsteem tsentraliseeritud süsteemi platvormina SASensori näitel“ vastu tundis huvi dotsent Jako Kilter. Põhilised algandmed tsentraliseeritud kaitsest on saadud Priit Feldt-i abiga. Küsitlus ja ekskursioon olid korraldatud Priit Feldt-i vahetu abiga. Elektrilevi poolt ekskursiooni alajaama 808 viis läbi automaatika osakonna spetsialist Kaspar Liibert. Tema abiga oli koostatud ülikoolis tsentraliseeritud süsteemi SASensor® testseade. Testseade ehitamiseks vajalikud lisamaterjalid olid antud firma Martem AS-i poolt juhataja Peter Nobel-i loal. Autor avaldab oma tänu ülikooli töötajatele, juhendajatele, Elektrilevi ja Ellevio automaatika spetsialistidele, Martem AS kollektiivile, Locamation spetsialistidele ideede ning osaluse eest.

# Lühendite loetelu

CPC – Centralised Protection and Control

HMI – Human-Machine interface

GOOSE – Generic Object Oriented Substation Event

RTDS – Real-Time Dynamic Simulator

IED - Intelligent Electronic Device

RTU – Remote Terminal Unit

SCADA – Supervisory Control and Data Acquisition

HV – High Voltage

MV – Medium Voltage

GW - Gateway

Cu juht – Vaskjuht

TCP/IP – Transmission Control Protocol/Internet Protocol

IMU – Intelligent Merging Unit

SA – Substation Automation

IEC – International Electrotechnical Commission

DI – Digital Input

DO – Digital Output

A/D – analog/digitaal

ASCII – American Standard Code for Information Interchange

# Sissejuhatus

Tänapäeval elektrivarustuskindluse tagamine on äärmiselt oluline aspekt võrguettevõtete tegevuse raames. Elektrivarustuskindluse tagamiseks on tarvis jälgida nii ülekande varustuse kui ka alajaamade primaar- ja sekundaarvarustuse seisukorda. Uue varustuse haldamise meetodika järgi arvutatakse välja varustuse eluiga. Eluea läbimisel sooritatakse varustuse vahetamist. Primaarseadmete eluiga on tavaliselt hinnatud normaalse ekspluatatsiooni korral 50 aasta pikk. Sekundaarvarustuse eluiga on arvestatud vahemikus 5-20 aastat. Tihti võrguettevõtte on sunnitud sooritama sekundaarvarustuse vahetust enne alajaama täis ümberehitust. Alajaama sekundaarvarustuse ja vana sekundaarvarustuse ahelate vahetust ning vanade kappide kasutamist nimetatakse *retrofit* (rekonstrueerimine). Tänapäevase seisuga Eesti jaotusvõrgus on suur hulk alajaamu, mis vajab täisrekonstruktsiooni. Sinna kuuluvad nii piirkonnaalajaamad, kui ka jaotusalajaamad. Piiratud resursside tõttu alajaamade renoveerimine pidurdub. Rekonstrueerimise lahenduste kaalutlemisel vaadeldakse nii majanduslikke, kui ka tehnilisi seisukohti. Suuremal osal juhtumitest on palju kergem alajaama uuesti ehitada. Rekonstrueerimise puhul võivad esile tulla ootamatud keerukused nn „veealused kivid“, mis ei olnud projekteerimisel arvestatud. Rekonstrueerimiseks pakutava süsteemi kasutusele võtmiseks on esitatud näiteks nende kriteeriumite võimaldamine: kulude vähendamine, lihtne integreeritavus olemasolevaga süsteemiga ja taristuga, vanade funktsioonide täitmise võimekus ning funktsionaalsuse laiendamine, ruumi sääst, juhitavuse ja turvalisuse parandamine, personali töötundide vähendamine, lihtsam käit jms.

Eestis on laialt levinud konventsionaalse lahtripõhise süsteemi kasutus nii uue alajaama sekundaarsüsteemi lahenduseks, kui ka rekonstrueerimiseks. Selle iga lahtri seire, kaitse ja juhtimise eest vastutab üks kindel füüsiline seade. Andmete kogumine ja saatmine juhtimiskeskusesse toimub tsentraliseeritult andmekontsentraatori või kaugterminali abil. Mõõtmised on ühendatud iga lahtriterminali vaskkaablitega. Lahtriterminal ja andmekontsentraator kasutab *Ethernet* võrku. Seda süsteemi edasi käsitletakse nagu hajutatud süsteemi. Hajutatud süsteem on tõestanud töökindlust ja funktsionaalsuse piisavust jaotusvõrkude oludes. Süsteemi põhieeliseks on selle populaarsus - see on hästi uuritud suure leviku tõttu. Võrguettevõtted on teadlikud hajutatud süsteemi positiivsetest ja negatiivsetest külgedest. Nad on teadlikud, milleks peab alajaama sekundaarsüsteem võimeline olema ja milliste funktsioonide kasutus tekitab ebamugavust. Seda uuritakse ka antud töö raames. Turul on olemas mitmeid lahtri- ja kaugterminalide tootjaid, kes pakuvad erineva

funktsionaalsusega, hinnaga ja töökindlusega tooteid. See annab võimalust võrguettevõttel valida just sellele sobivat varustust.

Lõputöö teema „Keskpingealajaama kaitse- ja automaatika süsteem tsentraliseeritud süsteemi platvormina SASensori näitel“ oli valitud autori isikliku huvi tõttu. Autor on huvitatud releekaitse ja automaatika süsteemide mitmekülgses uurimises. Huvi tsentraliseeritud süsteemi lähenemise vastu tekkis momendil, kui autor sai sellest teada. Lõputöö kirjutamine on seotud tsentraliseeritud süsteemi tutvustamisega ja uurimisega. Sekundaarsüsteemi valiku probleem on muutunud aktuaalseks Eesti jaotusvõrgu ettevõtete jaoks viimaste aastate jooksul seoses eelmainitud alajaamade renoveerimise vajadusega. Võrguettevõtetel on praegu olemas valik, kas minna konservatiivset teed pidi ja kasutada edasi hajutatud süsteemi või võtta kasutusele alternatiivse tsentraliseeritud süsteemi tehnoloogiat. See kehtib nii uute alajaamade rajamisele, kui ka vananenud alajaamade rekonstrueerimisele. Võrguettevõtte Elektrilevi OÜ on saanud esimese pilootprojektini tsentraliseeritud süsteemiga *SASensor*® alajaamas 808. Tsentraliseeritud süsteemi all mõeldakse süsteemi, mille keskel on üks võimas tööstuslik arvuti ja arvutusvõimekus igas lahtris enam ei ole vajalik. Arvuti protsesse juhib operatsioonsüsteem, mille baasil toimivad vajalikud algoritmid. Lahtrites paiknevad vaid andurid. Töö eesmärgiks on tutvustada tsentraliseeritud süsteemi põhimõtteid ja arhitektuure, majandusliku otstarbekust, vaadelda tehnilisest poolest selle positiivsed ja negatiivsed külgi, tutvustada reaalse tsentraliseeritud süsteemi *SASensor*® funktsioone ja väärtust. Üks *SASensor*® süsteem plaanitakse paigaldada arenduse keskusesse Mektory edasisteks uuringuteks. Erilist tähelepanu väärivad tsentraliseeritud süsteemi avatud platvormi idee. Avatud platvorm võimaldab arendada tarkvara igapäevase huvilise poolt. Autori arvates, tasub tööga tutvuda eelkõige võrguettevõtete automaatika ja alajaamade arenduse osakondade spetsialistidel. Tsentraliseeritud süsteem võib pakkuda huvi tulevikus ka infotehnoloogia esindajatel. On väga suur tõenäosus, et peale *SASensor*-i *Mektory*-sse paigaldamist hakatakse selle jaoks looma algoritme TTÜ IT teaduskonna õppeprogrammide raames. Lõppeesmärgiks on võrguettevõtete sekundaarsüsteemi loomise suhtes paradigmade murdmine.

Töö esimene osa on üldine osa. See on mõeldud lugejale tutvumiseks elektrivõrgu juhtimise alustega alajaama seisukohalt. Peatükis 1.1. kirjeldatakse lugejale alajaama põhiseadmeid. Kirjeldusele järgneb tutvumine standardi *IEC 61850* kihipõhilise ehitusega ja andmehõivega. Kirjeldatakse alajaama andmete kogumise eesmärki. Peatükis 1.2. tutvustatakse digitaalse alajaama mõistet. Peatükis räägitakse kuidas orienteeruda *IEC 61850* kihtides, tunda ära varustust ja aru saada selle toimimispõhimõtted. Eristatakse olulisemaid andmeside liiasuse

protokolle. Peatükis 1.3. on tutvustatud hajutatud ja tsentraliseeritud arhitektuuride iseärasusi. Selles peatükis lähtutakse kahe lahenduse erinevustest. Üldine osa ettevalmistab lugejat järgnevate osade kergemaks arusaamiseks.

Teine osa käsitleb arhitektuuride iseärasusi. Osa kirjeldusest on esile toodud Elektrilevi OÜ nõudmisi releekaitse terminalidele ja alajaama andmesidele. Peatüki 2.1. lõikudes 2.1.1 ja 2.1.2. käsitletakse hajutatud ning tsentraliseeritud arhitektuuride omadusi. Peatüki eesmärk on näidata tsentraliseeritud süsteemi paindlikkust andmeside arhitektuuri loomisel. Pööratakse tähelepanu toimimispõhimõtetele lähtudes arhitektuuride võimekusest. Jooniste peal on näidatud arhitektuuride põhimõttelised skeemid. Peatükis 2.2. on esitatud majanduslik analüüs elutsükli kulu meetodil ning selle väljundid. Lõikudes 2.2.1. ning 2.2.2. on esitatud hajutatud ning tsentraliseeritud arhitektuuride elutsükli kulude näidud tabelite kujul. Lõigul 2.2.3. on esitatud ühine graafik, mille alusel tehti võrguettevõtte sekundaarsüsteemide arhitektuuride elutsükli kulude võrreldavat analüüsi.

Kolmandas osas on kajastatud uurimustöö tulemused. Peatüki 3.1. lõigud 3.1.1. ja 3.1.2. tutvustavad süsteemi SASensor® omadusi ja koostisosi ning jutustavad Elektrilevi OÜ AJ 808 toimunud ekskursioonist. Põhiline tähelepanu pööratakse süsteemi paigaldamisele reaalses jaotusvõrgu alajaamas. Küsitlus, mille küsimused asuvad lisas L.1., oli läbiviidud Eesti ja Rootsi automaatika spetsialistidega. Analüüsitud vastused on kajastatud peatüki 3.2. lõikudes 3.2.1. ning 3.2.2. Arvamuste sarnasused ja arvamuste erinevused on loodud ettekujutust reaalsest tsentraliseeritud süsteemi saavutustest jaotusvõrgu alajaamades Eestis ja Rootsis.

Neljandas osas räägitakse SASensor-i® katsetustest. Süsteem, mis on kingitud TTÜ-le oli autori osalusega kokku pandud ja mõned funktsioonid olid katsetatud RTDS-i abil. Kirjeldus on sooritatud releekaitse inseneri huvide seisukohalt. Peatükis 4.1. on jutustatud kõrgresolutsioonilistest mõõtmistest. Oli katsetatud lühiajaliste transientide tuvastamise võimekus. See on vajalik kaabli tõsisemate rikete ennetamiseks. Peatükis 4.2. oli testitud maksikaitse toimimine. Võrreldud SASensor®-i häiresalvesti RTDS-i häiresalvestiga. Peatükis 4.3. SCADA oli emuleeritud tarkvaraga *The Vinci Expert*. Oli sooritatud üldküsitlus ning juhtimine. Samamoodi oli analüüsitud sisendite aktiivsus liigvoolu kaitse toimimise ajal.

# 1. Alajaam – elektrivõrgu arukas juhtimissõlm

Eesti elektrivõrk on muutunud suureks reaajas jälgitavaks intelligentseks süsteemiks, mida saab vaadelda tervikuna või osade kaupa ühest kohast dispetšisüsteemide abil. Eestis liigitatakse elektrivõrgu kaheks osaks – põhivõrk ning jaotusvõrk. Õigete otsuste vastu võtmine selleks, et võrk toimiks jätkusuutlikult on võimatu ilma kindlalt töötavate seire- ja juhtimissüsteemideta. Elektrivõrgu juhtimise eesmärkide täitmine on dispetšerite igapäevane vastutusetundlik töö. Elektrivõrgu juhtimise- ja seiresüsteemid asuvad osaliselt juhtimiskeskuse keskkonnas, osaliselt kohalikus keskkonnas – elektrivõrgu alajaamades.

Elektrivõrgu alajaama võib vaadelda andmehõive ja juhtimissõlmjena. Digitaalse alajaama põhimõtte ilmumine on muutunud võimalikuks tänu standardi *IEC 61850 Communication Systems and Networks in Substations* ilmumisele[1]. Antud standart käsitleb sidelahenduste implementeerimist alajaama sisevõrkudes. Elektroenergeetika eriala seisukohalt kaasaegsed sidesüsteemid omavad olulist rolli ning peavad olema tulevase inseneri väljaõpe kavas samavõrdselt koos releekaitse ainetega. Selleks, et aru saada mis on digitaalne alajaam, on kasulik uurida mis igapäevased ülesanded see peab täitma ja millisel viisil protokollid IEC 61850 rakendamine toimub. Samamoodi tänu IEC 61850 on mõned arvamused kaitse- ja juhtimissüsteemide ülesehitamisest muutunud. Võimekus mitte hoida kogu alajaama kaitseüsteemi „ühes karbis“ pakub järjest rohkem huvi nii alajaamade omanikele, kui ka releekaitse ja automaatika tootmisel põhinevatele ettevõtetele.

Lõputöö eesmärgiks on keskpinge alajaama tsentraliseeritud kaitse ja automaatika süsteemi esile toomine, selle vastu huvi äratamine ja teadlikkuse tõstmine. Tsentraliseeritud kaitse ja automaatika omab samasuguseid eesmärke ja võimekust nagu tänapäeval kasutatavad mikroprotsessori põhised lahtrite terminalid ning ei ole nendele vastand, vaid laiendus ja loogiline edasiareng. On plaanis teostada nii hajutatud kui ka tsentraliseeritud lähenemisviiside kirjeldamist ja illustreerimist. Alajaama releekaitse ja automaatika seadmed arenevad pidevalt ning muutuvad töökindlamaks, integreeritumaks ning paindlikumaks. Trendide jälgimine annab võimalust valida parimat lahendust konkreetse alajaama puhul.

## 1.1. Elektrivõrgu juhtimine primaarseadmetest dispetsikeskuseni

### 1.1.1. Elektrivõrgud ja alajaamad

Püsiv elektri tootmine ja üheaegne tarbimine on võimatu ilma töökindla elektrivõrgu olemasoluta. Maailmas toodetud elektrienergiat edastatakse kahel viisil:

1. Kolmeefaasilise vahelduvvoolu ülekannetega
2. Alalisvoolu ülekannetega

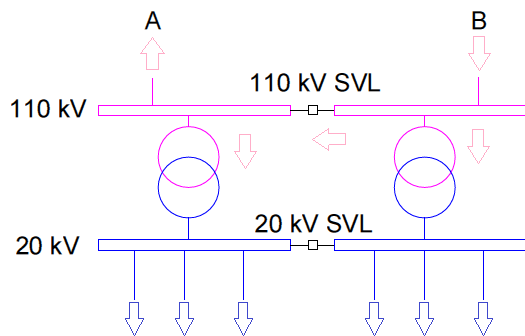
Esimene viis sobib rohkem piirkondliku võrgu loomiseks, sest siis pole vahemaad nii pikad, et esineksid suured kaod ja rajamine on märgatavalt odavam, sest pole vaja kalleid konverterjaamu ehitada. Erineva pinge nivooga võrgu ehitamine on samamoodi kergem, sest vahelduvpinget on kergem konverteerida trafode abil, kui alalispinget. Teine viis sobib hästi kahe elektrisüsteemide vaheliseks ühenduseks ning pikematele vahemaadele suurte võimsuste ülekandmiseks.

Tavaliselt liigitakse elektrivõrke ülikõrge- (330 kV ja kõrgem), kõrge- (110 kV), kesk- (6-35 kV) ja madalpingevõrkudeks (0,4-0,69-1 kV)[2]. Eestis liigitatakse võrke vastavalt nimipingele - 110-330 kV on põhivõrk, mida haldab ettevõtte Elering. Jaotusvõrguks on 0,4-35 kV võrgu osa, kus suuremad võrguettevõtted on: Elektrilevi, Imatra Elekter ning VKG Elektrivõrgud.[2] Eesti elektrivõrgul on olemas vahelduvvooluga välisühendused Venemaaga (3x330 kV liini) ja Lätiga (2x330 kV liini) ning 150 kV ja 450 kV alalisvoolukaablitega Soomega (Estlink 1 ja Estlink 2)[3].

Elektrivõrgu sõlmpunktideks on alajaamad. Alajaamade primaarseadmed on jaotla, jõutrafoad, mõõtetrafoad, kaarekustutuspoolid, põikreaktorid ja kondensaatorpatareid. Alaldamise alajaamades ka alaldamispaigaldis. Sekundaarseadmete hulka üldistatult kuuluvad mõõtemuundurid, mikroprotsessorpõhised seadmed (*IED* ning *RTU*), sideseadmed ja muud abisüsteemid. Eestis on põhivõrgul 146 alajaama[3], jaotuvõrgul üle 22000 alajaama[8], millest suurem osa on kaughallatav. Jaotusvõrgu piirkondlikud alajaamad joonisel 1.1., mis ühendavad omavahel põhi- ja jaotusvõrke nimetatakse inglise keeles *Primary Substation (HV/MV)*. Nooled näitavad normaalolukorras võimsuse liikumissuunda.

Tüüpiliselt on keskpinge (*HV/MV, High Voltage/Medium Voltage*) alajaam seotud ühelt poolt põhivõrguga, teiselt poolt jaotusvõrguga. Jaotusvõrgu otspunktideks on kiosk-alajaamad või tööstuslikud keskpinge alajaamad/jaotlad, mis alandavad pinget madalpingeks (*LV, Low*

Voltage) või kasutavad enda võrgus keskpinget. Kõrgepinge jaotlal (näiteks, 8DN8



### Joonis 1.1. HV/MV alajaama põhimõtteskeem

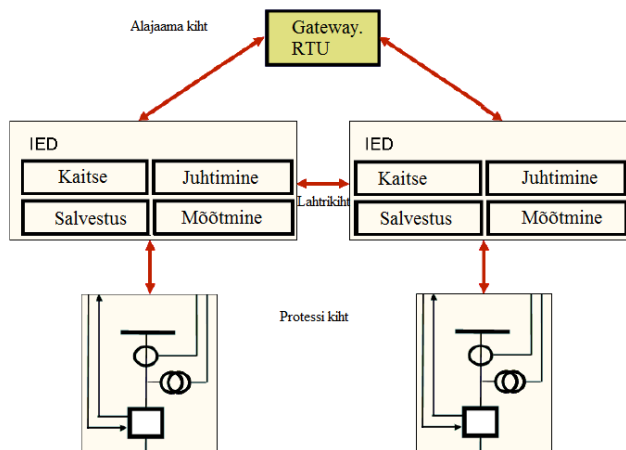
Siemensilt[4] on fiidrite liigid järgmised: sisendfiider, väljundfiider, pingetrafo (lattidel) fiider, jõutrafofiider, sektsioonide vaheline fiider (SVL). Igas fiidris on maanduslülitid, lahküliti, võimsuslülitid, pinge- ja voolutrafo. Keskpinge jaotlal on järgmised fiidri liigid: sisendfiider, väljundfiider, omatarbetafo fiider, pingetrafo (lattidel) fiider, kondensatorpatarei fiider, sektsioonide vaheline fiider (SVL). Igas fiidris on olemas võimsuslülitid, lahküliti, maanduslülitid, voolutrafo. Suurt kasutust leiavad kombilülid, nagu näiteks SF6 jaotusseadel NXPLUS-C[5] Siemensilt. Tavaliselt linna piirkonna keskpingejaotlast väljuvad kaabelliinid, maal aga õhuliinid. Selleks, et paremini hallata kadusid liinides, teostatakse alajaamas mõõtmiseid kaugloetavate arvestite abil.

#### 1.1.2. Alajaama primaar- ja sekundaarvarustuse ühendamine

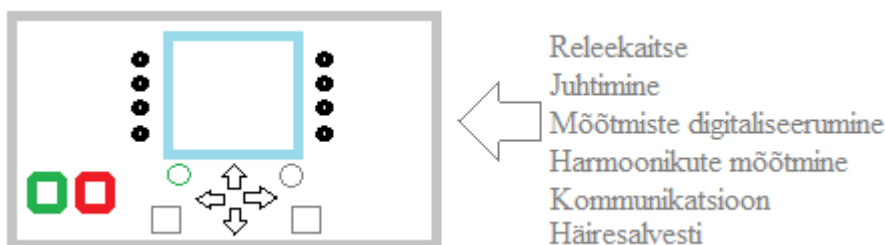
Selleks, et alajaama seisund oleks jälgitav ja juhitav peavad primaar- ja sekundaarseadmed olema omavahel kokku ühendatud. Alajaama sekundaarosa võib olla jaotatud füüsiliselt ja virtuaalselt kolme kihti vastavalt IEC 61850 standardile[1] (joonis 1.2.). Joonisel 1.2. esimeseks on protsessikiht, kus paiknevad primaarseadmed. Teine kiht on lahtrikiht, kuhu kuuluvad arvestid, juhtimis- ja releekaitseadmed (IED, Intelligent Electronic Device, joonis 1.3). Kolmas kiht on alajaama kiht, kus asub alajaama kaugjuhtimisseade (RTU, Gateway), mis suhtleb juhtimiskeskusega ning alajaama seadmetega andmeside kaudu.

Protsessikihi primaarseadmetel on olemas tehnoloogilised mehhanismid, mis on projekteeritud seireks ning muudavad oma kontaktide asendit siis, kui jälgitava varustuse seisund muutub füüsiliselt. Näiteks kui võimsuslülitid lülitub sisse ning avatud oleku näitav kontakt avaneb, aga suletud oleku indikeeriv kontakt sulgeb.





**Joonis 1.2. IEC 61850 alajaama andmeside kihtideks jaotamine[6]**



**Joonis 1.3. Skemaatiline joonis: IED koos tema poolt täitvatega funktsioonidega**

Sellisel viisil on primaarseadmetel tehnoloogilised kaitsed ja alarmkontaktid, mis peavad rakenduma rikkeolukorras. Asendikontaktid rakenduvad vastavalt asendite muutmistele. Juhtimise täitmiseks peab primaarseadmetel olema juhtimismehhanism. See reageerib juhtimissignaale väljaspoolt ja paneb primaarseadme juhtimise ahelad kokku, millele järgneb objekti seisundi muutumine. Tabelis 1.1. on toodud põhiliste kõrgepinge ja keskpinge juhitavate ning jälgitavate primaarseadmete tehnoloogiliste kaitsmete, asendikontaktide ja juhtimismehhanismide näidised, mis on osa primaarseadme sekundaarahelatest. Sekundaarahelate väljaviigud asetsevad tavaliselt seadme klemmkapis (*Link Box*) ning peavad olema kokku viidud sekundaarseadmetega. Sellist ühendust tehakse mugavuse eesmärgil rele paneeli (*Relay Panel*) kaudu (üle 35 kV alajaamad) ning ka komplektjaotla sekundaarkapi kaudu. Kõrgpinge jaotla relepaneelis ühinevad kõik lahtris olevad primaarseadmete klemmkapid sekundaarkaablite abiga. Keskpinge jaotlas ei pea kaableid vedama, sest seadmed on kõik kokku pandud komplektjaotlasse ning klemmkapp asub lahtrikapi üleval.

Sekundaarklemmidele tulevad ka mõõteandmed kaitsmete ja arvestite jaoks. Voolutrafod reeglina omavad mõõte- ja kaitsemähiseid eraldi. Mõõtemähisel on võimekus mõõta elektrivoolu alates mõnedest milliampritest kuni nimivooluni. See mähis omab kitsa

**Tabel 1.1. Põhilised HV/MV alajaama primaarseadmete asendikohtaktide ja juhtimismehhanismide näidised**

Seade	Asendikontaktid	Juhtimismähised	Tehn. Kaitse mehhanismid
Võimsuslüliti	NO*, NC*	T1*, T2*, Sulgemise mähis	VL seire
Lahklüliti	NO, NC	Avamise, sulgemise mähis	-
Maanduslüliti	NO, NC	Avamise, sulgemise mähis	-
Jõutrafo	NO,NO	-	Buchholz releed
	NO	-	Astmelüliti jugarelee
	NO (oleneb hulgast)	-	Õlitemperatuuri andurid
	NO	-	Manoometer
	NO	-	Gaasianalüsaator
	NO	Astmelüliti ajami juhtimismähised	-
	NO	Jahutuse automaatika juhtimine	-
Kaarekustutuspool	NO, NC	Juhtimismähis	-
	NO	Astmevahetuse juhtimismähis	-
Kondensaatorpatarei	NO, NC	Juhtimismähis	-
	NO	Astmevahetuse juhtimismähis	-

\*NO - Normally Open contact, NC – Normally Closed contact, T1 – Trip 1 esimese väljalülitusahela täitev mehhanism, T2 – analoogne teise ahela jaoks[7].

hüstereesi silmust ning võib väga lihtsalt küllastuda. Mõõtemähise täpsus on tagatud nominaalvoolu mõõtmise režiimis. Selleks, et õiget releekaitse tööd tagada, kasutatakse mitte nii täpseid kaitsemähised. Nendel on hüstereesi silmus laiem ja isolatsioon on tugevam. Nulljärgnevusvoolu mõõdetakse silmusvoolutrafodega. Vooluga koos mõõdetakse ka nurka. Pingetrafodel on tavaliselt kaks mõõtemähist. Esimene on y-ühenduses pingete mõõtmise jaoks, teine on d0-ühenduses nulljärgnevuspinge mõõtmiseks. Pinget samuti mõõdetakse koos nurgaga. Kõrgepinge jaotlas omavad voolu-ja pingetrafod samuti klemmkappe. Keskpinge jaotlas aga ühenduvad otse jaotusseadme sekundaar klemmkappi. Kõikide primaarseadmete sekundaarahelate väljaviigu klemmidele toomine on nõutud Eleringi hankedokumendiga[7].

IED, mis hakkab töötleva saadud mõõtmisi, asendeid ning juhtima, võib olla ühendatud nende väljaviigudele erinevalt. Esimene viis on punktist punkti (Cu, *point-to-point; copper wire*) seadmest seadmeni.[8] Niimoodi mõõtmised, asendid ja juhtimised läbivad iga alajaama sekundaarsüsteemi kivi ühe ja sama juhtmete koguse kaudu. Järgmised viisid tulenevad andmeside arengust ja seadme filtrite muutumisest analoogsetest digitaalsete peale. [6] Esiteks, digitaliseeriti alajaama siini, mis asub lahtri ja alajaama kihtide vahel. See võimaldas

kasutada erinevate *IED* poolt saadud infot iga *IED*-ga, mis pooldab konkreetse kommunikatsiooni standardi[9]. Järgnevalt ilmus protsessiini digitaliseerumise võimalus, mis andis võimekust jagada igast mõõteseadmest saadud infot vabalt valitava *IED* seadmega lahtrikihis. Protsessiini digitaliseerumine aitab märkimisväärselt kaasa juhtmestiku hulga vähendamisele.[10] Järgnevalt *IED*-dest ning arvestitest infot edastatakse andmekontsentraatorisse (*RTU, Gateway*), kus on tarkvaraliselt valitud signaalid, mis edaspidi edastatakse *SCADA*-sse (*Supervisory Control and Data Acquisition*) ning *HMI*-sse (*Human-Machine Interface*).

### 1.1.3. Andmete kogumine ja selle eesmärgid

Alajaamas kogutud info edastatakse kontsentraatorist (*RTU*) ülesse *SCADA* süsteemi, mille kaudu toimub kogu elektrivõrgu seisundi pidev seire. *SCADA*-ga on seotud *EMS/DMS* (*EMS – Energy Management System, DMS – Distribution Management System*) süsteemid, mis peegeldavad reaalkaartidele kõiki alajaamasid ja elektriliine, kasutades *SQL* andmebaase, mida täidab *SCADA* alajaamadest kogutud info alusel. *EMS/DMS* keskkonnas on võimalik jälgida alajaamade seisundeid, varustust puudutavaid toiminguid, planeerida katkestusi ja jagada plaanimisinfot kõikidele elektrivõrgu osalejatele (nii võrguettevõtete töötajatele, kui ka klientidele). Need süsteemid on vajalikud selleks, et järgida normatiivdokumendi [11] nõudeid ning vältida suuri kulutusi seoses elektri varustuskindluse kaotamisega. Alljärgnev nimekiri on näidis, mis kajastab info kogumise, analüüsi ja järgneva planeerimise eesmärgi ja väljakutseid. Elektrivõrgu juhtimissüsteemid peavad täitma oma funktsioone nii normaal kui ka avarii ja avariijärgsetes talitlustes [9, 12, 13]:

- Katkestuste sageduse vähendamine (avariitõrjeautomaatika, võrgu elementide seisundi seire)
- Katkestuse kestvuse vähendamine (avarii leviku piiramine õigete elementide kiire väljalülitamisega)
- Katkestatud klientide arvu vähendamine (rikkekoha lokaliseerumine, taaslülitamine)
- Elektrivõrgu stabiilsuse tagamine
- Taastuvate allikate ja väiketootjate elektrienergia genereerimisel osalemise võimaldamine
- Reaktiivvõimsusvoogude reguleerimine
- Võimalikult pikk saartalitluse töö tagamine enne võrguga taasühendamist
- Elektrituru toimimise tagamine

- Alluva operatiivpersonali tegevuse kontroll ja kordineerimine
- Töötava varustuse koormatuse kontrolli teostamine
- Esmase info häirete kohta kogumine

Saadud elektrivõrguandmete põhjal teostatakse:

- Elektrivõrgu režiimide arvutamine
- Võrgukontrollpunktides vajaliku pingeniivo tagamine
- Elektivarustuse tööst väljaviimiseks vastavate režiimide tagamine
- Dispetšerite poolt varustuse tööst väljaviimiseks esitatud avalduste süsteemne töötlemine ning lühi- ja pikaajaline võrguelementide remonditööde planeerimine
- Tehnoloogiliste kadude vähendamise meetmete välja töötamine
- Elektrivõrgu remondil töötavate brigaadide jälgimine ja töölubade väljastamine
- Võimsusvoode graafiku kontrolli teostamine
- Personali väljaõpe võimaldamine elektrivõrgu simulaatori peal

## **1.2. Digitaalne alajaam - elektrivõrgu juhtimissõlm**

### **1.2.1. Alajaama sekundaarvarustus**

Alajaama primaarseadmete kuju on muutunud kompaktsemaks tänu uute dielektriliste ainete ning tehnoloogiliste võimekuste kasutamisele. Sekundaarväljundite ja -sisendite poolest pole primaarseadmed muutunud. Nii 1960.-ndatel aastatel kui ka tänapäeval kasutatakse vaskühendusi, et siduda neid sekundaarseadmetega. Lähitulevikus on oodata laialdasemat tootmist ja kasutamist optiliste sisend-väljunditega primaarseadmeid, mida võib ühendada sekundaarvarustusega andmeside kaudu, kasutades *IEC61850* protsessisüsteemi.

Vastupidiselt primaarseadmete arenguteest on sekundaarseadmete arengutee mitmekesine. See käsitleb elektromagnet nähtusel põhinevatest analoogsetest arvestitest ja releedest ülemineku digitaalseteks mikroprotsessorpõhisteks multifunktsionaalseteks seire-, releekaitse- ja automaatikaseadmeteks. Sekundaarseadmete hulka kuuluvad samamoodi sideseadmed ja kaugterminalid. Kui mainida joonise 1.2. *IEC 61850* alajaama kihtideks jaotamise skeemi kirjeldavat teksti, siis sekundaarseadmed jaotuvad kihtide järgi vastavalt:

- Protsessikiht – andurid, lülitite kontrollid, ühendavad seadmed (*Merging Unit, MU*)
- Lahtrikiht – arvestid, mikroprotsessorpõhised releekaitse ja automaatika seadmed (*IED*), tsentraliseeritud kaitse protsessorite plokid

- Alajaama kiht – kaugterminalid, kommunikatsiooni moodulid, kasutajaliidesed ja tööjaamad

Protsessikihi andurid on seadmed, mis paiknevad primaarseadmete küljes ning peavad edastama tehnilise seisundi olekuid. Näiteks kui õlitemperatuuri andurid trafopaagis jälgivad trafoõli temperatuuri ning edastavad kontaktide sulgemist signaaliga. Kui trafo klemmkapi väljaviigust saabub signaal *IED* binaar sisendile, siis tekib alarm, mis viitab, et õlitemperatuur on kõrge. Võimsuslülilil võib olla kontroller, mis toimib liidese rollis lüliti ja *IED/MU* vahel. Kontrolleri jälgib lüliti asendeid, lüliti ajamit, vedru olekuid, tõrkeid jne. Kontrolleri väljaviigud võivad olla ühendatud *IED/MU* binaarsisenditesse-väljunditesse läbi klemmide vask ühendusega. Hetkel ei ole arvestatud optiliste liidestega primaarseadmed. Mõõteandmete töötlemiseks on olemas *MU* ja *IED*. Mõlemad seadmed kasutavad A/D muundureid, et konverteerida mõõdetud analoogsignaali digitaalseks. Analoog siinust jaotatakse diskreetseteks osadeks (*sampling*) sagedustega 2-10 kHz *MU* puhul ning 1.2-3.2 kHz *IED* puhul[14]. Muundurite ja filtrite kasutamisega kaasneb ajaviide. Mida suurem on sagedus, millega diskreetimist sooritatakse, seda täpsem on mõõtmiste tulemus. Häiringu puhul laine kuju on kuvatud detailsemalt. Kaitse eesmärgiks on tarvis 2 kHz sagedusega mõõtmiste digitaliseerimine. See võrdub 40-ga diskreetsete osadega 50 Hz perioodi jooksul.

Arvestid, mis asuvad lahtrikihis on mõeldud täpse elektrienergia arvestamiseks. Arvestid võivad kasutada *IEC 61850* protsessisiini mõõteandmete saamiseks. Kõige levinum arvestite andmeside protokoll on *DLMS/COSEM*. Ühildamist võimaldavad protokollid konverterid. Tänapäevased arvestid võimaldavad kauglugemist, kaugjuhtimist, energia kvaliteedi mõõtmisi. *IED* sisaldab endas seire-, releekaitse- ja juhtimisfunktsioone. *IED* omab mõõtmiste kaarte, binaar sisend-väljund kaarte, kommunikatsiooni kaarte, kaarekaitse kaarte ja FPGA kiipi. *IEC 61850* lahtrikihis *IED*-d on seotud omavahel virtuaalse võrguga ning vahetavad *GOOSE* sõnumeid. Tihti kasutatakse liiasuse protokolle, nagu *RSTP – Rapid Spanning Tree Protocol*, *PRP - Parallel Redundancy Protocol*, *HSR – High-Availability Seamless Redundancy protocol*, et tõsta lahtrikihi töökindlust ja kättesaadavust. Loogika, mis on konfigureeritav *IED* sisse oleneb *IED* tüübist. Tüübi määrab *IED*-l selle poolt võimalik kaitse ja automaatika funktsioonide kogum. On olemas näiteks mootorikaitse, trafokaitse, fiidrikaitse, latikaitse, jne *IED*-d. *IED* lisafunktsioonidest on viimasel ajal populaarsed rikkekoha leidmine, häiresalvesti kauglugemine, koormuse sundväljalülitamine, faasormõõtmine ja elektri kvaliteedi seire. Kommunikatsiooni poolest *IED* pooldab avalikest protokollidest *Modbus*, *Modbus TCP*, *IEC 60870-5-103*, *IEC 61850* protokolle. Praegu on

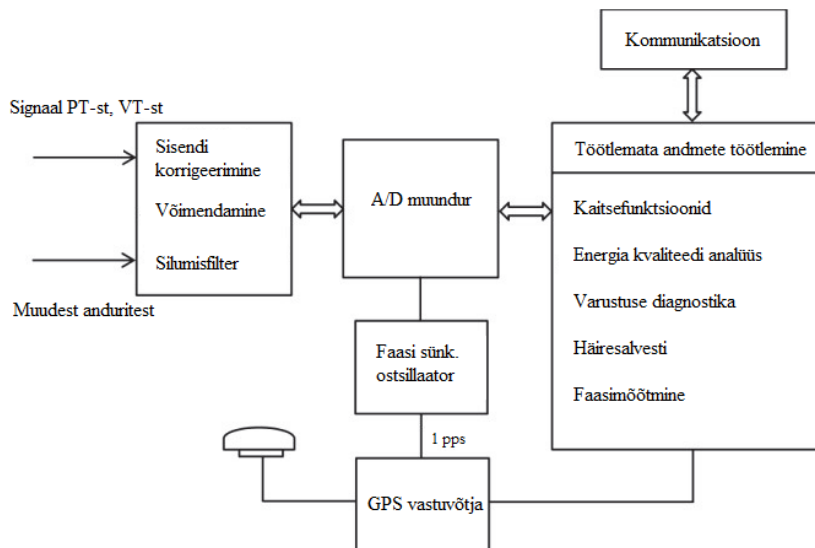
tendents *IEC 61850* protokollide kasutamiseks. See on tingitud sooviga loobuda tootja põhisest sidelahendusest ja võimaldada eritootjate seadmete omavahelist andmeedastust Ethernet võrgu kasutamiseks. Näiteks rekonstrueerimise puhul kasutatakse teise tootja poolt toodetud seadmeid. Niimoodi väheneb ka töömaht nende integreerimiseks olemasoleva süsteemi. Tsentraliseeritud kaitse protsessorite plokid on võimsad tööstuslikud arvutid, mis koguvad infot protsessikihist *MU*-de või neid asendavate moodulite abil ja töötlevad kogu alajaama infot ühes kohas. Põhiliselt neid ei jaotata funktsioonide järgi erinevateks plokkideks, nagu *IED*-si. Kogu funktsionaalsus põhineb tarkvara peal ning riistvara on nendel standartne. Funktsionaalsuse poolest need ei erine *IED*-dest, kuid funktsionaalsuse laiendamise poolest annavad rohkem vabadust: nende riistvara ja tarkvara ei ole seotud ühe tootjaga.

Alajaamakihis asuvad kaugterminalid (*RTU*-d, andmekontsentraatorid), mis koguvad infot alajaama alumistest kihtidest ja saadavad üle *TCP* võrku *IEC 60870-5-104* protokolliga infot *SCADA*-sse. *RTU* paikneb ühest küljest ühes virtuaalvõrgus *IED* –dega, teisest küljest teises virtuaalses võrgus *SCADA*-ga. *SCADA* teeb aeg ajalt üldküsitlust *RTU*-le ning *RTU* hakkab küsitlema *IED*-si ja saadab vastuseks päritavat infot. Üldiselt ühest alajaamast tulenev andmemaht on suur. Selle vähendamiseks *SCADA*-sse saadetakse vaid tähtsamaid signaale, valides neid releega esitatud nimekirjast. Kommunikatsiooni moodulid on osa tsentraliseeritud kaitse ja juhtimissüsteemist. Nende eesmärk on täita *gateway* funktsioone ning tagada ohutut ühendust *SCADA*-ga. Funktsionaalne osa asub tsentraalses protsessori plokis ning seal toimub ka signaalide konfigureerimine. Kasutajaliidesed ühenduvad alajaama kihiga selleks, et tagada operatiivset infot alajaama olekust ja kiiret kättesaadavust käidupersonalile. Kasutajaliideses kuvab iga lahtri olekut mnemoskeemi abil, kus tingmärkidega on näidatud lülitide asendid, hetke koormus, pinge tase, sagedus ja muu vajalik operatiivne info. Samuti, kasutajaliideses abil on võimalik vaadata üldist sündmuste nimekirja ning leida probleemset lahtrit. Seejärel on võimalik häiresalvesti faile laadida alla konkreetsest *IED*-st. Häiresalvesti faile on võimalik laadida alla nii kohalikust *HMI*-st, kui ka kauglugemise teel. Tööjaamasid tavaliselt ühendab insener, kes tegeleb varustuse konfigureerimisega või testimisega. Tavaliselt, selleks kasutatakse konfigureerimise porte, mille juurde on liigipääs vaid teatutel isikutel.

### **1.2.2. Digitaalse alajaama kontseptsioon**

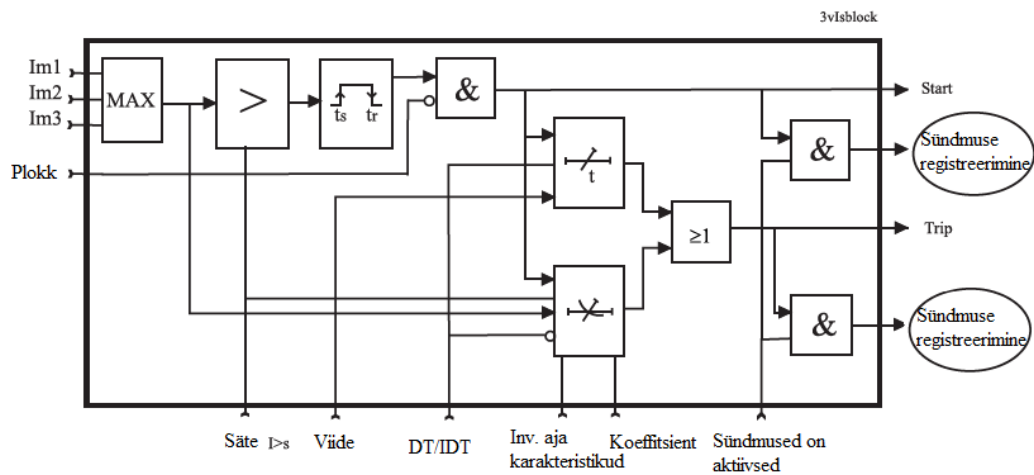
Võrguettevõtja eesmärgiks ei ole ainult püsiva energiahinna ja kindla tarnimise tagamine. Eesmärkide hulka kuuluvad ka varustuse seiskamise aja lühendamine, energia kvaliteedi

tagamine vastavalt standardile ja taastuvate allikate integreerimine. Selleks, et eesmärgi täita, kasutatakse *IED*. Nende põhiline ülesanne on võrgust andmete kogumine ja töötlemine ning edasi juhtimiskeskusesse saatmine. Tüüpiline multifunktsionaalne *IED* omab struktuuri, nagu on näidatud joonisel 1.4. *GPS* aega aga üldjuhul saadetakse võrgu teel ning seda jagab *RTU*.



**Joonis 1.4. Multifunktsionaalse *IED* arhitektuur[15]**

Kaitsefunktsioonid, energia kvaliteedi analüüs, varustuse diagnostika, häiresalvesti ja faasimõõtmine peavad saama sisendeid töötlemata andmete hulgast. Töötlemata andmed kujutavad endast diskreetitud voolu ja pingete signaalide jadasid.[15] Kui töötlemata andmed läbivad *IED* protsessoriploki olles kasutatud mõne funktsiooni poolt, siis tekib *IED* sisene funktsiooni väljund, mida *IED* võib kasutada vastavalt konfiguratsioonile. *IED* võib saada ka diskreetseid signaale, näiteks, lüliti asendeid. Neid kasutatakse otseselt sisenditena loogika plokide jaoks. Näide, kuidas *IED* töötleb diskreetitud voolusisendi liigvoolukaitsme 50/51 plokis on toodud joonisel 1.5. Vasakul pool joonist on kujutatud sisendid: kolme faasi voolud ning blokeeringu kontroll. Loogika järgi kui voolud ületavad sätteväärtust, siis aktiveerub väljund „Start“. Kui sätteväärtus on ületatud kauem kui etteantud viiteaeg, siis kaitse annab välja väljundi „Trip“. Joonisel on toodud *IED* konfiguratsioonist olenevad ploki sisendid: „Säte“, „Viide“, „*DT/IDT* (konstantse aja karakteristikuga/pöördkarakteristikuga)“, „pöördkarakteristiku kurvid“, „pöördkarakteristiku koeffitsient“, „sündmused on aktiivsed (lubab genereerida sündmust)“. Paremal pool on ploki väljundid: kaitse start, kaitse trip ja mõlemate väljundite sündmused. Sündmuse salvestatakse *IED* siselogis ja saadetakse juhtimiskeskusesse.



**Joonis 1.5. Makskaitse plokki näide[36]**

Peale sündmuse tekkimist, saadetakse *MMS* sõnum *RTU*-sse protokolliga *IEC 61850*, kasutades unifitseeritud alajaama konfigureerimiskeele (*SCL – Substation Configuration Language, IEC 61850-6*) ning *Logical Node (LN)* [16] mudelit. See kirjeldab *IEC 61850* seadmete vahel üleantavate signaalide põhimõtet. [17] Põhiline standardi võimekus on[18]:

- Erinevate tootjate *IED* koostöö integreeritud süsteemina
- *IED*-de vahelise suhtlemise jaoks kasutatakse võrdõigusliku (*peer-to-peer*) kommunikatsiooni Etherneti kaudu
- Andmete kirjeldus baseerub edasiarenenud objektorienteeritud mudelil, mis sisaldab täieliku andmete spetsifikatsiooni. Selline viis erineb ühikule orienteeritud mudelist, kus igale andmeühikule on antud unikaalne numbriline aadress
- Toetab seadmete funktsionaalsust parima kommunikatsiooni eesmärgil
- Kommunikatsiooni laiendamisvõime ja andmete integreeritavus
- Võimaldab kommunikatsiooni süsteemi integreerimist
- Võimaldab töökindla alajaama automaatika süsteemi järelevalvet ja juhtimist

*IEC 61850* järgi signaali teeviit peab kajastuma järgnevalt: *ServerLD/LN.DO.DA*. *SCL LN (Logical Node)* mudeli struktuuri näidis [16] on toodud esile tabelis 1.2. Ühe väljundfiidri tüüpiline signaalide ja juhtimiste maht on esitatud joonisel 1.6. Siin saab näha juhtimise, asendi, blokeeringu *LN*-e lülititele, mõõtmiste ning relekaitse ja automaatika *LN*-e.

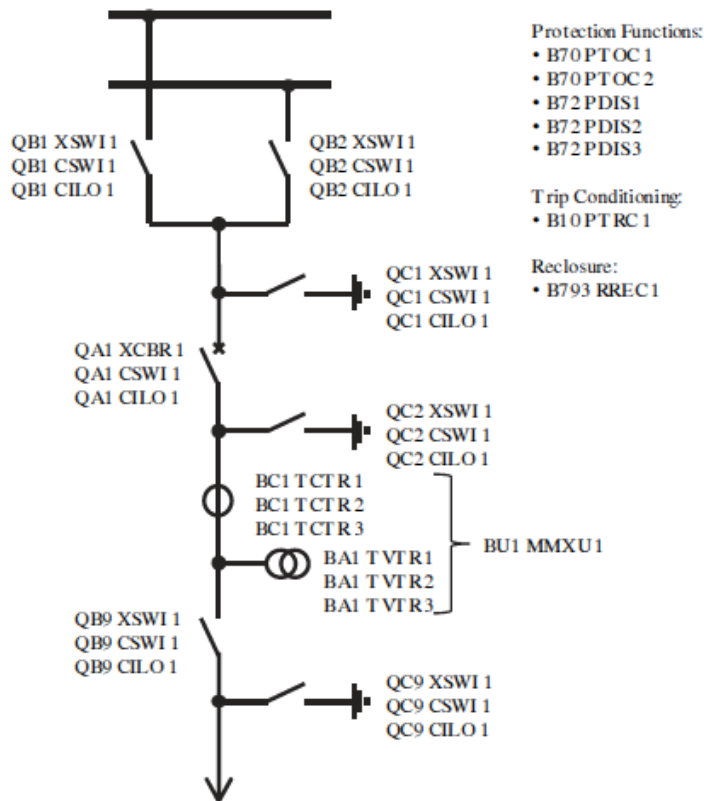


**Tabel 1.2. Logical Node mudeli näidis võimsuslüliti asendi signaalina, mis tuleb VL virtuaalsest juhtimistplokist**

IED1CB/1VL2CSWI1.Pos.stVal.	
IED1	<i>Servers</i> esitab füüsilist <i>IED</i>
CB	<i>Logical Devices (LD)</i> on virtuaalsed seadmed, mis teostavad seiret, kaitset või juhtimist serveri peal
1VL2CSWI1	<i>Logical Nodes (LN)</i> esitavad erifunktsionaalsust <i>LD</i> sees. Antud juhul CSWI on lüliti juhtimise <i>LN</i> . 1VL2 on prefiks, mis näitab mis seadme puhul peab olema teostatud juhtimine, 1 on sufiks, mis näitab, et see on esimene <i>CSWI</i> .
Pos	<i>Data Objects</i> on atribuutide rühmad, mis asuvad <i>LN</i> sees. Pos on CSWI objekt, mis kirjeldab lüliti positsiooni (Sees/Väljas).
stVal	<i>Data Attributes (DA)</i> on <i>LN</i> mudeli otspunktid. Atribuut stVal näitab <i>DO</i> Pos staatuse väärtust.

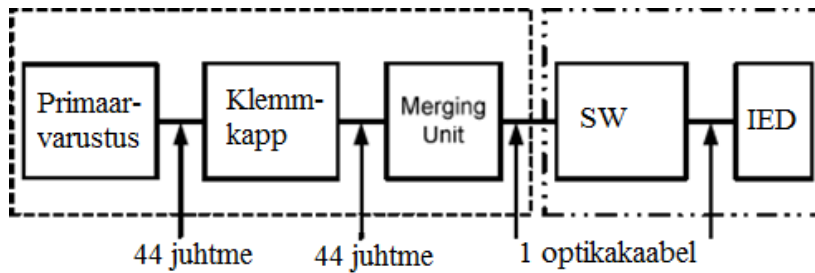
Standard *IEC 61850* sisaldab ka üldisi objektorienteeritud alajaama sündmusi (*GOOSE – Generic Object Oriented Substation Event*) ning diskreteeritud valimid analoogmõõtmistest (*SV – Sampled Value*). *IEC 61850-8-1* standardi osa on alajaama üldiste sündmuste kommunikatsioonist. *IEC 61850-9-2* ning *IEC 61850-9-2LE* on diskreteeritud väärtuste kommunikatsioonist protsessiini tasemel.[17] *GOOSE* sõnumeid on võimalik kõige paremini kasutada ühe ja sama tootja seadmete suhtlemiseks. Sõnumite abil tekitatakse teistel alajaama *IEC61850* pooldavatel seadmetel logilised sisendid. *GOOSE* kommunikatsioon toimib ainult selle kasutataval *IED*-del ning sõnumid ei ole defineeritud *SCL*-i abil. *SV* on analoogsignaali digitaliseeritud väärtus. Tekib analoog-digitaal muundamise teel. Selle edastatakse kõrge resolutsiooniga ning seejärel lastakse läbi filtreid, et kasutusele võtta vaid

vajaliku osa. Mida kõrgem on diskreetimise tase signaalil, seda parem selle saab reprodutseerida digitaalkujul ja seda täpsemad on mõõteandmed. [17]



**Joonis 1.6. Näidis: väljundfüidri IEC 61850 LN kogus[19]**

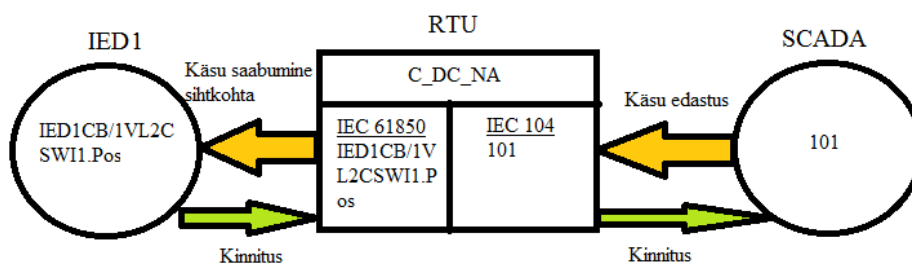
SV-si ei saadeta üle andmesidevõrgu SCADA-sse nende suure mahu tõttu. Need leiavad kasutust protsessisiinil, kuhu paigaldatakse sidekanaleid ribalaiusega suurusjärgus 1Gbit/s. Standardi IEC 61850 kasutamine võimaldab koos seadmete integreerimisega ka juhtmestiku ja kaabelduse, sekundaarseadmete hulka vähendamist alajaama protsessisiini digitaliseerimise teel[10], sest sellel juhul mitme eraldiseisvate füüsiliste ühenduste asemel võib luua ühe, mis on võimeline kanda sama palju infot. Keskpinge jaotla puhul sääst pole nii märkimisväärne, nagu kõrgpinge alajaama puhul. Suurt muutust oodetakse optiliste mõõteandurite ilmumisest. Joonisel 1.7. on toodud juhtmestiku hulga vähendamine kõrgpingejaotla lahtris. Siin on pakutud, et primaarvarustust ühendatakse vaskkaablitega klemmkapi ja MU-ga *point-to-point* ning seejärel andmeid edastatakse Ethernet optikakaabliga andmeside teel. Sellistel juhtumitel optikat reserveeritakse kasutades „pime kiudu“ ehk kasutamata varusoont.



**Joonis 1.7. Juhtmestiku minimeerimine protsessis siini digitaliseerimisega IEC 61850 standardi põhjal[20]**

Lahendus, milles mõõtmised edastatakse läbi andmesidevõrku lubab sooritada, näiteks ka pinge mõõtmiste reserveerimist. Juhul, kui mõni pingeandur läheb rivist välja, seda saab asendada iga kättesaadav andur. Tingimuseks on pinge mõõtmine samast kohast.

Ennem oli mainitud, et alajaama andmeside juhtimiskesusega toimub RTU või sarnase seadme kaudu. RTU on alati ülem alajaama seadmetele, kuid alluv SCADA-le. Alajaama seadmed edastavad andmed RTU-sse IEC 60870-5-103, Modbus, IEC 61850 protokollidega. Protokollide IEC 60870-5-103 ning Modbus iseärasuseks on see, et iga signaal omab kindla tüübi ja aadressi, mille järgi see on päritav. Protokoll IEC 61850 on objekt-orienteeritud. See tähendab, et loogiline seade võib tekitada mitu sündmusi kasutades erinevad andme objekte ja atribuute. RTU saadab andmeid SCADA-sse protokollidega IEC 60870-5-104, DNP3. Seadmed, mida pärib RTU kantakse selle konfiguratsiooni sisse. Signaale, mida pärib RTU kantakse selle konfiguratsiooni tabeli kujul. Tabelis peab olema kajastatud signaali tüüp; IEC103 või IEC61850, või Modbus aadress alla; IEC 104 või DNP3 aadress ülesse. Signaali tüüp näitab mis signaaliga on tegemist ning mis tegevused on võimalikud antud signaaliga. Aadress alla näitab RTU-le kus täpselt asub päritav signaal alajaama seadmes. Aadress ülesse määrab seda, kuidas SCADA saab signaali pärida RTU poolt.

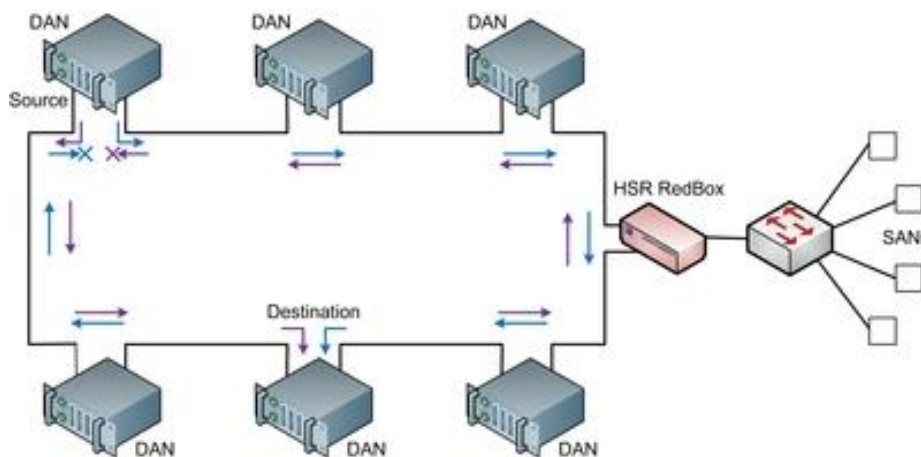


**Joonis 1.8. Signaalide edastus SCADA-st IED-sse RTU kaudu**

Joonisel 1.8 on esitatud lihtsustatud näidis, kus SCADA saadab juhtimissignaali läbi RTU-t IED-le. See on lihtsustatud selle pärast, et joonisel pole kajastatud küberturve meetmed.

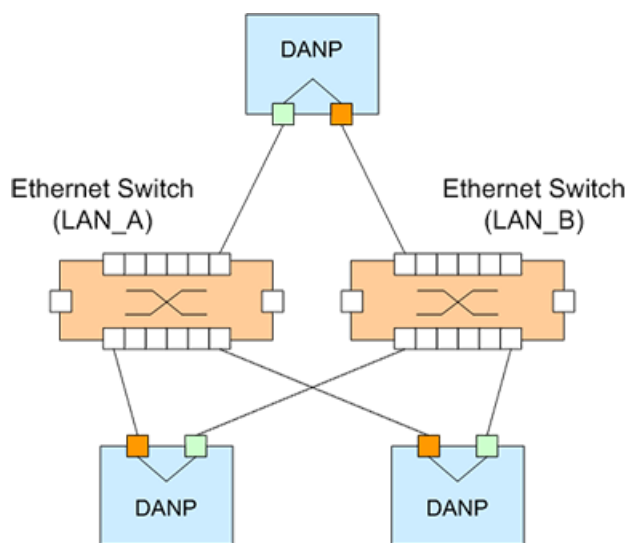
Alajaama andmeside võrk on tänapäeval *TCP/IP* võrk. Selle tõttu kõikidel seadmetel on olemas *IP* aadress. Niimoodi *RTU* ja *IED*-d leiavad üksteist võrgus ning suhtlevad omavahel. Alajaamavõrgus ja sidekanalis *SCADA*-sse *RTU* omab erinevad *IP* aadressid.

Andmesidevõrgu kättesaadavus on üks põhilistest väljakutsetest digitaalses alajaamas. Seoses võrguühenduse kadumisega võib esineda olulisi probleemi. Kui side katkeb alajaama ja juhtimiskeskuse vahel, siis suurt probleemi ei ole: alajaam jätkab tööd autonoomselt. Juhul, kui side katkeb alajaama seadmete vahel, võib juhtuda avarii. Selleks, et andmeside seadmete vahel toimiks, on vaja võrgu liialdada. Põhilised liiasuse protokollid olid nimetatud 1.2.1: *HSR*, *PRP* ja *RSTP*. Protokoll *HSR* kasutatakse ringtopoloogiaga võrkude loomiseks. Eeldab kaht ethernet porti *IED*-del. Kui seade omab vaid ühte ethernet porti, siis kasutatakse lisaseadet, mis paljundab porte ja pooldab *HSR* protokoll (Redundancy Box). Kahe pordiga seadet nimetatakse inglise keeles *DAN*, *Double Attached Node*. Ühe internet pordiga seadet nimetatakse *SAN*, *Single Attached Node*. Protokoll *HSR* toimib nii, et sõnumid liiguvad kahes suunas. Esimesena saabuv teade aktsepteeritakse, teist kustutakse. Sellisel moel *HSR* protokoll võimaldab null katkestamise aega. *HSR* võrgus ei ole lubatud teised liiasuse protokollid[21]. Joonisel 1.9 on näidatud *HSR* protokolliga võrgu topoloogia.



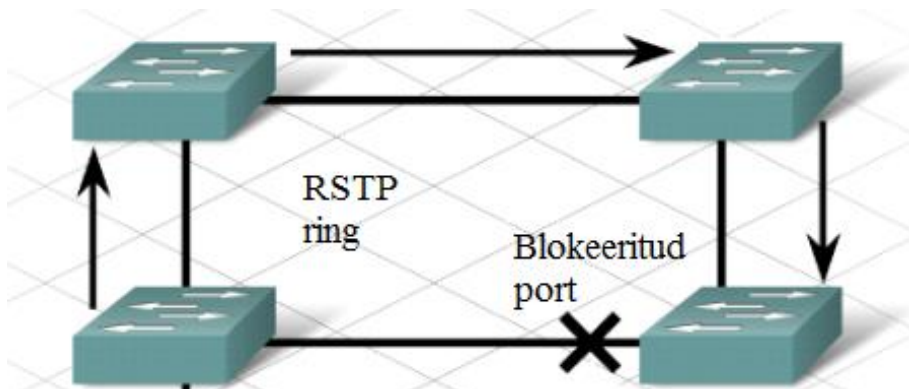
**Joonis 1.9. HSR protokolliga kasutamise näide, kus on ühenduses nii DAN, kui ka SAN[22]**

*PRP* protokoll kasutatakse liialdatud täht ühenduste loomisel. Ühendavatel seadmetel peab olema kaks sideporti ja *PRP* võimekus. Protokoll toimimiseks kasutatakse kahte sarnast sõltumatut lokaalvõrku. Protokoll *PRP* tagab null seiskamise aja. Saaja võtab vastu pakette mõlematest võrkudest, kuid kasutab esimest saabunud ja teist kustutab. Liiasuse protokoll *PRP* näidisskeem on toodud joonisel 1.10.



**Joonis 1.10. PRP topoloogia näidisskeem[23]**

Protokoll *RSTP* on võrgu liiasuse protokoll, mis tagab võrgus silmuste vältimist. Liiasus on tagatud erinevate teekondade erinevate switchidesse olemasoluga. *RSTP* konfigureerib switchide porte nii, et on alati olemas ainuke võimalik teekond. Ülejäänud on ooterežiimis. Kui aktiivne teekond ei vasta, siis *RSTP* arvutab uut teekonna välja. Kõik switchid uurivad üksteisest infot kasutades *BPDU* (*Bridge Protocol Data Unit*) pakette[21].



**Joonis 1.11. RSTP ring[24]**

Nende pakettide abil toimub võrgu topoloogia jälgimine ja vajadusel switchide poolt täitvate funktsioonide muutmine. *RSTP* võrgud võivad olla ring- ja silmusvõrkudena. Joonisel 1.11. on esitatud *RSTP* toimimispõhimõte.

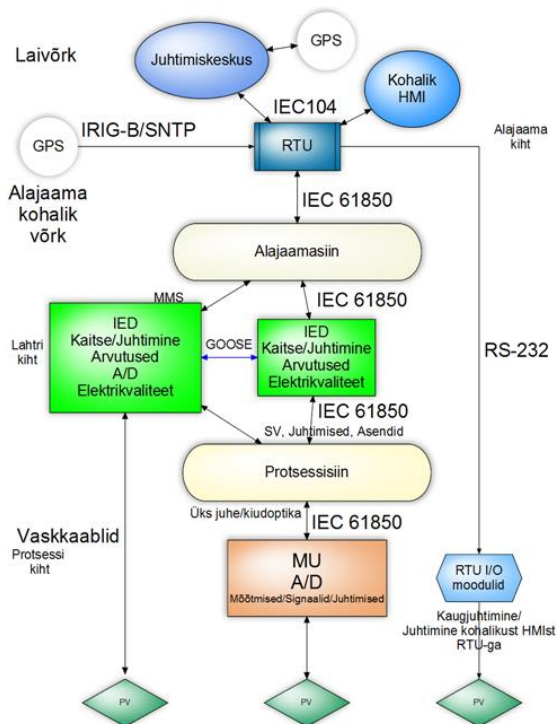
### 1.3. Alajaama kaitse ja juhtimine hajutatult ning tsentraliseeritult

#### 1.3.1. Hajutatud kaitse- ja juhtimissüsteem

Alajaama hajutatud kaitse- ja juhtimissüsteemi all mõistetakse sellist süsteemi, millises kaitse- ja juhtimisseadmete funktsionalsus on jaotatud võrdsetes osades kõikide kaitstavate objektide vahel. Süsteemi elemendid töötavad sõltumatult üksteisest, kuid omavad sidekanali omavahel, et teostada koostööd. Iga süsteemi element omab mõõtmise-, releekaitse-, juhtimise-, seire-, kommunikatsiooni-, arvutusevõimekust. Tavaliselt hajutatud süsteemi põhielementideks on *RTU* ja selle moodulid, *IED*-d, lähitulevikus *MU*-d ja arvestid. Abielementideks on sideseadmed ja kontrollerid. Kõik hajutatud süsteemi seadmed on tootjapõhise riist- ja tarkvaraga. Toodete hulk on suur ja alajaama tellija on võimeline valima just endale sobilikke seadmeid oma alajaama spetsifika jaoks. Juhul, kui lahtri koormuse liik või tähtsus muutub ja valitud *IED* enam ei sobi, on ainus võimalus vahetada *IED*-t täielikult. Kui näiteks lisatakse taastuva toiteallika liitumispunkti, siis muutub voolu suund ja kaitsed ei pruugi õigesti toimida. Selleks, et *IED* konfigurereida, on tarvis teada selle tootja konfigurereimise tarkvara. Neid on mitu ning igaüht peab võrguettevõtte personal hästi tundma. Kui võrguettevõtjal puudub konfigurereimise oskus, siis peab tegema tellimust tootjapoolseks konfigurereimiseks. Konfigurereimine toimub rangelt lahtrite kaupa. Kui fiidrite *IED*-de tarkvara versioon on pisut erinev, siis ei või tüüpilise fiidri konfiguratsiooni kopeerida *IED*-de vahel. Peale konfigurereimist järgneb kohustuslik testimine, mida tehakse iga lahtri kohaselt. Erinevate tootjate poolt toodetud seadmete vahel on tihti raske andmesidet luua. Ühe alajaama raames kasutatakse ühe tootja seadmeid. Sellisel juhul, ühe seadme rikke puhul peab ostma sama tootja poolt asendusseadet või hoidma selle laos. Sama kehtib ka alajaama laienduse puhul. *RTU* on hajutatud süsteemis ülemseade, mis teostab alajaama signaalide korjamist ja edastust juhtimiskeskusesse. Side *RTU*-ga omab kitsendusi nii *RTU*, kui ka *IED* konfiguratsioonide poolt. *IED*-s olev info võib mitte täiuslikult olla kasutatud *RTU* poolt või tekitada vea kokkusobimatuse tõttu.

Standardi *IEC 61850* ilmumine on suunatud seadmete vahelise andmeside ja koostöö võimaldamiseks. Antud standard pakub olulist optimeerimist alajaama kommunikatsiooni ja andmehõive süsteemile. Protokollide kasutamisega kõrval panustatakse oluliselt andmeside liialdamisele. Kasutatakse Ethernet switche ja liiasuse protokolle *HSR*, *PRP* või *RSTP*. Kommunikatsiooni osas saavutati alajaama siini loomist. Lähitulevikus on kavas protsessiini loomine ja lai kasutamine. Alajaama siini loomine andis hajutatud süsteemile võimaluse

signaalkaablite hulga lahtri ja alajaama kihtide vahel vähendamiseks: kasutatakse *TCP/IP* kommunikatsiooni võrku. Selles võrgus toimub ka *IED* vaheline kommunikatsioon. *GOOSE* sõnumeid prooviti saata ühe tootja seadmest teise tootja seadmesse. Vahelduva eduga eksperimendid õnnestuvad. Tulemuseks oodatakse kõrget integreeritavust seadmete tiheda koostöö põhjal. Antud kommunikatsiooni viis on võrdõiguslik. See tähendab, et seadmed ei juhi üksteist, vaid kasutavad edastatud ja saabunud sõnumeid loogika sisenditeks või väljunditeks. Standardi eesmärgiks on sõnumite sisu ühtlustamine kasutades *SCL*. See võimaldab teostada *RTU* konfigureerimist kiiremini. Objektide nimed on standartsed ja neid on lihtne tuvastada õige signaali kätte saamiseks.



**Joonis 1.12. Alajaama hajutatud kaitse ning juhtimissüsteemi andmeside põhimõtteskeem**

Protsessisiini digitaliseerimine standardi *IEC 61850* raames toob hajutatud süsteemi võimekust vahetada mitte ainult *GOOSE* sõnumid, vaid ka mõõdetud diskreetitud valimeid: *SV*. Sellisel juhul funktsionaalsus jaotub protsessikihi ja lahtrikihi vahel ehk vertikaalselt. *IED* võimekus jääb samaks, kuid mõõtmiste osa kolib protsessikihi. Sinna plaanitakse paigaldada *MU*. See seade hakkab korjama mõõte- ja staatuse andmeid ning transleerima neid protsessisiini kindlate klientide vahel. Antud lahendus võimaldab vase peal kokku hoida ning jagada protsessikihi andmed mitmete *IED*-de vahel. Joonisel 1.12 on esitatud alajaama hajutatud süsteemi andmeside põhimõtteskeem.

Kuna enne ühe fiidri *IED* ei olnud võimeline kõrval seisva fiidri mõõteandmed kasutada, siis protsessisiiin võimaldab seda. Sellisel viisil lihtsamad kaitse reserveerimise funktsioonid võivad olla täidetud kõrvalfiidrite poolt. Protsessisiiini koostavad 1 Gbit/s ribalaiusega Ethernet switchid on oluliselt kallimad kui 100Mbit/s switchid. Hajutatud süsteemi seadmetesse alginvesteeringu hind tõuseb protsessisiiini digitaliseerimisega märkimisväärselt. Seda hinda balanseerib sääst vaskjuhtmete pealt, sest protsessisiiini andmesidekanalite loomiseks kasutatakse optikat.

Seadmete konfigureerimiseks on tarvis kolme pädevat inseneri, kellest üks vastutab õige mõõteaparatuuri töö eest, teine releekaitsme konfigureerimise ja testimise eest, kolmas telemaatika toimimise eest. Nende inimeste koostöö ei ole kohustuslik, kuna igaüks teeb tööd oma valdkonna raames ja teiste valdkondade aspektid ei ole võetud arvesse. Iga insener ei pea teadma ja arusaama projekti nagu tervikut. Sellises olukorras vältimatute vigade jälgimine ja parandamine võib olla raskendatud ning võtta oluliselt aega.

### **1.3.2. Tsentraliseeritud kaitse- ja juhtimissüsteem**

Tsentraliseeritud kaitse- ja juhtimissüsteemi definitsioon ei ole formaalselt välja kujunenud. Raportis, mida esindas *IEEE WG K15*[6] tsentraliseeritud süsteemi (*CPC, Centralized Protection&Control*) defineeriti nagu süsteemi, mis baseerub kõrge tootlikkusega arvutusplatvormil. Süsteem on võimeline täitma kaitse-, juhtimise-, seire-, kommunikatsiooni- ja aktiivide haldamise funktsiooni. Funktsioonide kindla töö tagamiseks on vajalikud alajaama kõrge kvaliteediga mõõteandmed. Esimesed *CPC* süsteemid olid võetud proovile Lääne Euroopa riikides ja Põhja Ameerika kontinendi riikides 1980-1990 aastates. Esimeste süsteemide kasutamise kogemuse baasil on välja kujunenud tänapäevase *CPC* süsteemi põhiidee ja kontseptsioon. Tsentraliseeritud kaitse ja juhtimissüsteeme kasutatakse laialt alalisvoolu ülekannetes. Näiteks, Eestis kõrgpinge alalisvoolukaabli Estlink 1 taga asuvas muunduralajaamas toimib *CPC* süsteem *Mach III*. Vahelduvvoolu süsteemides *CPC* kasutamine sai taas populaarseks tänu riistvara ja mikroprotsessorite tootlikkuse suurendamisele ning hindade vähendamisele.

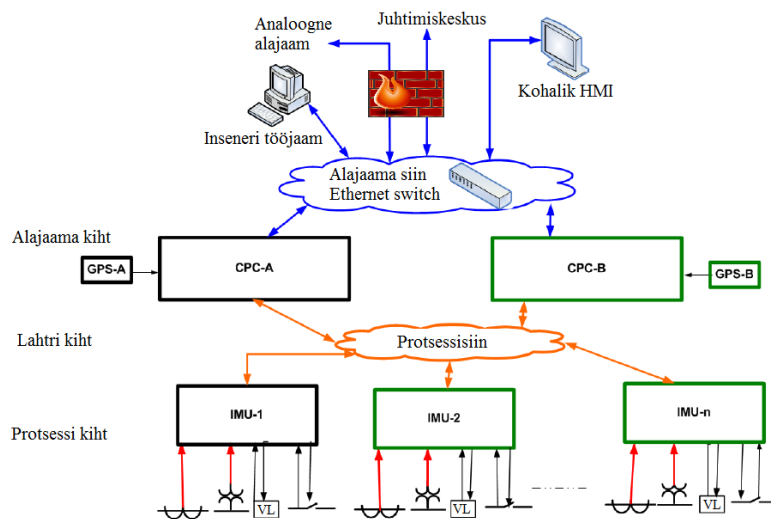
Tsentraliseeritud süsteemi loomisel eeldatakse, et kogu intelligentsus on koondatud keskujuhtimisseadmesse. See seade on sarnane tavalise personaalarvutiga, kuid peab vastu alajaama keskkonna tingimustele. Keskseadmel peab olema võimas protsessor, operatiiv- ning püsimalu, kommunikatsiooni võimekus. Riistvara on kõik standartne ning on eraldatud tarkvarast. Keskseade omab operatiivsüsteemi, mille all võivad täituda erinevate arendajate



programmid ja algoritmid. Lähenemist, kui tarkvara ja riistvara ei ole omavahel seotud nimetatakse avatud platvorm. Selline lahendus võimaldab oluliselt piirata vajaliku riistvara hulka. Nimelt, *CPC* riistvara sortimenti piiratakse sisend-väljund moodulitega, mis on mõeldud kõrge kvaliteediga primaarseadmetest mõõteandmete kogumiseks; keskjuhimisseadmega ja kommunikatsiooni liidesega. Moodulpõhine lahendus oluliselt kergendab hoolduse ja vahetuse operatsioone. Näiteks, tavaline montöör ei tohi vahetada *IED* kaarte, sest see protseduur nõuab kaitsemeetmeid elektrostaatika vastu. Juhul, kui kaart rikneb või midagi läheb valesti – tootja garantii enam ei kehti. Moodul aga on eraldi seisev kaitstud seade, mille vahetus on lihtsam. Peale paigaldust see kohe toimib ja ei nõua eraldi kontrolli. Seadmete seisundite kontroll tsentraliseeritud süsteemi puhul on visualiseeritud: on näha kõiki moodulite indikatsiooni eraldi. Tänu sellele on võimalik identifitseerida seadmete rikkeid ülevaatusel ajal. Seadmete mitmekesisuse vähendamine lubab saavutada personali kõrge väljaõpe taseme süsteemi jälgimise suhtes. Tsentraliseeritud süsteem lubab käsitleda kogu alajaama nagu terviku. Korralik tsentraliseeritud süsteemi seadistajate ja kasutajate väljaõpe nõuab aega suure hulga optioonide tõttu. Insenerid peavad aru saama nii releekaitse ja juhtimise põhimõtteid, vaid ka andmeside ja elektrikvaliteedi seire põhimõtteid. Ainult üksikasjalikult süsteemi teadmine lubab saavutada maksimaalse kvaliteedi selle edasises töös. Tsentraliseeritud süsteemi keskarvuti *OS*-i all töötav tarkvara, tegutseb nagu šabloonide hoidja konfiguratsioonide jaoks. Selline lähenemine võimaldab esitada nõutavaid parameetreid süsteemile ning see loob vastavate parameetritega lahtreid. Samal viisil *CPC* süsteem lihtsustab alajaama laiendamise seotud töid. Laiendamise puhul on vaja paigaldada vajalikud moodulid ning luua *CPC* tarkvara keskkonnas vastavat lahtrit. Palju tähelepanu pööratakse liiasusele töökindluse tagamiseks. Tähtsamate alajaamade puhul on võimalik kasutada kaks keskarvutit täpselt sarnaste konfiguratsioonidega. Arvutid töötavad sellel juhul paralleelselt. Lahenduste variatsioonid olenevad alajaama suurusest ja tähtsusest. Tsentraliseeritud süsteem võimaldab mõnes ulatuses hinna ja funktsioonide paindlikkust, kuid liiga väiksete alajaamade puhul võib olla kallis.

Seoses standardi *IEC 61850* laia levikuga tsentraliseeritud süsteem võimaldab arendada paindliku koostöövõimelist alajaamade rekonstrueerimise- ja laiendamisplatvormi. Kasutades *IEC 61850* standardi on võimalik arendada *CPC-IED* vahelisi andmeside seosed. Näiteks, edastada *GOOSE* ja *SV CPC*-st *IED*-dele ning vastupidi. Eraldiseisev *CPC* süsteem ei vaja funktsioneerimiseks *IEC 61850 GOOSE* signaale saatmist. See kiirendab toimimist ja võimaldab vältida *GOOSE* sõnumitega seotud vigu. Standardi *IEC 61850* kasutamine

tentraliseeritud süsteemiga võimaldab siduda kõiki alajaama seadmeid ühte andmeside võrku. Sellisel viisil saab CPC olla kõikide alajaamas toimuvate sündmuste jälgijaks. Kaitsmete ja automaatika funktsioonide reserveerimine on palju lihtsam teostatav andmeside teel. *IEEE WG K15* uurimistiim pakkus kuut erinevat CPC arhitektuuri, mis on võimalised kasutama *IEC 61850* standardi. Tsentraliseeritud süsteemi loomiseks ei pea ilmtingimata järgima *IEEE WG K15* poolt pakutud variante. CPC 5 süsteemi andmesideskeemi ehk arhitektuuri näide joonisel 1.13 on pigem suunatud näitama põhimõtet, kuid mitte andma kindlat juhendit süsteemi loomiseks. Antud arhitektuur on lähemalt vaadeldud peatükis 2.2.



**Joonis 1.13. CPC 5 arhitektuuri näide, IEEE[6]**

Seoses mikrovõrkude populaarsuse kasvuga, arvatakse, et tsentraliseeritud süsteemid on tulevikus võrgu arukad juhtimissõlmed. Tõenäoliselt hakkavad tsentraliseeritud süsteemid olema võrguanalüüsi keskusteks. Need hakkavad vahetama kogutud infot omavahel: teostavad vajalikke juhtimisi ja seejärel esitavad aruannet juhtimiskeskusesse. Antud viis võimaldab oluliselt koondada juhtimiskeskustesse edastatava infot ja vähendada inimvigade tõenäosust võrgu juhtimises.

## 2. Alajaama releekaitse ja juhtimise süsteemide arhitektuurid

Võrguettevõttel nagu kommertsüksusel on põhieesmärgiks tulu toomine. Kuna võrguettevõtte tulusid reguleerib antimonopoolne riiklik organ, ei saa võrguettevõtte seda teha hinna pideva tõstmisega. Üksnes sellega on võrguettevõttel kohustused klientide ja partnerite ees elektrivarustuskindluse osas, mis nõuavad investeringuid elektrivõrku. Selleks, et võrguettevõtte püsiks, on võimalus optimeerida võrgu moderniseerimisele ja laiendamisele suunatud projektide kapitali kulusid(*CapEx*). Näiteks, hankida tulevikukindlat varustust või varustust, mille koostisosad on odavamad. Samamoodi võib optimeerida ettevõtte käidu kulusid(*OpEx*) õigete investeerimise sammude tegemisega, näiteks, ostes varustust, mida saab kergemini seadistada või harvem hooldada ilma, et selle töökindlus langeks.

Alajaama sekundaarosaga seotud *CapEx* on ehitatava või renoveeritava alajaama materjalide, tööde ja seadmete hankimine. *OpEx* on kulutused võrguettevõtte personali väljaõpeks või spetsialistide töö ostmiseks, sekundaarosa hooldustöödeks, releekaitsete ja automaatika perioodiliseks testimiseks ning muud kulud, mis on seotud alajaama sekundaarseadmete elutsükliga. Ausa konkurentsi nimel peab võrguettevõtte avalikult esitama nõuded ja spetsifikatsioonid alajaama varustusele. Releekaitse ja automaatika seadmetele esitatavad nõuded fiidrite kaupa ettevõtte Elektrilevi OÜ poolt on võetud näidisenä, sest see omab suurt kogemust jaotusvõrgu haldamises ning on kursis viimastega turul olevate seadmete versioonidega ja võimalustega. Kaitseseadmeid rühmitatakse järgnevalt: sisendfiidri terminal, kaks tüüpi väljundfiidri terminale (esimene keerukam, teine lihtsam), SVL terminal, (T)RLA terminal (trafode RLA teostamine), PT terminal, KP terminal, signaaliterminal. Põhiline võimekus, mida peavad tagama kõik seadmed on: omama abipingetoidet 110 VDC (eelistatud Elektrilevi OÜ-s), 3 faasi voolude ning I<sub>o</sub> sisendeid (1A), liinipingete ning U<sub>o</sub> sisendeid (100VAC), 15 valgusdioode esipaneelil, rikkesignaali väljundkontakti (IRF), 2 optilist sideliidest, toetama IEC 61850 protokollil, teenindusliidest esipaneelil, mnemoskeemiga kuvarit, funktsioonide lihtsustatud juhtimist (programmeeritavad nupud), sündmuste ja häiresalvestit. Binaarsisendite hulk erineb 10-31 tükki vastavalt terminali tüübile ja lahendusele, binaarväljundite hulk varieerub 8-25 tükki. Elektrilistel suurustel baseeruvate kaitsmete ja automaatika funktsioonide liik ja hulk oleneb fiidri tüübist. Mõõtmised primaarseadmete juhtimised/asendid ja välja arvatud väärtused saadetakse välja fiidritest, kus nad on kasutusel.[25] Sekundaarsüsteemi ülesehitus ehk arhitektuur peab tagama nõutud

funktsioonide täitmist võimalikult kiiresti, ilma vigadeta, ilma katkestusteta ja reaalaja aruandlusega juhtimiskeskusesse. Kui räägitakse arhitektuurist, siis peetakse meeles seadmete vaheliste sidemete ülesehitust, protokolle, sidekanaleid.

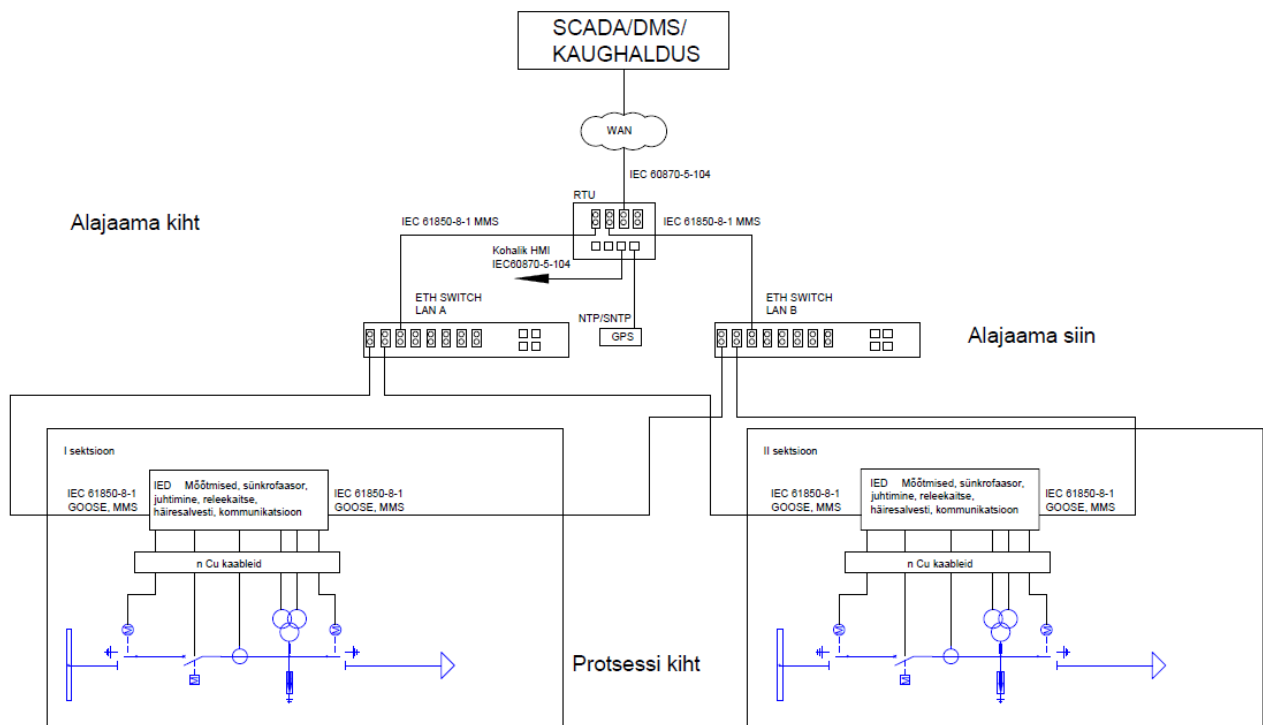
## **2.1. Releekaitse ja juhtimise süsteemi hajutatud ja tsentraliseeritud arhitektuuride näidised**

### **2.1.1. Hajutatud arhitektuuri näidis**

Hajutatud arhitektuur on *IED* fiidterminalide põhine lahendus, kus iga lahtri releekaitse ja automaatika funktsioone täidab eraldi seisev seade mõõtmise, kaitse-, automaatika-, signaliseerimis-, kommuniqueerimis-, sündmuste salvestamise ja kvaliteedi seire funktsioonidega. *IEC 61850* järgi kommunikatsioon vertikaalis ehk *IED-RTU* peab olema teostatud *MMSi* kaudu, kommunikatsioon horisontaalis omavahel *GOOSE* kaudu liialdatud *RSTP* abil sidekanaliga. Selleks, et *IED* hakkaks saatma vertikaalselt andmeid ülesse, on vaja seda vastavat konfigureerida ja määrata, mis andmemahd hakkab liikuma *RTU*-sse. *RTU* sees tehakse konfiguratsiooni samamoodi, et see teaks mis *IED* plokist ta peab küsima vajaliku infot ja millist saatma *IEC 60870-5-104* protokolliga *SCADA*-sse ja kohaliku *HMI*-sse. Hajutatud arhitektuuri *PRP* protokollil baseeruv sidemete on kujundatud joonisel 2.1. Joonisel ei ole näidatud *RTU I/O* moodulite ühendust, kuid tavaliselt abipingesüsteeme juhtimist ja nende indikatsioone lülitatakse otseselt *RTU*-sse kasutades *RTU RS-232 serial* liidest.

Kujutatud arhitektuuri välja ehitamiseks on vaja klemmkappi klemmidele viia kõik sekundaarseadmete mõõtmiste väljaviigud, abikontaktid, andurid ning seejärel ühendada sama juhtmete kogusega neid fiidri terminali. Seejärel on vaja luua füüsilisi sidekanaleid seadmete vahel, kus liiasuse tagamiseks kasutatakse seadistatavaid tööstuslikke *switche* (seadmed peavad pooldama liiasuse protokolle *RSTP/HSR/PRP* ning *VLAN* ja *priority tagging*).[25] Sidekanaleid luuakse *100BaseFX* kiudoptiliste juhtmetega ning *IED* omavad selle jaoks kaks optika porti. Juhul, kui pole võimalik kasutada optikat mõne seadme ühendamiseks, kasutatakse meedia konverterid, sest üldine nõue on optilised sidekanalid. Järgnevas tuleb süsteemi seadistamine: fiidriterminalide seadistamine (side parameetrite seadistamine, sätete ja loogika paika panemine, *IED* konfiguratsiooni failide loomine, alajaama konfiguratsiooni failide loomine lõpus), *RTU* seadistamine (side parameetrite seadistamine, *IED* signaalide sissekirjutamine, ülesse aadresside omastamine, *RTU I/O* seadistamine), kohaliku *HMI* seadistamine, aja sünkroniseerimise parameetrite paika panemine, sideseadmete seadistamine

(switchi, tulemüüri jne seadistamine). Pärast seadistamist toimub kaitsmete, automaatika ja signaalide testimine. Selleks, et testida läbi kõik fiidrite kaitsmed on vaja igasse lahtrisse ühendada testimisseade ning sekundaarahelatesse lasta läbi voolud ja pinged ning kontrollida releekaitse ja automaatika tööd vastavalt spetsifikatsioonile ning sätetele. Koos kaitsmete testimisega võib toimuda üheaegselt ka signaalide testimine, kus insener tekitab signaale ja need peavad õigesti jõudma SCADA-sse ja HMI-sse. Oluline on see, et signaali nõutud liik vastaks realselt seadistatule. Näiteks juhtimissignaali on tavaliselt duubel signaal ning RTU sees peab olema vastavalt seadistatud „vali enne teostamist“. Signaalide testimise käigus simuleeritakse mõõtmiste infot, vahetatakse lülitite asendeid, tekitatakse sündmusi, häiringuid ja siderikkeid. Juhul, kui kõik on seadistatud õigesti, see ei võta niivõrd kaua aega. Kui RTU seadistamisel tekib viga, mis on seotud IED mitte täieliku konfigureerimisega, siis aega vea parandamiseks kõikides võrgu lülides võib minna palju rohkem.



### Joonis 2.1. Hajutatud arhitektuuri näidis PRP protokoll liiasusega

Antud töö aja arvestamisel oletame, et kõik seadmed töötavad õigesti. PRP liiasus peab olema toimiv siis, kui üks ühendus langeb rivist välja. PRP protokoll lubab null seiskamise aega, kuid SCADA-sse siderikke signaal ei saabu.

### 2.1.2. Tsentraliseeritud arhitektuuride näidised

Tsentraliseeritud arhitektuuri väljaehitamisel mõeldakse funktsioone, mis on seotud protsessikihi eraldamisega juhtimisfunktsioonidest. See võimaldab luua töökindla protsessikihi varustust, mis teeniks sama kaua kui primaarvarustus ning sellega välditakse varase väljavahetuse vajadust. Arhitektuuri loomist tegi taas võimalikuks uus telekommunikatsiooni standart *IEC 61850 (IEEE PES WG K15[6])*. Tsentraliseeritud arhitektuuri võrgu topoloogiad on tihedalt seotud uute liiasusstandardidega *HSR* või *PRP*. Tsentraliseeritud rele kaitse ja automaatika (*CPC*) süsteem omab võimsat arvutamisploki, mis tagab tulevikukindlust. Mikrovõrkude arv pidevalt suureneb ning tarbijad hakkavad ise elektrit tootma. Uute liitumiste puhul *CPC* suudab pakkuda võimalusi tarkvara uuendamiseks ja uute kaitse või monitoringu algoritmide lisamiseks ilma, et peaks suuri ümberehitusi korraldama. Saartalitluse puhul võib alajaam olla mikrovõrgu juhtimiskeskuseks. Füüsilisteks sidekanaliteks arhitektuur eeldab kiudoptilisi juhtmeid. Protsessikihi ja *CPC* vahel liiguvad mõõdetud *SV*-d koos *GOOSE* sõnumitega, vertikaalseks sideks on *MMS*. Laialt pakutakse kasutada protsessikihi tasemel *IMU*-d, mis kiirendab ja kindlustab lihtsamate kaitsmete toimimist (*VLTK*, Liigvoolukaitse 50/51), saates infot *CPC*-sse *MMS*-ide kaudu. *CPC* on mõeldud kõikide seadmete kommunikatsiooni keskpunktiks[6]. Kui hajutatud süsteemiga alajaamas relekaitse ja automaatika insener, telemaatika insener ja arvestite paigaldaja teevad seadistustöid eraldi ning on selge, mis vastutusala on igal juhul, siis tsentraliseeritud arhitektuuri puhul pole see enam nii lihtsalt eristatav.[26] Protokoll *IEC 61850* ilmumine mõjutas *CPC* ja hajutatud arhitekture, vähendades nende erinevusi. *IED* seadmeid hakati tootma vahelise koostöövõimega ning liiasuse protokollide pooldamisega. Lähitulevikus oodatakse mõõtmiste ning monitoringu andmete *IEC 61850* protokolliga edastamist.

*CPC* arengut aitavad kaasa mittekonventsionaalsed mõõte- ja üheldavad seadmed (*MU*) konventsionaalsete ja mittekonventsionaalsete mõõteseadmete jaoks. Mittekonventsionaalsed voolu- ja pingeadurid, mis saadavad mõõteandmeid *IEC 61850-9-2 SV* kujul protsessisiini, töötavad optikaseaduste rakendamise põhjal. Vooluandur toimib *Faraday Effect*'i peal järgnevalt: genereeritakse kaks kiirt ning saadetakse need kiudoptikaga voolujuhi tasemele, seejärel need muundatakse tsirkulaarseks vasakuks ja paremaks polariseeritud kiirteks. Kiired liiguvad mööda voolujuhet mitu korda ning selle käigus üks kiireneb, teine aeglustub olenevalt magnetvälja tugevusest. Seejärel neid muundatakse tagasi lineaarseteks ja saadetakse sensorisse. Kiirte faaside erinevus teisandatakse voolu tasemeks voolujuhi sees.

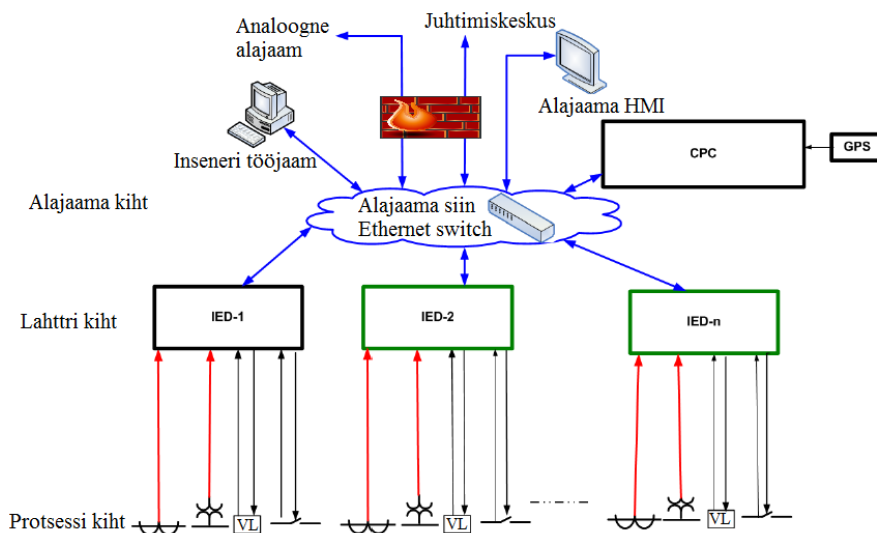
Pinge sensor toimib sama printsiibi järgi kasutades *Pockels* puuri. Selle puhul muutub polarisatsiooni liik, mis oleneb magnetvälja intensiivsusest. Samuti sobib voolumõõtmiseks mittekonventsionaalne *Rogowski coil*, mis omab õhksüdamikku ning selle tõttu ei küllastu. See annab välja mV suurusjärgus pinget ning võib olla kasutusel seadmetega, mille analoogsisendi takistus on suur. Üks ja sama väljund võib olla kasutatud nii kaitsme, kui ka kommerts mõõtmiste jaoks. Täpsuseks on kuni 0,1%.

*Merging unit*-id ühendavad mittekonventsionaalse ja konventsionaalse primaarvarustuse, mis ei oma digitaalset liidest, digitaliseeritud protsessisüsiniga. Tänapäeval nende funktsioonide hulka kuuluvad: signaalide edastus, mõõtmiste sünkroniseerimine, analoogse ja digitaalse liidese olemasolu. Kaug sisend-väljund moodulid (*RIO*) täidavad staatuse edastamise ja juhtimisliidese funktsiooni. On olemas võimalused eraldiseisva *RIO* ja *MU* kokku ühendada ühte protsessi- ja lahtitaseme liideseadmesse. Seadme võimekus on mõõtmiste, staatuste edastamine ja juhtimiste edastamine/vastuvõtmine. Kui lisada taolisele seadmele arvutusvõimekust ja lihtsamat releekaitse funktsionaalsust nagu liigvoolukaitse ja VLTK, siis võib rääkida *IMU*-st (*Intelligent Merging Unit*) ehk nutikast ühendavast seadmest.

Kõrge tootlusega arvutusplatvorm (*High-Performance Computing platform*) on *CPC* kõrge töö- ja tulevikukindlusega tuum. *CPC*-ga ühendatakse protsessi kihi seadmeid ja teisi alajaama kihi seadmeid optikakaablitega. See tagab suurt vase säästu ning tagab ohutust sidekanalile magnetväljade toimest. Keskarvuti on võimeline töötlemas kogu alajaama andmehulka, millest suur osa on kõrge resolutsiooniga *SV* mõõtmised. Kuna lisaks igal seadmel alajaamas on olemas seire ja jälgimissüsteemid, siis andmemaht, mida arvuti peab jõudma ära töötlemas on suur. *CPC*-arvuti kõrge arvutamisevõimekus on tagatud standartsete vabalt kättesaadavate riistvaraliste osadega, mis annab võimalust lihtsamini teha vahetust ja uuendust. Samamoodi see lubab hoida laos vaid piiratud arv süsteemi riistvaralisi komponente. Antud lähenemine annab võimalust releekaitse ja automaatika seadmete tootjatele keskenduda tarkvara optimeerimisele ja keerukamate algoritmide arendamisele. See omast küljest annab võimalust säästa energiat, mida tavaliselt kulutab arvuti oma protsessidele. *CPC*-platvorm käsitleb ainult digitaliseeritud andmeid. Tähtsate andmete suur hulk nagu *GOOSE* ja *SV* nõuab kõrget andmeside kanalite kättesaadavust ja läbilaskevõimet. Tänapäevase *CPC* kasuks on olemas *HSR/PRP* protokollid, mis ei taga siderikke avastamist, aga omavad null ümberlülitamise aega. Kriteeriumiks liiasuse protokollide valimisel on minimaalsed kulud maksimaalsele sidekanali töövõimekusele. Aja sünkroniseerimise täpsus mängib olulist rolli keskarvuti ühendamiseks teiste seadmetega. Rohkesti kasutatakse *NTP* ja

*SNTP* võrguaja protokolle. Kui jaotatakse aega näiteks *gateway*-st (lüüs[8]), siis *gw* on ajaserveriks teistele seadmetele. Ise *gateway* võib omada *GPS* antenni. Samamoodi on olemas võimalus kasutada ületäpse aja (*PTP IEEE 1588*) protokoll, mille kasutamine tagab alla  $\mu$ s sünkroniseerimise täpsust kuni 16 kommunikatsiooni hüpetega võrgus[6].

*CPC* arhitektuuri ehitamine baseerub uute kommunikatsiooni, aja sünkronisatsiooni, mõõtmiste muundamise ja mude alajaamade automaatika ja releekaitsmega seotud tehnoloogiate ellu viimisel. *CPC* arhitektuur võib olla erinev olenevalt konkreetsest lahendusest ja ehitusolukorrast, sest see on mõeldud paindlikuna võrdselt nii alajaama rekonstrueerimise otstarbe jaoks, kui ka nullist uue lahenduse välja ehitamiseks. Rekonstrueerimise korral lähtutakse olemasolevast süsteemist ning vaadatakse, mida võiks kasutada *CPC* paigaldamisel. See annab märkimisväärset *CapEx* ja *OpEx* vähendamist: näiteks andmeside väljaehitamisel olemasolevate switchide puhul või *IED* olemasolu funktsioonide reserveerimiseks. Tänu *CPC* kasutamisele vaskjuhtmestiku hulk väheneb, riistvara vahetus selle eluea lõpus on lihtne ja nähtamatu tarkvara uuendus on võimalik ilma töö katkestusteta.[6]. Samuti lisaks eelmainitule, *CPC* süsteem on suunatud pakkuda parandatud varustuse jälgimist, põhinedes varustuse rikkeprognoosile ning vältides olulisi tõsiseid rikkeid koos pikema seiskamisega. Joonisel 2.2. on toodud *CPC* arhitektuuri näidis, kus on esitatud *CPC* kasutamine *IED* laiendusena ja juhtiva elemendina. *IED* on ühendatud vasejuhtmetega *point-to-point* primaarseadmete sekundaarklemmkappi ning *CPC* töövõimekus sõltub *IED*-de ja sidekanali töökindlusest.



**Joonis 2.2. CPC-1 IEEE arhitektuur [6]**

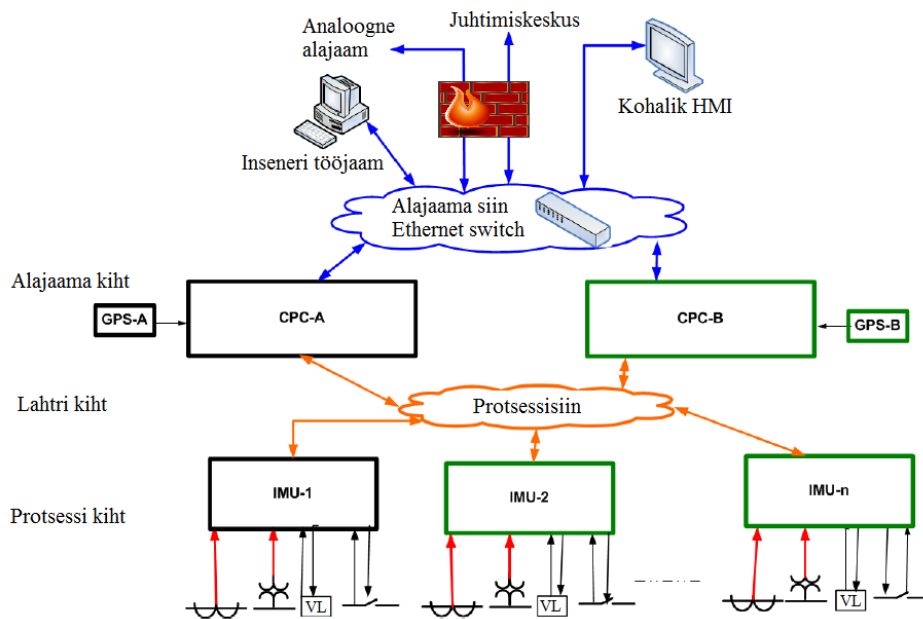
Siin on võimalik, et *IED/CPC* saavad *IEC 61850 GOOSE* ning *SV* omavahel ning *CPC* annab alajaama siini *MMS* reporte sõnumid. Need saadetakse edasi juhtimiskeskusesse ning



*HMI*-sse. Antud lähenemine lubab oluliselt kiirendada *GI* (üldküsitluse) protseduuri *SCADA* poolt. *CPC* saadab *SCADA*-sse ainult muutunud väärtusega infot. Aja sünkroniseerimise serveriks on kasutatud *CPC* süsteemi sisese GPS vastuvõtjaga.

*CPC* koostisosadeks antud juhul oleksid keskarvuti välise kommunikatsiooni mooduliga ja optikakaablid alajaama siini switchini, kust edasi *Gateway*-sse ning *SCADA*-sse ja *HMI*-sse. Nullist *CPC* arhitektuuri ehitamise puhul kehtivad samad majanduslikud ootused. Kõrge tootlikkusega arvuti asub arhitektuuri keskpunktis ning äärtes ühel pool on protsessikiht protsessiseadmetega. Teisel pool on tulemüüride tagused: juhtimiskeskus, andmebaasid ja muud andmete haldajad. Need on ühendatud *CPC* sisese kommunikatsiooni mooduli abil. Eraldiseisvate *IED* funktsioonid on täidetud *CPC* sees keerukate mitmekesiste algorütmidega ning alajaama pilt on täielik ja jälgitav juba alajaama tasemel. *CPC* võib olla nii põhi kui ka varukaitsmeks ja ka teiste *IED* kaugterminaliks. *GOOSE* ühe *CPC* arhitektuuri sees ei ole vajalik siis, kui ei ole ühendatud teisi *IED* või *IMU* külge. See peab kiirendama loogika toimimist väga oluliselt ja välistama sideriket ning kaitse väärtoimimist või blokeeringut. Viga võib juhtuda *GOOSE* puhul, kui kvaliteedi bitt ei tule või tuleb väärtusega null. *I/O* moodulite piiratud arv ja juhitavus ühest kohast teeb *CPC* platvormi seadistamise, testimise ja parandamise ajal mugavamaks. Kvalifitseeritud tööjõud on nõutud samamoodi, nagu hajutatud arhitektuuri puhul. Eelmainitud täpne tegevuste kooskõlastamine tagab info säilimist ja muutuste korraliku jälgimist. *CPC* arhitektuur kujutab endast küberturve poolest hästi kaitstud süsteemi, sest liigipääsu punktide arv on piiratud ja nende jälgimine on lihtsam. Joonisel 2.3. on toodud *CPC* platvormi näidis, kui see oleks põhiline alajaama releekaitse ja juhtimissüsteem.

Siin on tagatud riistvaraline liiasus kahe identse *CPC* kasutamise abiga, mis omavad sõltumatut ühendust protsessisiiniga, alajaama siiniga ja aja sünkroniseerimisega. *CPC* teevad tööd paralleelselt reserveerides üksteist ning omavad identset infohulka töötlemiseks ja edastamiseks. Antud lahendus näidatud joonisel ei taga liiasust protsessisiinile, kuid seda võiks tagada näiteks kasutades *HSR* ringi või *PRP* tähe ja kahte *Ethernet switchi*. Arhitektuuri kuju võib varieeruda olenevalt konkreetsest lahendusest, liiasuse nõudmistest ja ülesannetest, mida soovitakse täita *CPC* abil.



Joonis 2.3. CPC-5 IEEE arhitektuur[6]

## 2.2. Alajaama kaitse ja automaatika arhitektuur ja võrguettevõtte kulud

Võrguettevõtte kulud jaotatakse kapitaalseteks ja operatiivseteks (*CapEx*, *OpEx*). Elutsükli kulude teooria (*LCC - Life Cycle Cost*) järgi on alajaamade elutsükli kulud ( $C_{LC}(t)$ )[27]) klassifitseeritud[26] järgnevalt: kulud rajamisele ( $C_A(t)$ ), hoolduse ja opereerimise kulud ( $C_O(t)$ ), renoveerimise kulud ( $C_R(t)$ ). Seega elutsükli kulud arvutatakse järgnevalt:

$$C_{LC}(t) = C_A(t) + C_R(t) + C_O(t) \quad (1)$$

Rajamise kulude alla käivad kõik sellega seotud kulud: seadmete ost, projekteerimine, tööjõud, testimine, kaabeldus jne. Hoolduse kuludesse kuuluvad plaanitud hooldustööde ja mitte plaanitud hooldustööde kulud. Tavaliselt plaanitud hooldustööde maksumust arvestatakse protsendiga varustuse ostu maksumusest. Mitte plaanitud hooldustööde kulud on kulud rikete parandamiseks, ehk remondikulud. Remondikulud koosnevad varustuse vahetuse hinnast ja trahvi kuludest. Renoveerimise kulude arvestamiseks oletatakse, et varustust vahetatakse peale elutsükli lõppu olenemata sellest, kas see toimib või mitte. See on võrdne varustuse summaarse maksumusega, mis on jagatud elutsükli kestvusega. Sellist jaotust võib võrdeliselt kasutada nii primaar-, kui ka sekundaarosade varustuse elutsükli kulude hindamiseks. Elutsükli analüüs tagab võrguettevõttele võimalust leida optimumi punkti investeeringute koguse ja töökindluse vahel. Siin saavad suure tarbimisega alajaamad kõrgema prioriteedi investeeringutes töökindlusesse. Väiksema tarbimisega alajaamad ei saa varustuse kõrge hinna tõttu uut automaatika süsteemi kuni suure rikkeni või terve alajaama ümberehitamiseni.

Selline lähenemine on tingitud varustuskindluse tagamise nõudega, mille rikkumine toob suuri rahalisi kulutusi võrguettevõttele. Iga elektri plaanimata katkestusele järgneb trahv, mida arvutatakse olenevalt edastamata jäänud energiast ja tarbija kategooriast.

Selleks, et oleks lihtsam hinnata arhitektuuride mõju kulude suurusele, on otsustatud kasutada näiteid [27] ja [28], kus arvutati alajaama automaatika süsteemi elutsükli maksumust. Alljärgnevad valemid on kasutusel kulude komponentide  $C_A(t)$ ,  $C_R(t)$ ,  $C_O(t)$  välja arvutamiseks:

$$C_A(t) = \sum_{i=1}^n Inv_i, \text{ kus} \quad (2)$$

$n$  on seadmete kogus

$Inv_i$  on  $i$ -nda seadme investeeritud maksumus

$$C_R(t) = N_{Ren_i} * Inv_i, \quad (3)$$

Kus  $N_{Ren_i}$   $i$ -nda seadme vahetuse kordade arv

$$C_O(t) = C_{MC}(t) + C_{MP}(t), \quad (4)$$

Kus  $C_{MC}(t)$  on plaanimata hoolduskulu, mis koosneb trahvi summast tarnimata teenuse eest  $C_P$  ja väljavahetamise kulust rikke korral  $C_{CR}$ .  $C_{MP}(t)$  on plaanitud hoolduskulu, mis on ostukulu summast protsent.

$$C_P(t) = k_p * F_S * t_{S_{REP}}, \quad (5)$$

Kus  $k_p$  on trahvi koefitsient,  $F_S$  on süsteemi avarii tõenäosus,  $t_{S_{REP}}$  on süsteemi taastumise aeg.

$$C_{CR}(t) = Crep_i * F_i(t), \text{ kus} \quad (6)$$

$Crep_i$  on  $i$ -nda seadme väljavahetuse hind ja  $F_i(t)$  on seadme rikke tõenäosus.

Lähtepunktid, mida arvestatakse analüüsil[28]:

- Hoolduse periood on 5 aastat.
- Kogu periood on 40 aastat
- Seadmete hinnad on umbkaudsed.
- Seadmete eluiga on umbkaudne, kuid sarnaste funktsioonidega seadmetel on sama.
- Trahvi suurus ööpäevas on 10000. Avarii tõenäosus\* 0,001 ja maksimaalne taastamise aeg on 0,7 ööpäeva. \*Avarii juhtub kindlasti siis, kui lahter jääb kaitseta.
- Süsteemi taastumise aeg on otsuse tegemise aeg korrutatud süsteemi seiskamise ajaga.

- Töökindluse ja kättesaadavuse funktsioonid on konstantsed kogu seadmete eluea jooksul.
- NPV ei ole arvestatud.
- Kaitstav jaotla omab kaheksat lahtrit, millist kaks on sisendlahtrid, üks SVL, kaks pingetrafo ja kolm väljundlahtri. Arhitektuurid omavad kaks *switchi* alajaama tasemel optika ühendustega, *gateway/RTU*, kaheksa *IED* või *MU*, optikakaableid, vasekaableid. Tsentraliseeritud süsteem omab keskarvutusseadet, mille juurde lähivad pikemad optikakaablid. Tema mõõte ja juhtimismoodulid on ühendatud protsessikihi vasest juhtmetega.
- Tööjõu kulu on otsustatud lugeda samaks, sest vasega ühenduste arv on samasugune. Eeldatakse, et personal on osav ja täidab tööd kiireloomuliselt.
- Laos on olemas piisav kogus varuosasid ning aeg kohale toimetamiseks on sama.
- Otsuse tegemise aeg on lühike.
- Plaanilise hoolduse maksumuseks on 0,05% kogu maksumusest iga seadme kohta.
- Inimresursi maksumus on 10% vahetatava seadmeelemendi maksumusest iga vahetatava seadme kohta.

### 2.2.1. Hajutatud arhitektuuri elutsükli kulud

Hajutatud arhitektuur on välja ehitatud *PRP* liiasuse protokolliga põhjal nagu on näidatud joonisel 2.1. Lahtrite kaitseterminalideks on 8 *IED*. Need on ühendatud primaarseadmetega läbi klemmkapi punktist punkti vaskühendustega. Vaseühenduse eluiga on lõpmatu ning see on olemas mõlemal arhitektuuril võrdses koguses, seega seda kuluartiklit ei arvestata järgnevalt. Iga *IED* omab kaks *Ethernet* optikaporti ning on ühendatud mõlemate *switchidega* optikakaablite abil. *RTU*-sse ning *HMI*-sse tuleb kaks optikajuhet *switchidest*. Kui üks *switch* läheb rivist välja, on *IED*-d samuti kättesaadavad teise *switchi* kaudu. *RTU* omab *GPS* ajasünkroniseerimist ning jagab aega läbi võrgu *IED*-dele. *IED* ei ole liialdatud ning ühe *IED* rikke korral jääb lahter põhikaitseta. Väljundfiidrid on reserveeritud sisendfiidrite poolt, kuid siin on olemas ajaviide, mis võib olla fataalne suure liigvoolu korral. *CPC* ja *IED* põhiste lahenduste omavahel võrdlemine on suhteliselt keerukas: süsteemid omavad erinevaid lähenemiseid funktsionaalsuse paigaldamisele. *IED*-l on kogu riistvara ühes kohas. *CPC*-l paikneb riistvara hajutatult, kuna see on mõeldud liialdatud töökindla süsteemina. Selleks, et võrrelda *CPC* maksumust *IED*-ga on otsustatud teha hinna ekvivalendi välja arvutust. Esiteks, oli mõeldud välja arvutada kahe *CPC* hinda koos kaartidega [29] ning jaotada seda kõikide

fiidrite vahel. Mõõte- ja sisend-väljundseadmed võivad olla CPC-1 nii ühes seadmes, kui ka erinevates. Teiseks, allikas [29] pakub, et voolu- ja pingemõõte seadmed ja sisend-väljund seadmed on erinevad. Mugavuse pärast oli mõeldud koondada neid ühte MU seadmesse vastavalt ühe lahtri vajadustele ning välja arvutada selle hinna ekvivalenti. Seejärel CPC ning MU hinna ekvivalendid olid summeeritud. Saadud väärtus oli võetud baashinnaks, millega võrreldi kõiki ülejäänud hindasid. Tabelis 2.1. esitati põhiliseid hajutatud arhitektuuri kuuluvate seadmete ühiku-, summaarsed maksumusi ning oletatavat eluiga. Siin optikakaabli ühiku hinnaks on 80, HMI hinnaks – 2000, GPS hinnaks – 200 ning need taandati baashinnale. Oletatakse, et hinnad esmasele paigaldusele on mõlemal arhitektuuril samad ning ei neid kajastata investeeringute kuludes. Selline lihtsustus on pakutud, selle pärast, et hajutatud arhitektuur nõuab võrdselt projekteerimis ja seadistamiskulusid ning CPC vähem joonistamist, kuid rohkem seadistamist. Paigaldus on ajaliselt umbes sama, sest vase ühenduste hulk on sama.

**Tabel 2.1. Hajutatud arhitektuuri kapitaali investeeringud ning seadmete eluiga**

Seade	Kogus	Ühiku hind	Maksumus	Eluiga[28]
IED	8	0,61	4,86	20
SW	2	0,24	0,49	15
TS	1	0,05	0,05	25
HMI	1	0,49	0,49	25
RTU	1	4,86	4,86	25
FO	18	0,02	0,35	25
<b>Kokku</b>			11,08	

Hajutatud arhitektuuriga varustatud alajaama elutsükli kulude ajakava arvutamine oli korraldatud perioodiks 40 aastat sammuga 5 aastat. Iga 5 aasta tagant oli läbiviidud plaaniline hooldus, mille maksumus on 0,05% kogu süsteemi maksumusest. Oletame, et 15 elutsükli aastal juhtus väljund fiidri IED tõrge, mille järel see riknes. Relee rikke ajal toimus kahefaasiline lühis ning põletas lühikese kaabli lõiku. Sisendfiidri liigvoolukaitse rakendus 120 ms möödumisel pärast lühise algust, kui vool oli juba ohtlikult suur. Kaabli lõiku on parandati umbes 17 tunni jooksul, kuid trahvi suuruseks sai 7 ühikut. Kaabli lõigu hinda ei arvestata, sest kaabel oli olemas keldris reservis ning parandustööd ei kuulu sekundaartööde alla. IED sai vahetatud enne selle eluea lõpu. Ülejäänute seadmete väljavahetus toimus graafiku järgi vastavalt elueale. Tabelis 2.2. on esitatud hajutatud arhitektuuri elutsükli kulud, kuhu lõpptulemuse arvestamiseks on lisatud ka esialgne investitsiooni (CA) kulu.

**Tabel 2.2. Elutsükli kulud hajutatud arhitektuuri puhul 5 aastate kaupa**

Hajutatud arhitektuur						
Aasta	CA	Cr	CMP	CMC	Co	LCC
0	11,08					11,08
5			0,55		0,55	0,55
10			0,55		0,55	0,55
15		0,53	0,55	7,67	8,22	8,76
20		4,67	0,55		0,55	5,23
25		6,32	0,55		0,55	6,87
30		0,53	0,55		0,55	1,09
35		0,67	0,55		0,55	1,22
40		4,67	0,55		0,55	5,23
<b>Kokku</b>	11,08	17,40	4,43	7,67	12,10	52,69

Aastatel 20 ja 40 on arvestatud 7 *IED* hinda, sest üks oli vahetatud aastal 15 ning seejärel aastal 35. Kogu elutsükli maksumus on võrdne liigikaudu 53 s.ü.

### 2.2.2. Tsentraliseeritud arhitektuuri elutsükli kulud

Tsentraliseeritud arhitektuuri näidisenä on esitatud arhitektuur, mis põhineb *CPC-5*[6] arhitektuuri näidisel joonisel 2.3. Protsessisiini kasutusel ei ole. See tähendab, et *MU* seadmed on ühendatud primaarseadmetega analoogselt nagu hajutatud arhitektuuri *IED*-d – vaskühendustega. Iga *MU* on ühendatud optikakaabliga mõlema *CPC* juurde, moodustades *PRP* tähe. *CPC* hind on arvestatud koos kaartidega. *CPC* arhitektuuris *RTU*-t asendab kommunikatsiooni moodul (*COM*). *CPC* ühendus moodulisse käib optika kaablitega läbi kahe *switchi*, mille juurde on ühendatud ka *HMI*. Aja sünkroniseerimine käib *GPS*-i abil ning iga *CPC* omab oma allikat. Mõlemad *CPC*-d on identsed. Esimene on põhiline *CPC*, mis täidab alajaama seire, releekaitse, kommunikatsiooni ja automaatika funktsioone. Teine *CPC* asub alati ooterežiimis ning kogub ja töötleb andmeid, kuid ei anna käskluseid ega suhtle *SCADA*-ga. Juhul, kui esimene *CPC* ei ole võimeline tööd jätkama, siis teine kohe asendab seda. Tabelis 2.3. esitati põhiliste tsentraliseeritud arhitektuuri kuuluvate seadmete ühiku-, summaarseid maksumusi ning oletatavat eluiga. Tsentraliseeritud arhitektuuriga süsteemi elutsükkel on 40 aastat pikk 5 aastalise sammuga. Iga 5 aasta tagant toimub hooldus, mille maksumus on 0,05% kogu lahenduse maksumusest. Seadmeid vahetatakse vastavalt eluea pikkustele. *CPC* arhitektuuri iseärasused on arvestatud elutsükli kulude arvutamisel. Näiteks, ühe *CPC* rivist välja langemine käivitab teise *CPC* töösse ning alajaam ei jää kaitsmata.

**Tabel 2.3. Tsentraliseeritud arhitektuuri kapitali investeeringud ning seadmete eluiga**

Seade	Kogus	Ühiku hind	Maksumus	Eluiga[28]
CPC	2	1,89	3,78	20
MU	8	0,53	4,22	40
SW	2	0,24	0,49	15
TS	2	0,05	0,10	25
HMI	1	0,49	0,49	25
COM	1	1,00	1,00	25
FO	18	0,02	0,35	25
<b>Kokku</b>			10,42	

Oletatakse, et *CPC* langeb rivist välja 15-nda elutsükli aastaks, millega kaasneb seadme väljavahetus. Olulisemate elementide välja vahetamisel kaitsmeta aeg on minimaalne ning ei pea olema arvesse võetud. See on võimalik liiasuse olemasolu tõttu. *CPC*-l vahetatakse ainult protsessori moodulit, mis kergendab vahetuse ja seadistamise töid. Sellel juhul üks *CPC* jääb toimima, teises vahetatakse protsessori moodulit ja kopeeritakse konfiguratsiooni. Selline samm-sammuline vahetus on võimaldatud tänu *CPC* moodulipõhisele ehitusele, kus riistvara ei sõltu tarkvarast ja vastupidi. *CPC* vahetuse hinnaks on arvestatud vaid protsessori mooduli hind, ehk 65% *CPC* hinnast. *CPC* süsteem võimaldab ka elementide eraldist testi, mis tähendab, et süsteem ei pea olema kokku pandud töövõime kontrolli ajal. Selline lähenemine võimaldab säästa aega nagu näiteks elementide kalibreerimisel alajaamas.

**Tabel 2.4. Elutsükli kulud tsentraliseeritud arhitektuuri puhul 5 aastate kaupa**

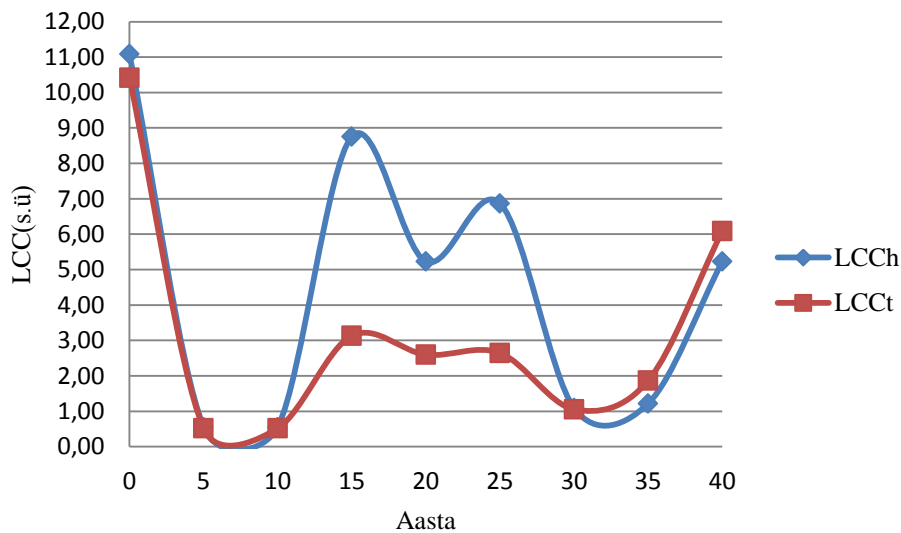
Tsentraliseeritud arhitektuur						
Aasta	CA	Cr	CMp	CMc	Co	LCC
0	10,42					10,42
5			0,52		0,52	0,52
10			0,52		0,52	0,52
15		0,53	0,52	2,08	2,60	3,13
20		2,08	0,52		0,52	2,60
25		2,12	0,52		0,52	2,65
30		0,53	0,52		0,52	1,06
35		1,35	0,52		0,52	1,87
40		5,57	0,52		0,52	6,09
<b>Kokku</b>	10,42	12,19	4,17	2,08	6,24	35,10

Tabelis 2.4. on esitatud tsentraliseeritud arhitektuuri elutsükli kulud, kuhu lõpptulemuse arvestamiseks on lisatud ka esialgse investitsiooni (CA) kulud. Esimest *CPC*-d vahetati 15-ndal aastal rikke tõttu ning arvestati vaid 65% hinnast, sest kaarte ei vahetatud. Seejärel seda

sama *CPC*-d vahetati plaani järgi aastal 35. Aastatel 20 ja 40 vahetati teist *CPC*-d. *MU*-id vahetati aastal 40. Kogu elutsükli maksumus on võrdne liigikaudu 35 s.ü.

### 2.2.3. Arhitektuuride elutsükli kulude võrdlemine

Tsentraliseeritud ja hajutatud arhitektuuri elutsükli maksumuste võrdlemiseks on välja ehitatud graafik joonisel 2.4.



**Joonis 2.4. Elutsükli kulude hajutatud ( $LCC_h$ ) ja tsentraliseeritud ( $LCC_t$ ) arhitektuuride üldistatud analüüs.**

Alljärgnevas võrdlemises on referentsväärtusega tsentraliseeritud süsteemi rajamiskulud.

- 0. aasta:  $LCC_h$  on 6% kõrgem, kui  $LCC_t$ . See võib olla tingitud sellest, et hajutatud arhitektuuri *RTU* maksab sama palju, kui 8 *IED*. Kõik need seadmed on tootjapõhised.
- 5. aasta: mõlemate arhitektuuride elutsükli kulud on liigikaudu võrdsed. Kulu suurus siin sõltub kogu arhitektuuri maksumusest.
- 10. aasta: sama, mis 5-ndal aastal, kuid trend läheb tõuseb, sest 15. aastal juhtus avarii.
- 15. aasta:  $LCC_h$  kulud on globaalses maksimumis, mis on tingitud *IED* rikkega. Teostati *IED* vahetus ja koostati trahv tarnimata teenuse eest. Toimus esimene *switchide* vahetus.
- $LCC_t$  tõusis, sest *CPC* tekkis rike. See ei põhjutanud mitte mingit seiskamist, vaid *CPC* välja vahetamist, mis tõi olulist säästu.



- 20. aasta:  $LCC_h$ -s vahetatakse 7  $IED$ , mis on ligi pool riistvara alajaamas.  $LCC_t$ -s vahetatakse ühte  $CPC$  protsessori moodulit. Tsentraliseeritud arhitektuuri kulu on liigi 56% madalam.
- 25. aasta:  $LCC_h$ -s vahetatakse ülejäänud riistvara. Kogu alajaama riistvara on nüüd uuendatud 25 elutsükli aasta peale, mis töö viie aastaga peaaegu alginvesteeringuga kahekordset kulutust.  $LCC_t$ -s vahetatakse kommunikatsiooni riistvara v.a *switche*. 25-ndaks eluaastaks opereerimise kulud tsentraliseeritud arhitektuuriga alajaamale on ligi 90% alginvesteeringust. 25-ndaks aastaks alajaamade alginvesteeringu ja kogu elutsükli kulu on hajutatud arhitektuuriga alajaamas 33,05 s.ü. ning tsentraliseeritud arhitektuuriga alajaamas 19,83 s.ü. Erinevus on 68%.
- 30. aasta: Suuri investeeringuid ei ole. Vahetatakse *switche* ning tehakse hooldust.
- 35. aasta:  $LCC_h$ -s vahetatakse  $IED$ .  $LCC_t$ -s vahetatakse ühe  $CPC$  protsessori moodulit.  $CPC$  arhitektuuriga alajaama elutsükli kulu on siin suurem, sest  $CPC$  protsessori moodul maksab rohkem, kui üks  $IED$ .
- 40. aasta:  $LCC_t$ -s vahetatakse  $MU$  seadmeid ning ühe  $CPC$  protsessori moodulit.  $LCC_h$ -s vahetatakse 7  $IED$  seadet. 40- aasta kulud hajutatud arhitektuurile on 52,69 s.ü. ning tsentraliseeritud arhitektuurile 35,10 s.ü. Erinevus on 50,1%.
- Kokkuvõtteks võib öelda, et tsentraliseeritud arhitektuurile kulub vähem ressursse, mis on tõestatud üldistatud elutsükli analüüsiga. Lõpliku hinnangu järgi tsentraliseeritud lahendusega alajaam on 50,1% odavam, kui hajutatud arhitektuuriga alajaam.

## **3. Tsentraliseeritud kaitse- ja juhtimissüsteemi rakendamise kogemus Eestis ja Rootsis**

### **3.1. Tsentraliseeritud kaitse- ja juhtimissüsteemi rakendamine Eesti jaotusvõrgus pilootprojektina**

Elektrivõrgu ettevõtte Elektrilevi OÜ sai pakkumise hollandi ettevõttelt Locamation proovile võtta tsentraliseeritud releekaitse ja juhtimise süsteemi *SASensor*®. Selleks, et süsteemi paigaldada rekonstrueerimise lahendusena oli vaja leida väiksema tarbimisega ning piisava pindala kogusega alajaama. Kuna süsteem on Eesti elektrivõrgu jaoks uus ja seni proovimata, ei saa sellele usaldada kohe tõsisemat objekti. Otsustati, et kõige paremini sobib 1970-ndatel aastatel ehitatud alajaam 808. Alajaamal on 7 aktiivset väljundfiidrit, 1 reservis; 2 trafo fiidrit, 2 sisendliini, 1 SVL. Alajaama elektritarbijate arv on liigikaudu 4000 ekskursiooni läbiviija andmetel. Endine alajaama varustus oli koostatud elektromagnet nähtusel põhinevatest releedest ning Saksamaal toodetud võimsuslülititel. Eestis toodetud telemaatika TELEM-2C oli paigaldatud alajaama aastal 1999. Alajaama üldine seisund vajab parandamist. Sekundaarseadmed on elanud oma eluea üle moraalselt ja füüsiliselt.

#### **3.1.1. Tsentraliseeritud süsteemi *SASensor*® omadused ja riistvara**

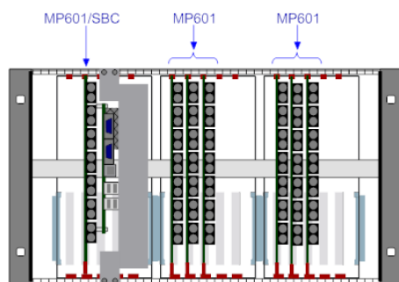
Süsteemi *SASensor*® väärtus seisneb tsentraliseeritud süsteemi põhiomadustes. Ülesehituse poolest *SASensor*® süsteemi arhitektuur on sarnane *CPC-5*[6] arhitektuuriga, mis on esitatud *IEEE* poolt. Arhitektuuri lihtsus tagab rajamise ja hoolduse kulude vähendamist. Süsteemi *SASensor*® platvorm koosneb riist- ja tarkvarast, mis pole omavahel tihedalt seotud. Riistvara jaguneb arvutus- ning protsessi liidesriistvaraks (*Computing and Process Interfacing hardware*). Protsessi liidesriistvara asub vahetult primaarseadmete juures ning seda mõeldakse primaarseadme osaks. Arvutusriistvara vananeb ning vajab vahetust. See asub protsessi tasemest kaugemal. Selle eraldamine tagab, et personal ei ole ohustatud kõrgepinge seadmete poolt: arvutuselementide vahetamine ei ole seotud suure elektriohuga.[30] Kõik elemendid on süsteemist lihtsasti eraldatavad ja vahetatavad. Süsteem *SASensor*® kasutab avatud platvormi põhimõtted. *SASensor*® toimib nagu tavaline arvuti, mille tarkvara toimib operatsiooni süsteemi põhjal. On võimalus kasutada nii tootjapoolse tarkvarat, kui ka teiste tootjate poolt arendatud rakendusi. Arendajate jaoks on olemas võimalus oma autoriõigusi algoritmide suhtes kaitsta krüpteerimisega. Kasutajal on võimalus tellida või iseseisvalt luua

standartseid tüüpilisi lahtrid. Sellisel viisil loodud lahtrid on võimalik kopeerida ja kasutada ka teistes objektides, mis kiirendab edaspidist seadistust. Süsteem *SASensor*® ei oma probleeme *IEC 61850 GOOSE*-ga, sest see ei ole vajalik süsteemi lahtritevahelise koostöö jaoks. Kõik lahtrid on arvutusseadme sees virtuaalselt. Tänapäeval hajutatud süsteemi kasutamise perioodi jooksul mõned probleemid siiski tekkivad. Kuna erinevate seadmete koostöö on oluline alajaama kontekstis, siis tuleviku eesmärgiks on tervikliku tsentraliseeritud süsteemi loomine. Küberturve poolest *SASensor*® süsteem omab piiratud liigipääsu punktide arvu. Koos sellega on tagatud sellised kaitse meetmed, nagu isiku tuvastamine, liigipääsu õiguste jaotamine, krüpteerimine.

Alajaama tsentraliseeritud kaitse ja automaatika süsteemi *SASensor*® arvutus- ning protsessi liidesriistvara:

- *CCU – Central Control Unit* [31]

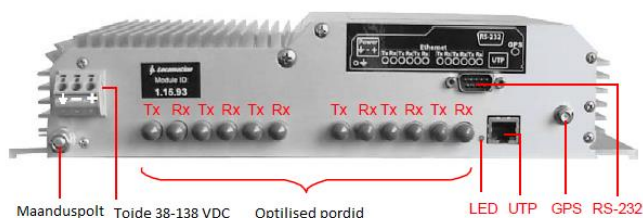
See on süsteemi keskel asuv arvutussõlm. Omab põrandapealset ja tulevikus ka seinapealset modifikatsioone. Põrandapealne modifikatsioon on sobilik suurema hulga Ethernet ühenduste jaoks. Seinapealne modifikatsioon on arendamisel väiksemate alajaamade jaoks. Selle mõte on kulude kokkuhoid. Põrandapealne modifikatsioon omab kolm ühendava plaati (*backplane board*). *CCU* toite pingeks on alalispinge. Ühildav plaat omab 5 *I/O* sloti *MP600* kaartide jaoks ning kaks laiendussloti külgede peal. *CCU* andmesiin põhineb ühildavatel plaatidel. Iga *CCU MP600* seeria kaart omab 7 optilist porti, kuhu saab ühendada *Ethernet* kasutavaid seadmeid. *CCU* kaarte on kahte tüüpi. *MP600/SBC* on kaart protsessoriga, kuhu saab ühendada vaid *simplex* ühendusi. Tavalised *MP600* on sisend-väljund kaardid nagu võrgukaardid, kuhu saab ühendada nii *simplex*, kui ka *duplex* ühendusi. Optikakaablid ühendatakse seadmete külge risti: *Tx* ühendatakse *Rx*-i ja vastupidi. *CCU MP600/SBC* plaat võib olla varustatud ühega kolmest võimalikest protsessoritest. See oleneb nõutavast rakendusviisist. Kaartide vahetamiseks peavad olema tagatud kaitsemeetmed staatilise laengu vältimiseks. *CCU* omab funktsiooni *Watchdog*, mis pidevalt kontrollib seadet ja ühenduse olekut ning katkestuse korral aktiveerub. Kui see funktsioon on aktiivne, siis *MP600/SBC* plaadile tehakse restart senikaua kuni häire laheneb. *CCU* on passiivjahutusega seade, mis ei nõua liikuvaid osi. Selleks on *MP600/SBC* plaadil olemas radiaator. *CCU* kapis peab olema piisavalt ruumi, et jahutus toimiks. Joonisel 3.1 on toodud *CCU* kujund kolme ühilduva plaadiga.



**Joonis 3.1. CCU kolme ühilduva plaadiga, MP600/SBC plaadiga, kuue MP600 seeria võrgukaardiga[31]**

- *VCU – Versatile Communication Unit* [32]

Kommunikatsiooni moodul, osa *SASensor®* süsteemist, ühendab *CCU*-d ja juhtimiskeskust omavahel kokku, mille eesmärgiks juhtida ja infot vahetada. *VCU* omab kuus optikaporti, serial *RS-232* porti, *UTP* ethernet porti ja *GPS* porti, nagu on näidatud joonisel 3.2.



**Joonis 3.2. VCU mooduli ühendused[32]**

Optilisi porte kasutatakse *CCU*-de, *BIM*, *CIM*, *VIM*, teiste seerial *IED* ühendamiseks. *RS-232* porti kaudu on võimalik luua sidet juhtimiskeskuse *IEC 60870-5-101* protokolliga. *UTP* porti kasutatakse *IEC 60870-5-104* protokolliga side loomiseks ja teleinfo vahetamiseks. *GPS*-i kasutuse ajal kasutab *CCU* välist ajaallikat, milles diskreetitud info taandatakse *UCT* ajaks. Sündmust, mis on registreeritud erinevate *CCU*-de poolt, on nii viisil võimalik vaadelda suure täpsusega.

- *BIM – Breaker Interface Module*[33]

Seadet, mis on osa *SASensor®* süsteemist, kasutatakse võimsus-, lahk-, maanduslülite lülitamiseks või digitaalse sisend-väljund moodulina. Omab 10 digitaalset sisendit ning kaheksa digitaalset väljundit. Kommunikatsiooniks *SASensor®* süsteemi ulatuses on ette nähtud kaks *duplex* optika porti. Toite pingeks on alalispinge. Joonisel 3.3 on toodud *BIM*-i vaade ülevalt.



**Joonis 3.3. BIM-i vaade ülevalt. Paremäl ülansurgas on kaks optika porti, all paremal on toiteklemmid, keskel 10 DI, vasakul 8 DO.[33]**

Digitaalsed sisendid (*DI*) on ühendatud toitega otse. Vool, mis tekib *DI* aktiveermisel on 3 mA. *BIM* paneb ajamärke *DI*-le resolutsiooniga 1 mks. Selleks, et vältida elektromagnet häiringuid, on ette nähtud *DI* asendi korduv saatmine. Juhul, kui tsükli ajal ilmub uus sündmus, siis kontrolli katkestatakse ning alustatakse uue sündmuse saatmist. *DI*-d omavad värelemisvastast filtrit. See on vajalik, et *DI* sündmust kindlaks teha. Signaal peab kestma kauem, kui väreluse vastase filtri ajaviide, vastasel juhul uut sündmust ei saadeta välja. *BIM*-ilt võtab *CCU* vastu aja märgena sündmuse ja rakendab ajalisi korrektsioone arvestades viivitusi. Digitaalsed väljundid (*DO*) omavad sisest ülepinge kaitset ja sisest mähise kontrolli. *DO* omavad lülitusahela kontrolli, mis tagab 1 mA voolu jooksmist läbi võimsuslülitite avamise mähise ahela. Kui vool mingil põhjusel läbi ei lähe, siis tekib häiresignaal. *DO* kontaktide kaitset on kahte liiki: transient liigpinge kaitse ning piikväärtusest pinge kaitse. Väljund võib olla aktiveeritud käskude poolt. Neid on kahte liiki. Esimene on tingitud käsitsi juhtimise teostamisega. Teine on tingitud kaitse või automaatika rakendamisega. Enne kaitsega tingitud lülituse toimumist peab alati tulema valmiduse käsk. Tüüpiline *BIM*-i enda viiteaeg on 9 ms, mille jooksul väljundi rele aktiveerub. *CCU* tarkvara vahetamise ajaks *BIM* võib olla blokeeritud antud *CCU* juhtimisest. Kui on olemas *CCU* liiasus, siis teine *CCU* saab juhtida seda *BIM*-i.

- *VIM – Voltage Interface Module*[34]

Pinge liidesmoodul, osa *SASensor*® süsteemist, on mõeldud selleks, et digitaliseerida analoogset pingegnaali konventsionaalsest pingetrafo. Omab võimet nii kolmefaasilise kui ka ühefaasilise pinge ühendamiseks. Kolmefaasilise ühendamise puhul on võimalik mõõta viisil faas-faas või faas-neutraal. Diskreetimise sageduseks võib olla kuni 900 kHz, kuid reaalsuses see käib 28 kHz sagedusega. *CCU* sisest vähendatakse sagedust 4 kHz-ni, sest see on piisav kaitse- ja häiresalvesti funktsioonide jaoks. Moodul omab kommunikatsiooni eesmärgil 2 *simplex Tx* optika porti. Mooduli kuju on näidatud joonisel 3.4. Hetkel on olemas

kaks mooduli modifikatsiooni: *VIM622* ja *VIM621*. Erinevus on sekundaarpinge taluvuses. *VIM622* talub kuni 187V, *VIM621* kuni 300V.



**Joonis 3.4. VIM koos ühendustega. [34]**

- *CIM – Current Interface Module*[35]

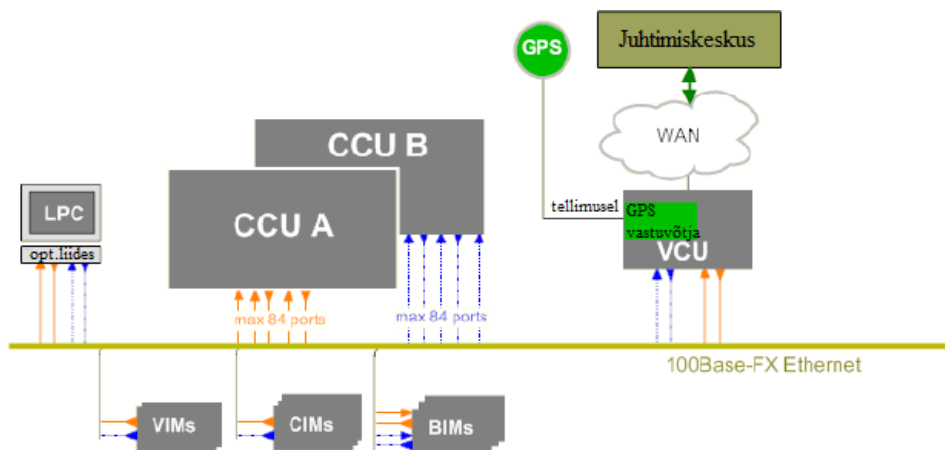
Voolu liidesmoodul, osa *SASensor*® süsteemist, on mõeldud selleks, et digitaliseerida analoogset voolusignaali konventsionaalsest voolutrafast. Omab kuus voolusisendit. Sisuliselt on need miniatüürsed voolutrafad: kolm mõõtesisendit, kolm kaitsesisendit. Vooluahelaid viiakse *CIM* mõõtesisenditest läbi suunaga *p1-p2*, *m1-m2*. Mõõtesisendid omavad mõõtetäpsust 0,001-7,2A; kaitsesisendid – 0,01-500A. On võimalik võtta kasutusse kogu piirkonna 0,001-500A, kuid selleks on vaja kaitsesisendid kalibreerida. Garanteeritud täpsuse piirkond on 0,01-275A. Diskreetimise sagedus saab olla kuni 900 kHz, kuid reaalsuses kasutatakse 28 kHz sagedust. *CCU* sisest sagedust vähendatakse 4 kHz-ni. *CIM*-i sees on olemas kaks A/D konverterit, mis võimaldab tagada suurt mõõtepiirkonda ja kommerts mõõtmisele piisavat täpsust. A/D konverteri konverteerimise väljund on 24 biti, ehk minimumpunktist maksimumpunktini on  $2^{24}$  astet, mis teeb siinuslainet graafikul väga täpseks. Dünaamiline *CIM*-i spetsifikatsioon võimaldab kasutada selle energia kvaliteedi mõõtmiste, kaitsme- ja häiresalvesti funktsioonide jaoks. Nagu *VIM*-il on ka siin kommunikatsiooni jaoks olemas kaks *simplex* optika porti. Joonisel 3.5. on kujundatud *CIM*.

Iga moodul omab unikaalset numbrit, mille järgi *CPC* saab teha identifitseerimise. Mooduleid *BIM*, *VIM* ja *CIM* võib siduda vabalt valitava lahtriga ainult ühe korra. Kaks korda ühte ja sama moodulit siduda ei ole võimalik. Mooduleid tavaliselt paigaldatakse jaotusseadme olemasoleva klemmkappi. *VCU* moodulit paigaldatakse eraldi: standardse kappi mõõtmetega: 800x600x400 mm (KxLxS), kuhu lähevad ka sideseadmed. *CCU* paigaldatakse kappi mõõtmetega 2000x800x600 mm või 800x600x400 mm (KxLxS) seinapealse kapi puhul.



**Joonis 3.5. CIM moodul. Ülalpool on mõõtemähised, allpool on kaitsemähised. Mõõtmiste sisend on allpool.[35]**

SASensori süsteemi kuuluv CCU töötab Artos® operatsiooni süsteemi põhjal. Enne tarnimist CCU-desse tehakse eelseadistust vastavalt tellija soovile. Igas CCU-s, kui neid esineb mitu, on olemas identne info alajaamast. CCU-d toimivad sõltumatult.



**Joonis 3.6. SASensor®-i põhimõtteskeem[31]**

Üks CCU on alati aktiivne. SASensor®-il on olemas HMI. Sellega ühendumine käib läbi *Web Browser*-i. Selleks, et jälgida alajaama seireinfot ning jaotla olekuid ei pea ennast autoriseerima. Jaotla oleku vaatamise ajal on võimalik valida lahtrit, peale klikides, ning näha lahtris olevaid mooduleid, nende olekuid, *TCS (Trip Circuit Supervision)* staatust ja mõõtmisi. Sündmuste mälu maht saab mahutada umbes kahe aasta sündmusvood. Sündmusi saab vaadata nii lahtrite kaupa, kui ka tervikuna. Lisaks sündmustele saab vaadata koormusgraafikuid, mis on koostatud suure täpsusega. Soovi korral võib lisada või eemaldada jälgitavaid komponente. Energia kvaliteedi jälgimise osas on võimalik näha täpset lainekuju. Näiteks, võimsuslülitite sisse lülitamise hetkel saab vaadelda pinget ja voolu lainekujusid. Graafikud esitavad siirdeprotsessi detailselt ning mugavalt.

On võimalus lisada ka *DI* olekuid graafikule, et näha mis seadmed on põhjustanud laine kuju muutust. Konfigureerumise jaoks peab olema süsteemi sisse logitud. Esmase süsteemi

kokkupanekuks tuleb mooduleid ühendada *CCU*-ga. Lisa testimine moodulitele ei ole kohustuslik, sest need tulevad kalibreerituna tootja poolt. Mooduli olek on kuvatud reaalajas. *CIM* ja *VIM* moodulitele on vaja seadistada skaalat. Mõõteandmeid on võimalik näha reaalajas nii fiidri peale vajutades, kui ka konkreetse mooduli kuvas. *CIM* moodul jälgib voolu suunda referents suuna suhtes, mida mõõtmise juures kuvatakse erineva ruudu värviga. Kaitse astmete seadistamine käib sarnaselt *IED* seadistamisega. Loogikat ehitatakse plokkide abiga. Plokkide sisendid ja väljundid on jälgitavad reaalajas. Samamoodi käib häiresalvesti sisselülitamise kriteeriumi seadistamine. Kasutajaliides on veidi sarnane Vampset releede seadistamise tarkvara liidesega: kõik funktsioonid on esitatud nimekirja kujul. Erinevus seisneb selles, et sättefaile on võimalik tekstifaili formaadis kopeerida ühest lahtrist teise ning kirjutada ümber kasutajaliidese abiga. See süsteem nõuab sügavamaid teadmisi ja programmeerimiskeele mõistmist.

**Tabel 3.1. SASensor-i komponentide poolt abipingeallikast tarbitav võimsus**

SASensor-i komponent	Tarbitav võimsus(W)
CCUp	215
CCUs	71
VCU	14
CIM	2
BIM	7,1 - 13,4
VIM	2

Tabelis on näha *CCUs* on seinapealne ja *CCUp* on põrandapealne modifikatsiooni variant. *BIM*-i poolt tarbitav võimsus oleneb releede toitest; edaspidi kasutatakse võrdlemise jaoks maksimaalset võimsust. Funktsionaalsuse seadistamine käib jooksvalt ning selleks ei pea süsteemi välja lülitama. Juhul, kui tuleb see vajadus, siis *CCU*-varu hakkab tööle. *SASensor*<sup>®</sup>-i põhimõtteskeem on kuvatud joonisel 3.6. Süsteemi abitoidest tarbimisvõimsus oleneb *CCU* liigist, moodulite hulgast. Elementide tarbimisvõimsus on välja toodud tabelis 3.1.

### 3.1.2. AJ 808 tutvustava ekskursiooni väljundid

Alajaamal 808 ei olnud palju ruumi, kuhu oli võimalik püstitada suurem osa *SASensor*<sup>®</sup>-ist – *CCU* plokkide kappe, mida paigaldati nurgas. Koht oli valitud viisil, kus oleks võimalik lisada veel ühte täissuurust keskpinge lahtrit. Joonisel 3.7. on näidatud keskpinge lahtrid, joonisel 3.8. on näidatud *CCU*-de kapid. Kogu rekonstrueerimisega seotud paigaldamistöö on tehtud Elektrilevi poolt.



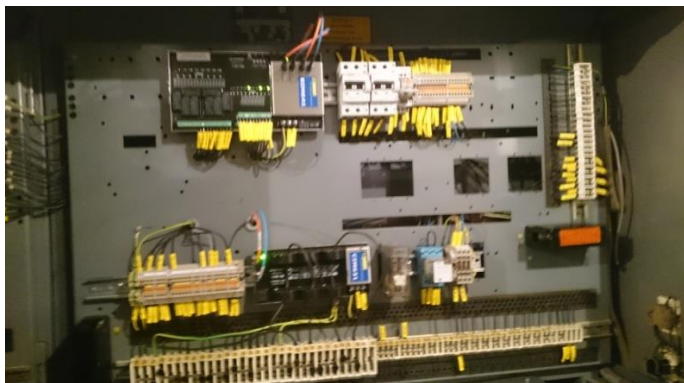


**Joonis 3.7. AJ 808 keskpinge lahtrid**



**Joonis 3.8. CCU-A ja CCU-B kapid**

Kuna *CCU* jahutus on mõeldud passiivsena, siis kapis on palju vaba ruumi. Keeruliste arvutuste puhul eraldab *CCU* väga tugevalt soojust ning selle poolt tarbitav võimsus kasvab 215 W-ni. Optikakaablid ühendavad *CCU*-d tema moodulitega *CIM*, *VIM*, *BIM* ja *VCU*. *CIM* ja *VIM* on ühendatud *simplex*, *BIM* ja *VCU duplex* kiudoptikaga. Optika värvid on erinevad, mis vastab *CCU-A* ja *CCU-B* värvile. Nii on mugavam tuvastada optika sihtkohta. Joonistel 3.9. ja 3.10. on toodud keskpinge lahtrite klemmkappide sisu, vastavalt väljuva fiidri oma ning sisendfiidri oma. Sisendfiidrit võib eristada klemmkapis asuvas *VIM* mooduli olemasolu järgi. Joonisel 3.11. on toodud madalpinge seirekapp. Joonisel 3.12. on kommunikatsiooni mooduli kapp.



**Joonis 3.9. Väljuva fiidri sekundaar klemmkapp**



**Joonis 3.10. Siseneva fiidri sekundaarklemmkapp**

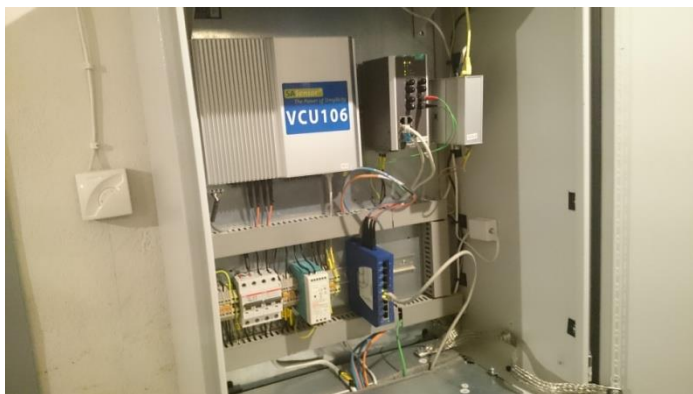
Väljuva fiidri sekundaarklemmkapis on olemas *CIM* ja *BIM* moodulid. Pinget siin ei mõõdetata, sest seda tehakse ainult sisendfiidrites. *CIM*-i on ühendatud A ja C faasi voolud ning faasi B mõõtesisenditesse on viidud nulljärgnevusvool. Väljundfiidrid on identsed. B faasile arvutatakse välja normaalalatluse vool. Sisendfiidri sekundaarklemmkapis on lisaks *CIM*- ja *BIM*-ile *VIM*. Kasutusel on *VIM* maksimaalse mõõte võimega 187V. Siin mõõdetakse sisendliini pinget, mis on võrdne latipingega. Nulljärgnevuspinget mõõdetakse eraldi ja selleks kasutatakse eraldi olevat *VIM*-i, mis paikneb *SVL* klemmkapis. Lisaks, siin võtavad ruumi ka kaarekaitse ja selle voolumõõtmise moodulid (vasakus nurgas).

Madalpinge seire kapis on *VIM*, *CIM*, *BIM*. Selle seadmed jälgivad kahte jõutrafode sekundaarpoolt. Juhtimist ei ole olemas, on vaid asendite signaalid. Paremas nurgas paikneb trafode õlitemperatuuri kontrolleri, mis saadab *VCU*-sse *Modbus TCP* protokolliga andmeid. Andmed saadetakse edasi *SCADA*-sse. Iga trafo jaoks on omad *VIM*, *CIM* ja *BIM*. *VIM621* võtab pinget mõõtmiseid otse primaarahelast.



### ***Joonis 3.11. Madalpinge seirekapp***

Kommunikatsiooni seadmete kapis asub *CISCO* modem, manageeritav *MOXA switch*, *VCU*, *Viola gateway* ning ajutise lahendusena manageerimata switch. *VCU*-ga on ühendatud mõlemad *CPC*-d duplex fiiberoptikaga. *VCU* on ühendatud vase kaabliga *MOXA switch*-i. Läbi manageerimata switchi käib liiasuse tagamine. Sinna on ühendatud mõlemad *CCU*-d ja seejärel *Ethernet* ühendus läheb vase kaabliga *MOXA switch*-i. Võrk on jaotatud *VLAN*-ideks, kus ühel pool on *CCU*-d, teisel pool on *SCADA*. Aja sünkroniseerimine käib *SCADA* põhjal *SNTPA*-ga. Kui võrguaeg kaob, siis *CCU*-d kasutavad sisemist aega. Kuu jooksul jääb sisemine aeg maha suurusjärgus mõnikümmend ms.



### ***Joonis 3.12. Kommunikatsiooni seadmete kapp***

Elektrilevi poolt tellitud releekaitse funktsioonid on makskaitse, voolulõige, maalühiskaitse, suunatud maaühenduskaitse ja voolukaitse blokeeringud. Automaatika funktsioonidest olid tellitud TLA ja RLA. TLA tellimine ei olnud tingitud AJ 808 otstarbega. Tellimus oli tehtud testi eesmärgiga. Firma *Protrol*, mis edendab SA Sensori tarkvara, arendas Elektrilevile TLA funktsiooni. Releekaitse testimine enne alajaama töösse viimist näitas, et liigvoolukaitsmed ja maalühiskaitse toimivad hästi. Ainuke probleem on hüstereesiga, kuna see oli liiga lai. Kui

rikkevool on liiga lähedal sätteväärtusele, siis kaitse ei tuvasta, kas on vaja kohe välja lülitada või on vaja oodata. Maaühenduskaitsmega esinesid probleemid, kuna olid raskused maaühendusvoolu õige tuvastamisega. Kaitse rakendus kõrvalalajaama maaühendusvoolust, kuid see oli tuvastatud nagu AJ 808 maaühendusvool. Praegusel hetkel probleem on lahendatud muutes sätteid, mida pakuti peale võrgu analüüsi. Kaitse selektiivsuse tagamiseks ei pea sisendfiidri liigvoolu kaitse rakenduma, kui lühisvool ilmub väljuvas fiidris. Katsetati voolu blokeeringu toimimist: sisendfiider lülitus välja koos väljundfiidriga, mis ei ole õige. Automaatika funktsioonid toimisid hästi. TLA oli edukas ning RLA sai katsetada ka reaalses olukorras. Kaitse, mis takistab võimsuslüliti lühisele lülitamist, toimis väga kiiresti. Kaitse tööd AJ-s 808 reaalses olukorras näha ei olnud võimalik.



**Joonis 3.13. Mõlemate süsteemide optikakaablid ühel redelil**



**Joonis 3.14. Sulanud kaitsmega optikakaabel. Side toimib, kuid oleks võinud hävida.**

Kuna 808 alajaama tsentraliseeritud süsteem on piloot projekt, siis täieliku töökindluse tagavara meetmeid ei saanud olla tagatud. See oli põhjustatud nii ruumi puuduse kui ka vähese kogemusega tsentraliseeritud süsteemi ehitamisel. Näiteks, joonisel 3.13. on näidatud optika kaabli mõlematele CCU-dele vedamine ühel ja samal kaabliredelil. Juhul, kui toimub tulekahju all olevas keskpinge lahtris, siis on oht, et optika kaablid hävivad. Joonisel 3.14. on näidatud sulanud kaitsmega optikakaabel. Samas, CCU-de paigutus võiks olla erinevates ruumides ja nende toide võiks ka olla reserveeritud. Praegu mõlemad CCU-d saavad toitepinget ainult ühest DC keskusest.

*SASensor*®-i süsteemi üles paneku peale kulutati umbes 4-5 kuud koos projekteerimisega. Selline aja pikkus on tingitud vahepausidega: alajaam on toimiv ja katkestusi on vaja ette tellida jne. *SASensor*®-i seadmete hulk, mis oli paigaldatud alajaama, on arvatud tabelis 3.2. Optikakaablite kogus on arvatud vastavalt seadmete sidekaablite vajadusele. Vasekaablite kogus ei ole võetud arvesse, sest vasekaableid on kasutuses vähe.

**Tabel 3.2. Alajaama 808 paigaldatud tsentraliseeritud arhitektuuri seadmete hulk**

		<b>Fiidri tüüp</b>	<b>Väljuv</b>	<b>Sisend</b>	<b>SVL</b>	<b>Trafo</b>	<b>MP seire</b>	
Seade		Fiidrite arv	8	2	1	2	1	Kokku
CIM			8	2	1	2	2	15
VIM			0	2	1	0	2	5
BIM			8	2	1	2	2	15
CCU		Juhtimine	2					2
VCU		Side	1					1
Optika simplex			16	8	4	4	8	40
Optika duplex			20	4	2	4	4	34

Järgnevalt võrreldatakse, kui suur oleks alajaama 808 võimsuse tarve juhul kui kasutusele oleks võetud hajutatud arhitektuuriga süsteem. Süsteem baseeruks alajaama siinil *IEC 61850* protokolliga. Lisaks *IED* ja *RTU* tarbevõimsusele võetakse omatarve arvutusse ka kahe switchi võimsuse tarve. Tulemus on esitatud tabelis 3.3.

**Tabel 3.3. Süsteemiga *SASensor*® varustatud AJ 808 automaatika seadmete võimsuse tarve ja AJ 808 *IED* põhineva süsteemi automaatika seadmete võimsuse tarve**

<b>SASensor-i komponent</b>	<b>Tarbitud võimsus(W)<sub>max</sub></b>	<b>Hulk (tk)</b>	<b>Tarve kokku(W)</b>
CCU	215	2	695
VCU	14	1	
CIM	2	15	
BIM	13,4	15	
VIM	2	5	
SW	10	1	
<b>Hajutatud süsteemi komponent</b>			
IED	65	14	938
RTU	8	1	
SW	10	2	

Tabeli 3.3. järgi *SASensor*<sup>®</sup> süsteem tagab ligi 35% väiksema võimsuse tarbimist kui hajutatud süsteem. See tähendab, et *SASensor*<sup>®</sup> süsteem peab vastu samade akude pealt kauem, tagades täisfunktsionaalsust või ka seda, et akude maht võib olla väiksem. *IED* võimsustarvet võeti [36], *RTU* võimsustarvet võeti [37] (stardi ajal *RTU* võtab 20W, 8W on püsirežiim), switchi võimsustarvet võeti [37]. Switchi valik oli juhuslik, kuid lähtuti, et see võimaldaks *RSTP* protokoll ja *VLAN*-i. Oletati, et modemi ja muude sideseadmete võimsuse tarve on sama või olematu.

### **3.2. Elektrilevi ja Ellevio automaatika spetsialistide arvamused *SASensor*<sup>®</sup>-i kasutamisest alajaamades 808 ja Kyrkviken**

Küsimustik, mis on esitatud lisas L.1., oli koostatud inglise ja eesti keeles. Küsimustikku saadeti Elektrilevi ja Ellevio releekaitse ja automaatika spetsialistidele. Selle eesmärgiks oli tuvastada mured ja probleemid seoses alajaamade digitaliseerumisega ja saada ülevaadet *CPC* süsteemi kasutamisest reaalses olukorras. Vastused on analüüsitud ja omavahel kokku viidud. Kokkuvõttele järgnevad autori poolt märgatud Eesti ja Rootsi spetsialistide arvamuste eripärad. Eripärade alla kuuluvad vastused, mis ei ole võimalik viia kokku arvamuste erinevuse tõttu.

#### **3.2.1. Elektrilevi ja Ellevio automaatika spetsialistide vastuste kokkuvõte**

- Võrguettevõtete probleemid alajaamade digitaliseerumisega

Võrguettevõtete põhiline probleem on suur hulk vanu seadmeid, mis olid paigaldatud umbes samal ajal ning vastavalt vajavad vahetamist umbes samal ajal. Uuendamistempo on madal ning möödub tükk aega, enne kui märkimisväärne osa alajaamu on digitaliseeritud. Rekonstrueerimise lahenduste kaalumisel võrguettevõtte peab arvestama, et uuendatud sekundaar osa alajaamast ei pruugi tagada tõrgeta tööd, kuna primaarseadmestik võib olla vigane. Rekonstrueerimise lahenduste juures tööde maht on tihti palju suurem, kui samasuguse uue alajaama ehitamiseks.

- Kõrgeresolutsioonimõõtmiste kasutuse võimalused

*SASensor*-i üheks põhiväärtustest on kõrgeresolutsioonilised mõõtmised. Neid plaanitakse kasutada sündmuste täppisanalüüsiks. Eeldatakse, et lähitulevikus võib kasutada kõrgeresolutsiooniga andmeid mitmetest võrgupunktidest, mis loob täieliku pildi võrgu seisundist. Praegusel hetkel mõtmisi kasutatakse *SCADA* ning häiresalvesti otstarbe jaoks. Uued funktsioonid hakatakse õppima siis, kui olemasolevad hakkavad stabiilselt tööle.

- Inimresurssi kulude hindamine konfigureerimiseks ja seadistamiseks

Tsentraliseeritud süsteemi konfigureerimine on veidi lihtsustatud, sest mõned funktsioonid on eelseadistatud ning tööde maht kohapeal on väiksem. Moodulpõhine süsteem võiks olla kriteeriumiks seadmete ostmiseks. Mooduli vahetamise pärast ei pea tegema suurt seadistustööd.

- Fiidrite vaheline koostöö tsentraliseeritud süsteemi raames

Üldiselt katsed ei ole sooritatud ning suurt erinevust märgata ei ole võimalik. Teoorias fiidrivaheline kommunikatsioon peab olema kiirem, kui *IEC 61850 GOOSE*, sest andmed on vaja üle anda ühe seadme raames virtuaalsete lahtrite vahel.

- Tavapärase *IED* probleemid ja nendega seotud kulud

Vigade spekter on küllaltki lai: alates toiteplokkide rikestest kuni kaitsealgoritmide tõrkedeni. Probleemide seas eredalt märgitakse keerukust ja seadistamisega probleeme, mis pole seotud seadmetega. Vanade *IED* remondikulud on võrdlemisi kõrged. See on tingitud seeria tootmise lõpuga ajaks, kui *IED* läheb rikki. Alati peab hoidma laos varu seadme juhuks, kui juhtub ootamatu viga. Kui seadmed on mitmekesised, siis laokoht võib olla ebapiisav ja kulukas. Juhul, kui seadet pole kuskilt võtta. Siis osa alajaamast võib jääda kaitsmata ning tekitada katkestust.

- Ehitusalaste töömahude võrdlemine tsentraliseeritud ja hajutatud süsteemide vahel

Fiidrisisene ümberehitus ja vaskkaablite hulk ei erineks hajutatud süsteemi poolt nõutavast. Se on tingitud sellega, et mooduleid ühendatakse samamoodi vasega primaarseadmete sekundaar väljaviikudele. Olulist vahet peale suurema optikakaablite mahtu ei olnud märgatud.

- Tsentraliseeritud automaatika ja releekaitse süsteemi tulevikukindlad ja kasulikud iseärasused

Olulisem tsentraliseeritud süsteemi võimekus on funktsionaalsuse laiendamiseks ilma riistvara muutmist. Antud lähenemine võimaldab luua kaitse ja automaatika funktsioone vajaduse põhiselt ja piiranguks on vaid programmeerija osavus ning võrguettevõtte spetsialisti fantaasia. Avatud platvorm on hea võimalus uue releekaitse ja automaatika algoritmide turgu avamiseks. Uued osanikud, nagu releekaitse spetsialistid, ülikoolid ja muud huvilised võivad võtta osa arendamisel.

- Alajaama keskse juhtimise võimaluse arutamine tsentraliseeritud süsteemi alusel

Alajaama tsentraliseeritud süsteemi kasutamine võrgu osa juhiks koostöös teiste tsentraliseeritud süsteemiga varustatud alajaamadega kipub olema kulukas. On vaja luua väga püsiva ja kvaliteetse sideühendust alajaamade vahele. Selline variant peab asendama vahendaja andmebaasi: infot vahetatakse otse keskarvutite vahel. Kulud on märkimisväärselt suurem, kui kasum. Praeguse seisuga on mõistlikum hoida alajaamu nagu sõtumatuid üks teisest sõlmi, mis omavad kaitse, automaatika ja seire kohapealse funktsionaalsust. Kogu võrgu info saabub SCADA-sse. SCADA tsentraliseeritud andmebaasi põhjal luuakse tulevikus juhtimisalgoritme, millede abil tulevikus automaatika funktsioone näiteks, *FLIR (Fault Location, Isolation and Restoration)* piirkonniti.

### 3.2.2. Elektrilevi ja Ellevio automaatika spetsialistide arvamuste eripärad

- Tsentraliseeritud süsteemi poolt kasutatav alajaama pindala

Eestis pannakse tähele ruumi kasutamisele olulisel määral. Vanad Tallinna jaotusalajaama omavad väga piiratud põranda ja seina pindalat. Kaks CCU põrandapealse kappi ja VCU seinapealne kapp osutusid olema väga suured. Eesti jaotusvõrgu alajaamades on tihti ruumi puudus ning nii suure paigalduse pole alati võimalik ära mahutada. Piirkonna alajaamades sellist probleemi ei pea tekkima, sest ruumi on piisavalt palju juhtimisruumis. Rootsi alajaam Kyrkviken pingega klassiga 70/10 kV peab olema võrdeline Eesti piirkonna alajaamaga 110/10 kV. Selle pärast Rootsi spetsialist ei maininud ruumi suurt kasutust. Tema sõnul tsentraliseeritud süsteem võtab nii vähe ruumi, et on võimalik paigutada kaks süsteemi paralleelselt tööle. Rootsis vana varustus on jaetud tööle. On võimalik, et nad kasutavad selle reserveerimise eesmärgil.

- Tsentraliseeritud süsteemi puudujääkide arutamine

Elektrilevi spetsialistid märkasid rohkem tehnilist, kui põhimõttelist poolt. Põhiline probleem on see, et funktsioonid osaliselt asuvad arendamise staadiumis ning pole võimalik kasutada neid täies mahus. IEC 61850 GOOSE tugi ei ole saadaval, mis tähendab, et pole võimalik tekitada suhtlemist IEC 61850 GOOSE pooldavate seadmetega. SASensor kasutab sisemist suhtlusprotokollit, mille kaudu see suhtleb moodulitega. Optikakaablite hulk on Eesti spetsialistide hinnangul tunduvalt suur. Rootsi spetsialist suunas rohkem tähelepanu tsentraliseeritud süsteemi tarnijate väikse kogusele. Ta sõnastas pakkumist, et tsentraliseeritud süsteemi kontseptsioon peaks olema vastuvõetud kõikide releekaitse ja automaatika seadmete



tootjate vahel. *IEC 61850* võimekuse arendamine on tsentraliseeritud süsteemi järgnev väljakutse. Rootsi spetsialisti arvamus osaliselt kattub Eesti spetsialistide arvamusega. On olemas risk, et üks tarnija võib mitte katta kasvava turu vajadusi ning suur hulk kliente jääb funktsioone oodata. Mida kiiremini avatakse tsentraliseeritud süsteemi avatud platvormi turu, seda kiiremini hakkab selle areng.

- Alajaama juhitavus ja jälgitavus peale *SASensor*® süsteemi paigaldamist

Elektrilevi spetsialistid hindasid alajaama jägitavust ning juhitavust paranenuks. Telesignaali maht *SCADA*-sse oluliselt suurenes. Ennem alajaamas 808 olid vanad elektro-mehhaanilised releed. Märkiti, et *RLA* funktsioon on oluliselt parandatud. Ellevio spetsialisti vastusest selgub, et Rootsis kasutatakse nii hajutatud, kui ka tsentraliseeritud süsteemi ühes ja samas alajaamas. Kuna mõlemad süsteemid on digitaalsed, siis pole märkimisväärset muutust tulnud. Rootsis hetkel ehitatakse kaks uut alajaama Svänkviken ja Segmon, mis alustavad tööd suve lõpus. Mõlemad alajaamad hakkavad kasutama puhtalt tsentraliseeritud süsteemi. Ellevio spetsialisti sõnul Rootsis tegeletakse tsentraliseeritud süsteemi levimisega ning arvatakse seda oluliseks tuleviku võrgu arengu raames.

- Tuleviku funktsionaalsus piiramatus tingimusel

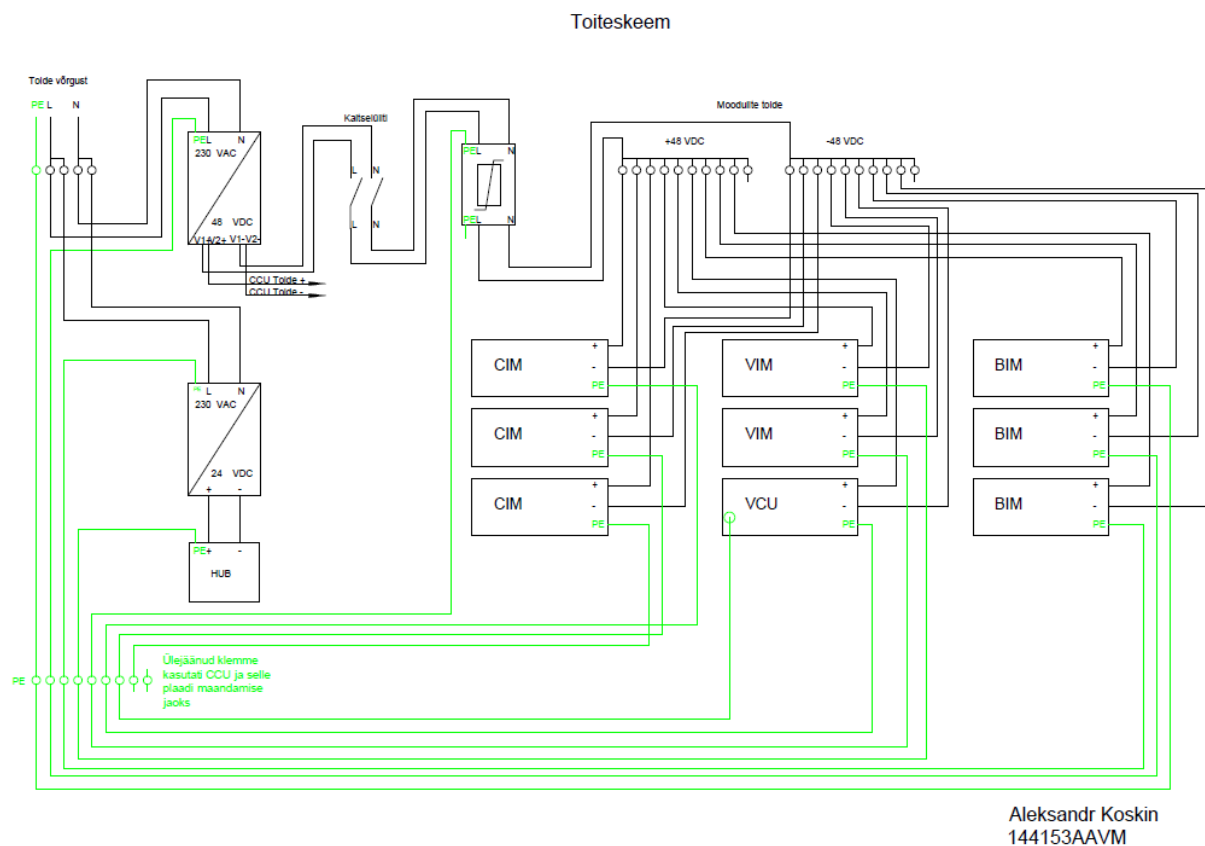
Küsimus oli esitatud eesmärgiga välja selgitada üldisi võrguettevõtete kaitsefunktsioonide vajadusi tingimusega, et on võimalik luua misiganes funktsioon. Elektrilevi spetsialistid pakkusid, et tulevikus on vajalikud kaitsetest distants- ja diferentsiaalkaitseid õhuliinidele, latikaitseks diferentsiaalkaitse. Automatika funktsioonidest oleks hea saada alajaama vahelist kaugväljalülitust ning *FLIR* automaatikat. Diferentsiaal- ja distantskaitse tagavad parema selektiivsust ja on eelistatumad kaitsmete liigid. *FLIR* automaatika kasutamine annab võimalust kohalikul tasemel tagada klientide katkestuse aja vähendamist rikkekoha lokaliseerumisega. Tervete liinide peal olevaid kliente lülitatakse tagasi võrku. Ellevio spetsialisti hinnangul on oluline saada stabiilselt töötavad praegusi funktsioone, mis on olemas *IED*-de kasutusel. See eesmärk võiks olla täidetud vähemalt pingetel kuni 50 kV. Edasine soov on saada lihtsamaid diferentsiaalkaitseid ning impendants liigvoolukaitsmeid. Üle 130 kV kaitsmed ei pea olema arendatud. Distants- ja diferentsiaalkaitsete loomise osas on Elektrilevi ja Ellevio spetsialistidel ühised vaatenurgad. Rootsi spetsialisti ootused *CPC*-st on veidi tagasihoidlikum, kui Eesti spetsialistide omad. See võib olla tingitud vähese kokkupuutega tsentraliseeritud süsteemidega nii Rootsi spetsialisti, kui ka Eesti spetsialistide poolt. Rootsis vaadeldakse tsentraliseeritud süsteemi eelkõige nagu asendust olemasolevale

hajutatud süsteemile. Eestis pigem püütakse modelleerida tuleviku vajadusi ning vastavalt saadud tulemusele otsustada, kas tasub üle minna tsentraliseeritud süsteemile või mitte.

## 4. Tsentraliseeritud kaitse- ja juhtimissüsteemi

### SASensor® praktiline väärtus ja katsetused

Autoril õnnestus osa võtta tsentraliseeritud kaitse ja automaatika süsteemi *SASensor®* püstitamisel, tutvuda kasutaja liidesega ja testida *RTDS*-iga selle toimevõimet. Süsteemi toitepingeks oli valitud 48VDC. Toiteskeem joonisel 4.1. oli koostatud ja ühendatud autori poolt.



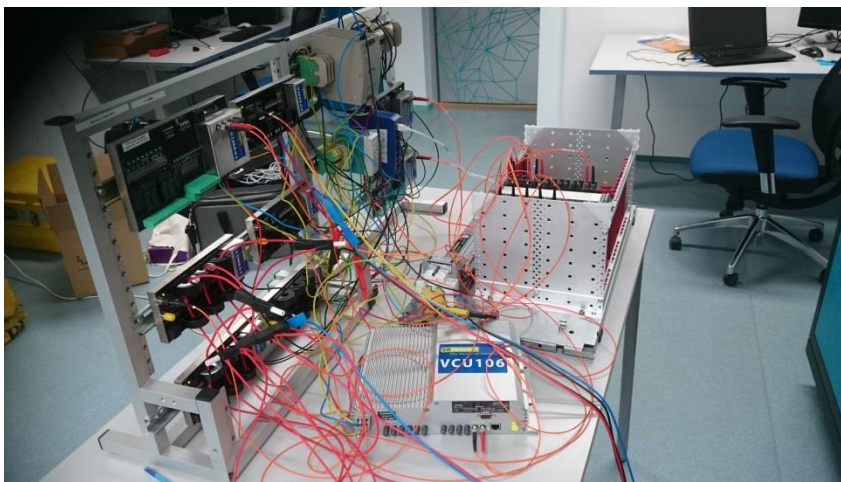
#### Joonis 4.1. Testsüsteemi toiteskeem

Keskjuhtimisplakk *CCU* tuli ilma kaartideta ning oli paigaldatud eelkokkupandud plaadi peale. Kaartide paigaldamisel pöörati erilist tähelepanu elektrostaatika vastastele meetmetele. Oli paigaldatud kokku kolm kaarti. Kaart protsessoriga *MP600/SBC*, kaks *MP600* kaarti. Joonisel 4.2. on toodud *CCU* koos paigaldatud kaartidega. Katsete kava on suures osas mõeldud välja autori poolt. Väikese kogemuse tõttu kõiki funktsioonide toimimine ei olnud testitud. On näidatud seadme ülesehitus, lihtsamad funktsioonid ja võimalused. Kokku oli ühendatud *CCU*-ga 9 mooduleid: 3 *CIM*, 2 *VIM*, 3 *BIM*, 1 *VCU*. Eesmärgiks oli vaadata kui palju läheb aega paigaldamiseks ning mis materjale kasutatakse. Väga suur tähelepanu on pööratud potentsiaalide ühtlustamisele.



**Joonis 4.2. Kolmekohaline CCU ja kolm MP600 kaardi**

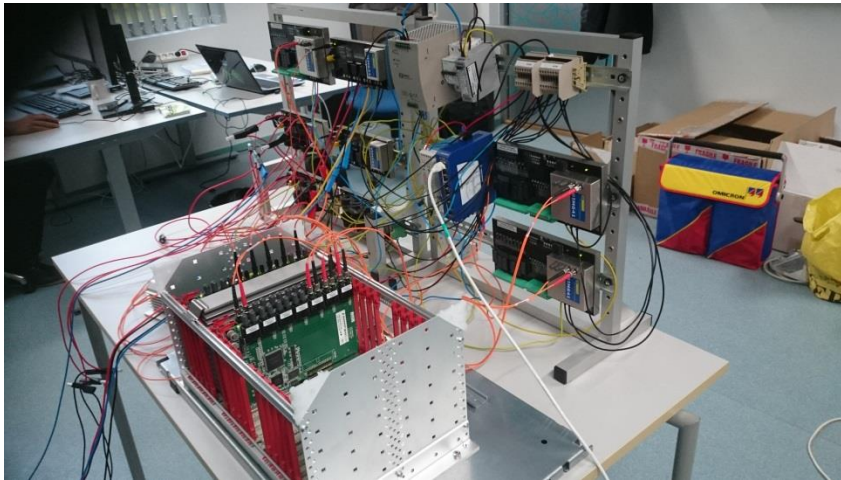
See on vajalik selleks, et ei oleks liigset müra ning ESD ohtu. Toiteklemme oli võetud 20: suure varuga. Peaaegu kõik läks kasutusse. Maandusklemme oli võetud kümme tükki ning lõpuks kõik olid mõlemalt poolt hõivatud. Ajaliselt läks umbes 8 tundi 3-lahtrilise süsteemi paigaldamiseks. Mooduleid paigaldati DIN latide peale. Kinnitused on mugavad ning moodulid on kindlalt paigas. Enne mooduli DIN latile paigaldamist tuleb veenduda, et kinnitusvedru käib mooduli kinnituses vabalt. Juhul, kui see pole nii, siis vedrut on veidi vaja vabamaks liigutada. Selleks, et mooduli paika panna, on vaja tugevalt vajutada alt ülesse ja suunata mooduli ülevalt DIN lati peale. Kui on vaja maha võtta, siis tuleb suruda mooduli alt ülesse ning tõmmata enda peale. Joonistel 4.3. ja 4.4. on esitatud demosüsteemi vaade laboris.



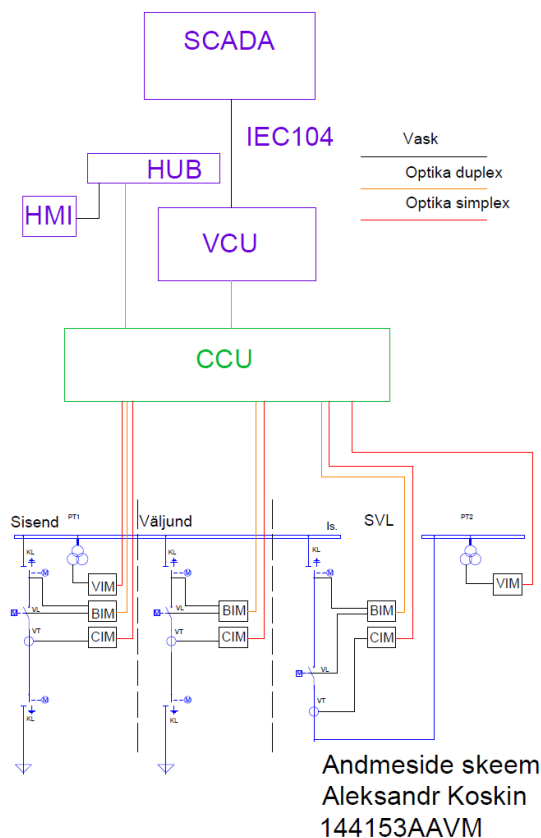
**Joonis 4.3. VCU, BIM, CIM; VIM moodulid katsesendil**

Optikaühendused on teostatud vastavalt joonisel 4.5 oleval andmesideskeemil. On näidatud vask Ethernet kaabliga ühendused ja kiudoptilised ühendused simplex ning duplex. BIM ja VCU on ühendatud duplex-iga, mõõtemoodulid CIM ja VIM vastavalt simplex-iga. SASensor®-i külge ühendamiseks on vaja olla sellega ühes võrgus, omada IE brauseri eeldatavalt viimast versiooni. Grafikute vaatamiseks on tarvis SVG Viewer. Tabelie vaatamiseks vajaliku plugini SASensor® pakub ise. Testsüsteemi CCU-s on Elektrilevi

alajaama 808 varuarvuti ccuB konfiguratsiooni demo versioon. Alajaama nimetust ja keskarvuti indeksi alati kuvatakse üleval üldise vaate peal. Siin on võimalik näha sisend-, väljund- ja SVL lahtreid, üldist lahtrit ja madalpinge monitooringut.

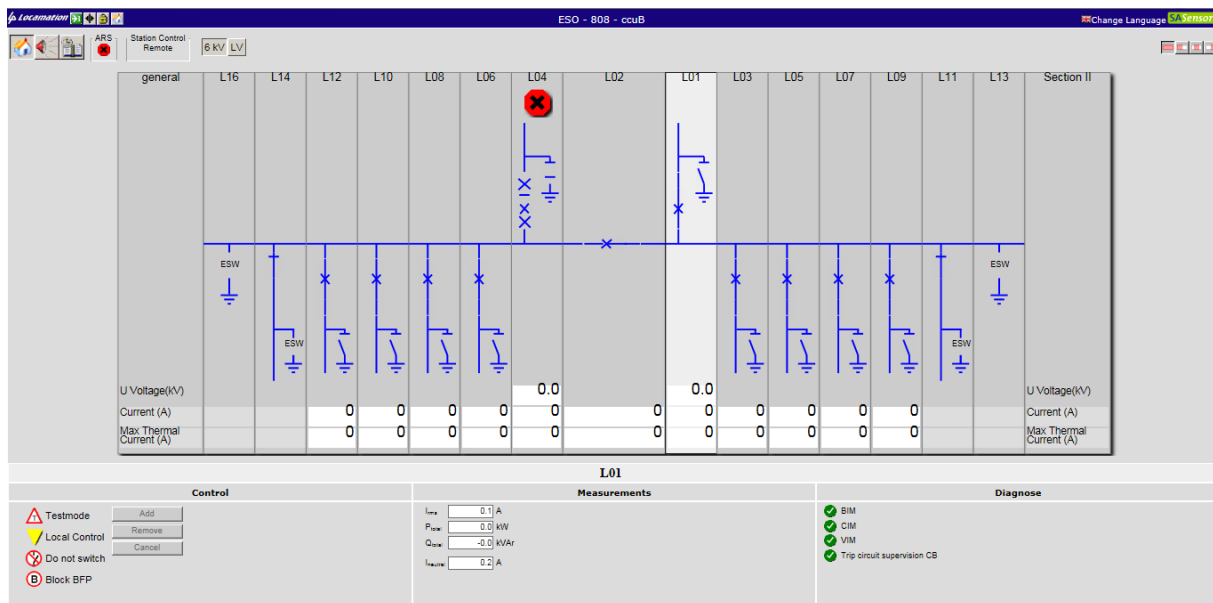


**Joonis 4.4. CCU, HUB, toiteplokid ja klemmid**



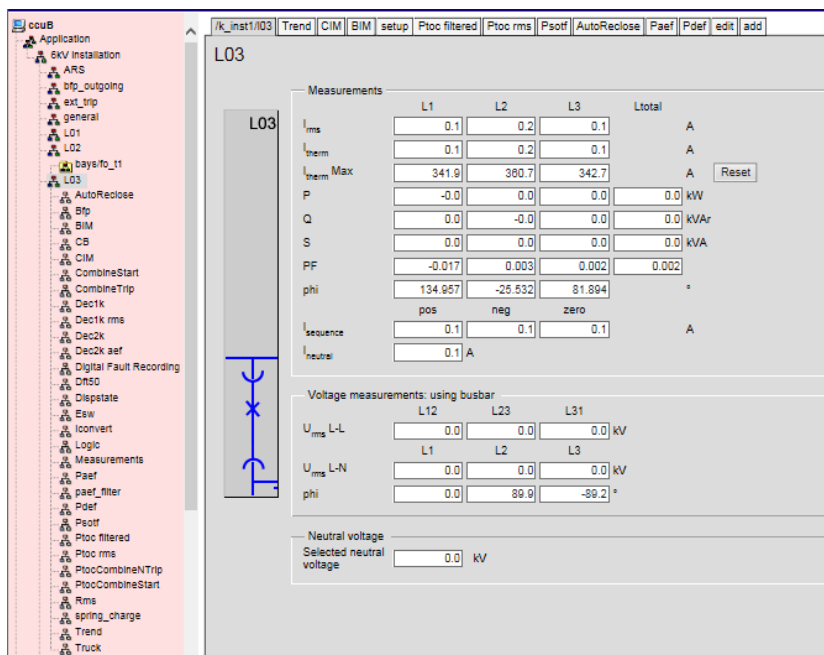
**Joonis 4.5. Testsüsteemi andmesideskeem**

Joonisel 4.6 on näidatud testseadme üldvaade. Välja loginuna esimesest ekraanist võib vaadata aktiivseid alarme ja alajaama sündmusi. Samamoodi on võimalik näha mõõteandmeid. Alarme kviteerida ei ole lubatud.



**Joonis 4.6. Testseade lahtride üldvaade**

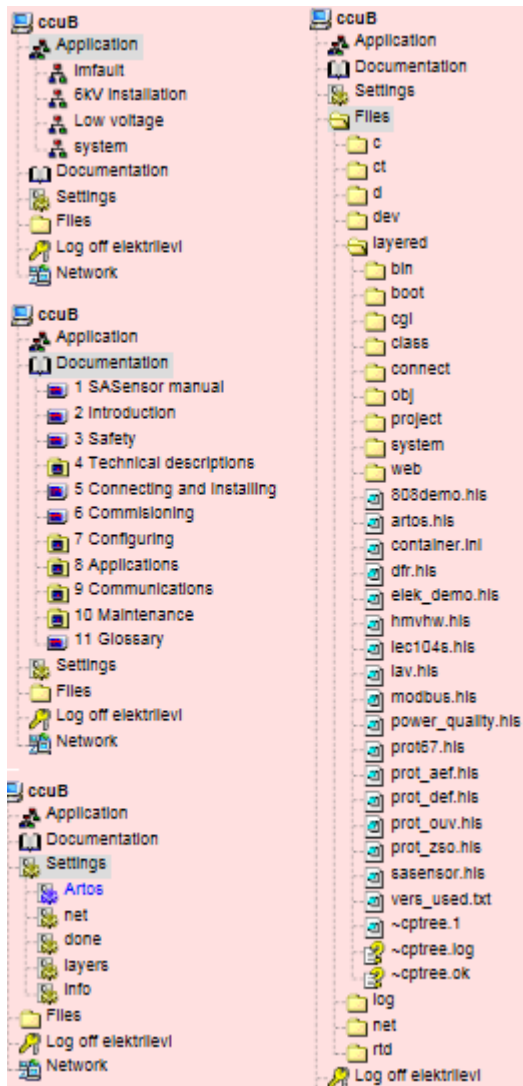
Kui logida süsteemi sisse, siis aktiivseid alarme lubatakse kviteerida, vajutades nupu „Acknowledge“. Vajutades lahtri peale kaks korda, saab näha mõõtmiste aken. Vasakul pool kohe avaneb valitud lahtri puukujuline menüü („puu“). Joonisel 4.7. on näidatud lahtri L03 näitel sisselogitud olek.



**Joonis 4.7. L03 lahtri mõõtmiste aken pärast autorisatsiooni**

Mooduleid valiti tööks lahtrites vajutades „setup“ lahtri igas fidris. Mooduli valik toimub rippmenüüst ühendatud moodulite hulgast vastava mooduli tüübi jaoks. Lahtris mooduli nimele vajutamine annab infot moodulist reaajas, kui see on ühendatud lahtriga. Kaks korda

ühthe ja sama moodulit valida ei ole võimalik- ta kaob nimekirjast, kui on valitud mingi lahtri moodul. Aknas „*setup*“ olid ka seadistatud trafode ülekanadesuhted ning häiresalvesti sättevool. Kaitsete sätteid valitakse vastava kaitse lahtrile vajutades. Joonisel 4.7. oleva lahtri L03 näitel kaitsete sätete sisestamine toimub „*Ptoc filtered*“ lahtri all. „*Puu*“ struktuuri ülemkataloog on alajaam. See jaguneb rakenduse- „*Application*“, dokumentatsiooni- „*Dokumentation*“, sätete- „*Settings*“, failide- „*Files*“, autoriseerimise- „*Log off*“ ja võrgukataloogiks „*Network*“. Joonisel 4.6 on näidatud nende kataloogide lahtised olekud.



**Joonis 4.6. Testsüsteemi menüü puustruktuur**

Rakenduse kataloogi alla luuakse alajaama paigaldiste konfiguratsioon kihtide kaupa: lisatakse üldine latt, defineeritakse lahtrite liike ja genereeritakse alajaama üldvaadet. Kõik alajaama seire-, kaitse- ja automaatika rakendused, k.a. programmeeritav loogika on pärast kättesaadavad läbi selle kataloogi. Dokumentatsiooni kataloogis paiknevad *SASensor*® süsteemi juhendid. Sätete kataloogis on *ARTOS*® süsteemi rakendused. Sätete kataloogis võib

kopeerida, teisendada, eemaldada, sünkroniseerida, võrrelda ning säilitada mällu süsteemi kihte. See kataloog on mõeldud tarkvara versiooni haldamiseks. Siit saab ligi käsureale. Failide kataloogis on süsteemi failid, andmed, logid, andmebaasid. Failide kataloog on sarnane *Windows Exploreri*-ga, mille kaudu võib välja otsida vajaliku faili ja seejärel teha sellele redaktuuri. Võrgu kataloogis on „*cptree srv*“. Autoriseerimise kataloogile vajutamine viib autoriseerimise leheküljele. Katsete käigus pakuvad huvi rakenduste ja failide kataloogid ning alajaama üldvaade. Katseid korraldati kasutades mõõtmiste sisenditega *RTDS* analoogväljundeid. Katsed, mida korraldati *RTDS*-iga ei olnud otseselt seotud *SASensor*<sup>®</sup>-i katsetamisega ning olid tehtud teisel eesmärgil. *SASensor* oli paigaldatud seire elemendi rollis, mis töötles signaale. Need tulid *RTDS*-ilt välja katsete ajal. Peatükkides 4.1.-4.3. on esitatud järgmsed katsetused:

- *4.1. Kõrge resolutsioonilised mõõtmised ja kaabli lühikeste ülimööduvate rikete tuvastamise meetoodika tutvustamine.* Esiteks, katsete käigus mõõdetakse trende. Praktikal trendide mõõtmine võimaldab jälgida koormusi alajaama ulatuses graafilisel kujul suure täpsusega. Teiseks proovitakse lühiajaliste impulsside tuvastamise võimekust. Praktikal tuvastatakse lühiajalisi impulsse eesmärgiga kindlaks teha riknenud kaablit. Katse ajal kasutatakse erinevaid sätteid liigvoolukaitsmele ning häiresalvestile.
- *4.2. Kaitse testimine liigvoolu kaitse näitel ning häiresalvesti graafikute võrdlemine RTDS-i graafikutega.* Liigvoolu kaitse katsetamise ajal kasutatakse maksvoolu kaitset, millele määratakse sättega viiteaega. Häiresalvestist on võimalik jälgida kaitse toimimise hetke. Häiresalvestist võib samamoodi üle vaadata ka kaitsete selektiivsust ühe alajaama ulatuses. *RTDS* ja *SASensor*<sup>®</sup> häiresalvesti graafikute omavaheline võrdlemine annab võimalust tõestada *SASensor*<sup>®</sup>-i võimekust mõõta suure täpsusega, kui graafikud on sarnase kujuga.
- *4.3. Kommunikatsiooni protokoll IEC 60870-5-104 Slave võimekuse testimine.* Kommunikatsiooni protokoll testid sooritatakse eesmärgiga üle vaadata kuidas *SASensor*<sup>®</sup> saadab andmeid *SCADA*-sse. Katse kirjelduses räägitakse kust saab leida konfiguratsiooni faile ja mis on nende sisu. Vastavalt failide sisule tuvastatakse ära signaali tekitavat objekti. Objekti aadresside teadmist kasutatakse andmeside konfigureerimisel.

Katsetused on valitud, et maksimaalselt hõlmata tsentraliseeritud süsteemi põhiomadusi lihtsamate funktsioonide näitel. Lisaks, katsete eesmärk on tutvustada lugejale kasutajaliidese



reaalset pilti. Katsetamata on jäänud automaatika funktsioonid keeruka modelleerimise vajaduse tõttu.

#### **4.1. Kõrge resolutsioonilised mõõtmised ja kaabli lühikeste ülimööduvate rikete tuvastamise metoodika tutvustamine**

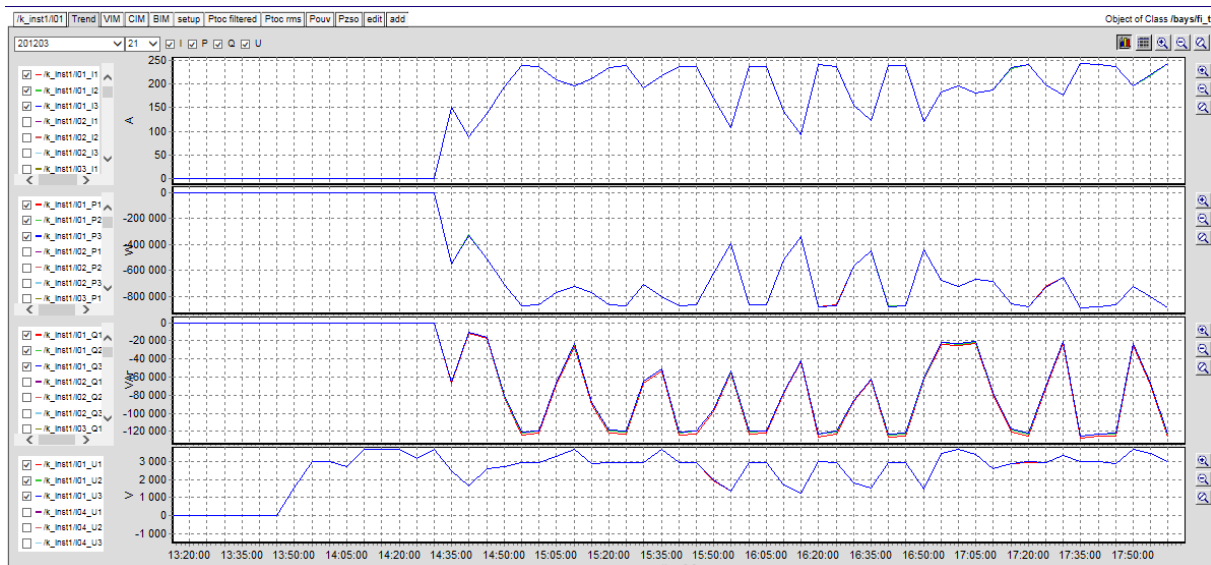
Üheks *SASensor*®-i lisaväärtustest on võimekus teostada kõrgeresolutsioonilisi mõõtmisi. Mõõdetud vooludest ja pingetest *SASensor*® arvutab välja[39] järgmisi suursi:

- Pinge  $U_{\text{rms}}$  (aimult üldine lahter) ning vool  $I_{\text{rms}}$
- Sagedus (aimult üldine lahter)
- Voolu sümmeetrilised komponendid, neutraali vool
- Termilised voolud  $I_{\text{therm}}$  ja  $I_{\text{thermMAX}}$ , mis näitavad koormust igas lahtris
- Aktiiv-, reaktiiv-, näivvõimsust. Võimsuste arvutustel kasutatakse latipinget. Sissevoolavate ja väljavoolavate võimsuste summa on alati null.
- $\cos \varphi$
- Faasinurk  $\varphi$

Teatud tingimustel mõõtemoodulid võivad olla reserveeritud. Pingemoodulit võib asendada samas süsteemis asuva mooduliga tingimusel, et pinge on võetud samast punktist. Voolumooduli reserveermine põhineb Kirchhoffi I seadusel. Kui üks moodulitest langeb rivist välja, siis sooritatakse puuduvate voolude väljaarvutust. Välja arvatud väärtusi märgistatakse *HMI*-s sinise värviga.

Mõõdetud andmed läbivad mitmeastmelise muundamise teekonda. Pärast A/D muundamist tekib töötlemata kõrgresolutsiooni andmete hulk. Nii pingemoodulil, kui ka voolumoodulil on olemas vastavad draiverid, mis edastavad kolmefaasilisi mõõteandmeid tarkvarasse sagedusega 4 kHz. Voolu- ja pingemõõtemoodulitest saadud digitaalsed andmed on asünkroonsed. Need sünkroniseeritakse taaskritiseerimise plokis. Sünkroniseeritud andmed kasutatakse poolperiood arvutuste plokis. Sealt andmed saavad liikuva keskmise arvutusploki. Sünkroniseeritud andmed kasutatakse ka *Hilbert*-i ploki sisendina. See plokki lisab 90 kraadi nihet pinge faasile. *Hilbert*-i ploki väljundi kasutatakse nurga  $\varphi$  ja reaktiivvõimsuse arvutustes. Liikuva keskmise arvutusplokk annab väljundi juhtimiskeskusesse ja trendide kuvamise jaoks sobilikul kujul. Peale taaskriteerimist pinge väärtused suunatakse *Low pass* filtrisse, et filtreerida põhiharmoonikult kõik müra ära. Seejärel seda väljundit kasutatakse aja sünkronisatsiooni alusena kõigile mõõtmistele ning

kuvatakse põhiekraanil sageduse näiduna. Alajaama töö ajal pidevalt kirjutatakse mällu trende. Trendidelt on nähtav kuidas muutus koormus, voolusuund, pinge ja reaktiivvõimsus iga viie minuti tagant. On võimalik valida fiidrite ning faasite kaupa mõõdetud koormust. Antud funktsioon lubab jälgida koormusgraafikuid reaajas ning vastavalt sellele sooritada planeerimist järgmisele kuupäevale suure täpsusega. On võimalus kasutada andmete ajalugu. Trende tavaliselt hoiustatakse pilveserveris ning need on kättesaadavad igal ajal. Trendid, mis olid mõõdetud laboritingimustes testseadmega on kuvatud joonisel 4.7.



**Joonis 4.7. Trendide näidud. Ülevalt alla: vool ( $A$ ), aktiivvõimsus ( $W$ ), reaktiivvõimsus ( $VAr$ ), pinge ( $V$ )**

Trendid olid mõõdetud RTDS katsete ajal. On jälgitav väike inertsus. Oletatavasti see on tingitud keskmiste väärtuste kasutamisest. Näiteks, on kindlalt teada, et pingete lohude ajal oli vahepealne pinge väljalülitus. Juhul, kui see kestaks pikemalt, kui 5 min, siis pinge trend saabuks nulli.

Kaabli rikete ennetamine on oluline edusamm tarbijate katkestuste hulga vähendamiseks. Kõrgeresolutsiooniliste mõõteandmete väärtuseks on võimalus täpsemini tuvastada riketele iseloomulikke lainekujusid. Kaabli riketele eelnev seisund seisneb lühikeses ülimõõduvas läbilöögis, mille kestvus on alla 10 ms. Tänu võimalusele põhjalikult analüüsida mõõteandmete ajalugu, oli koostatud lühiajaliste ülimõõduvate lühiste tuvastamise algoritm.[42] Algoritmi välja töötamiseks analüüsiti SASensor®-i poolt mõõdetud väärtusi. Kaabli lühiajalise riketega seotud protsess on sarnane maalühisega: tasakaalustatud süsteemis tekib nulljärgnevusvool. Selle pärast rikke tuvastamise reeglid on viidud nulljärgnevusvoolu Io ja selle juurdekasvu kiiruse aja järgi dIo väärtuse hindamiseks. Voolu Io väärtuse

hindamise alusel võib tuvastada lühiaegset lühikest ülimööduvat riket. Tegelik ja amplituudväärtuse suhe erinevus tavaolukorras võrdub  $\sqrt{2}$ -ga, aga rikkeolukorras erinevus on märksa suurem. Tegelik vooluväärtus  $I_{rms}$  on oluliselt inertsem, kui amplituudväärtus  $I_{MAX}$ . Lühikese aja jooksul tegelik vooluväärtus ei muutu kiiresti. Seda väärtust võetakse aluseks tegurite arvutamiseks. Tegurit arvutatakse  $I_{MAX}/I_{rms}$ . Lühiajalise ülimööduva rikke korral koefitsient on palju suurem, kui kaks: tuvastamisega probleeme ei teki. Juhul, kui selline rike on pikaajaline (kuni 10 ms), siis tuvastamine on raskendatud, kuna tegur on lähedane kahega. Sel juhul algoritm segab lühiseliike kokku. Selleks, et seda ei tekiks, võrreldatakse nulljärgnevusvoolu juurdekasvud aja järgi  $dI_{MAX}/dI_{rms}$ . Algoritmi reeglid, mida võeti kasutusse 2012 aastal on kujutatud tabelis 4.1. Algoritmi koos rikkekoha leidmise meetmete harrastamisega on võimalik ennetada suure hulga klientide katkestusi ja planeerida ümberlülitusi hooldustööde läbiviimiseks.

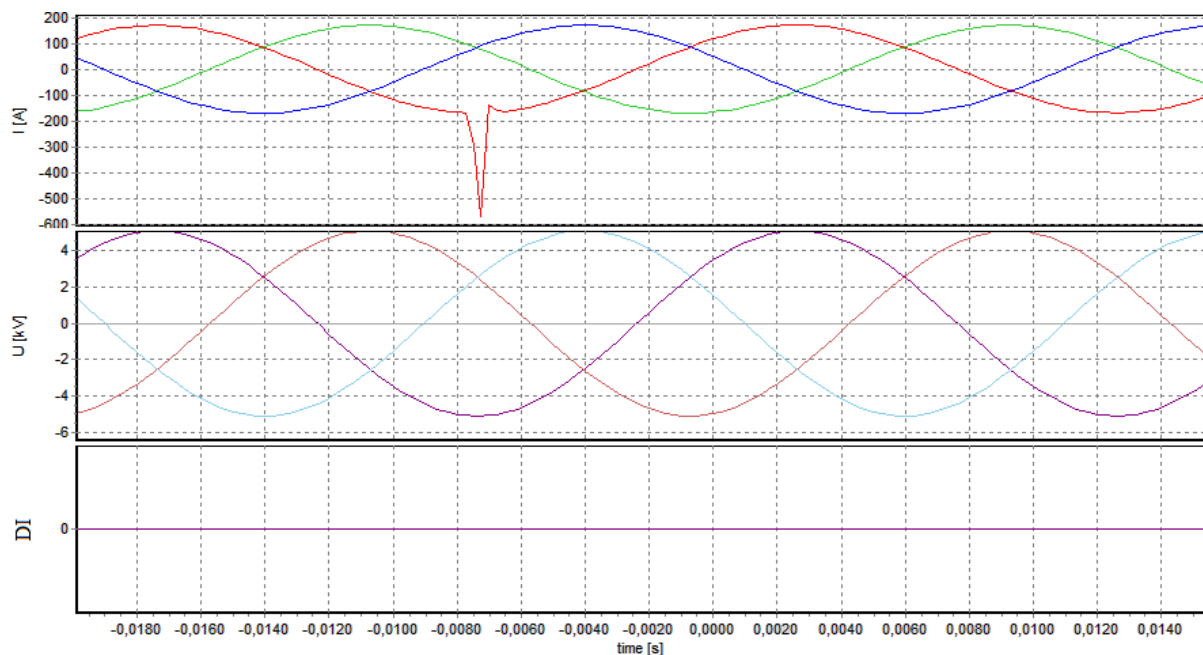
**Tabel 4.1 Praktilised reeglid lühikeste ülimööduvate rikete tuvastamiseks[42]**

	<b>Parameeter</b>	<b>Lühiajaline lühike ülimööduv rike</b>	<b>Pikaajaline lühike ülimööduv rike</b>	<b>Ühik</b>
Õige tuvastamine, kui	$ I_o _{MAX}$	>30	>30	A
	$ I_o _{MAX}/ I_o _{rms}$	>2		-
	$ dI_o _{MAX}/ dI_o _{rms}$		>3	-

Tänapäeval on olemas tööstuslikud induktiivsed andurid (osalahenduste detektorid), mis jälgivad kaablite isolatsiooni süsteemi reaajas. Nende paigaldamine tähendab lisakulutusi anduritele ja süsteemile, mille osana nad toimivad. Andurite täpsus annab võimalust tuvastada nõrka kohta kaabli isolatsioonis palju varem, kui toimub lühike läbilööök. Osalahenduste detektoreid töödeldakse välja ka energiakvaliteedi mõõtmiste jaoks.[43] Andurid kuuluvad eraldiseisva monitooringu süsteemi, mis edastab andmeid edasi juhtimiskeskusesse. Juhul, kui suur täpsus ei ole nõutud ja ennetamisemeetmed kasutatakse ühes hulgas teiste

funktsioonidega, siis algoritmi rakendamine kasutades kõrgresolutsioonilisi andmeid on autori seisukohalt majanduslikult eelistatum.

Mõõtmiskatsete raames oli läbiviidud SASensori tundlikuse test. Oli mõeldud näidata kuivõrd lühiajalise impulsi on SASensor® suuteline ära tuvastama. Katse raames RTDS-i jaoks oli koostatud lihtne skeem, mis tekitas pulsi nupule vajutamise hetkel. Pulsi pikkust reguleeriti vooluväärtuse muutmisega, mille juures algab (A) ja lõpeb (L) liitmine. Katse jaoks kasutati põhiväärtusena 1A rms. Nupu vajutamise hetkel sellele liideti 3A, ehk vool oli neljakordne. SASensor®-i voolutrafo ülekandesuhe oli 600/5 ning liigvoolukaitsmete sätted I> ja I>> olid vastavalt 200A ja 300A. Häiresalvesti startimise säte oli 150A. Katse ajal nupu vajutamise tulemusena toimus häiresalvesti kirje loomine. Liigvoolukaitsed ei toimunud isegi siis, kui voolu väärtus ületas lühiaegselt nende sätteväärtust. Tabelis 4.2. on toodud impulssi algus- ja lõppvooluväärtus ning tuvastatud impulsi umbkaudne kestvus. Joonisel 4.7. on toodud kõige lühidama tuvastatud impulsi häiresalvesti pilt. Lahtris DI on kõik väärtused võrdsed 0-ga, sest mitte ükski kaitse ei toimunud.



**Joonis 4.7. Lühedama impulssi kuju häiresalvestil; kaitse töö ei ole nähtav**

Joonisest 4.7 on nähtav, et alla 1ms lühike impulss on küll talutav, kuid selle kuju ei vasta RTDS-is nähtavale kujule. Pikemaid impulssid kestvusega alates 2 ms SASensor tuvastab sama kujuga, nagu väljastab RTDS. Aeg võrreldes RTDS-iga erineb 2-3 ms võrra.

**Tabel 4.2. Tuvastatud impulsside algus (A) ja lõpp(L) vooluväärtus ning impulssi kestvus**

<b>A ja L vool I(A)</b>	<b>t(ms)</b>
0,92	3
0,95	2
0,99	1,2
0,999	<1

Selliste lühikeste impulsside tuvastamise võimalus näitab, et impulssi kestvusega 1-10 ms suudab *SASensor*® samamoodi tuvastada. Sellisel moel eelmainitud riknenud kaabli leidmise algoritm, mis baseerib tarkvaralise lahenduse peal on töövõimeline ja kasulik.

#### **4.2. Kaitse testimine liigvoolu kaitse näitel ning häiresalvesti graafikute võrdlemine RTDS-i graafikutega**

Tsentraliseeritud releekaitse ja automaatika süsteem eeldab sisseehitatud kaitsete olemasolu. Oli otsustatud proovida kaitsmete toimimist häire ajal ja seejärel vaadelda häiresalvesti sissekirjeid. Selleks, et liigvoolu kaitse hakkaks tööle, on vaja anda voolusätted ette ning märgistada, et kaitse võib töötada välja lülitamisele.

Makskaitse puhul on võimalik valida ajaviite tüübi: invertteeritud või otsene viide. Sätete ette andmine toimub vastava kaitse nimega lahtri all fiidri sätete aknas. Peab ette andma primaarvoolu väärtust ning seade ise arvutab kõiki vajalikke parameetreid välja. Joonisel 4.8. on esitatud liigvoolukaitsmete aken fiidris L03.

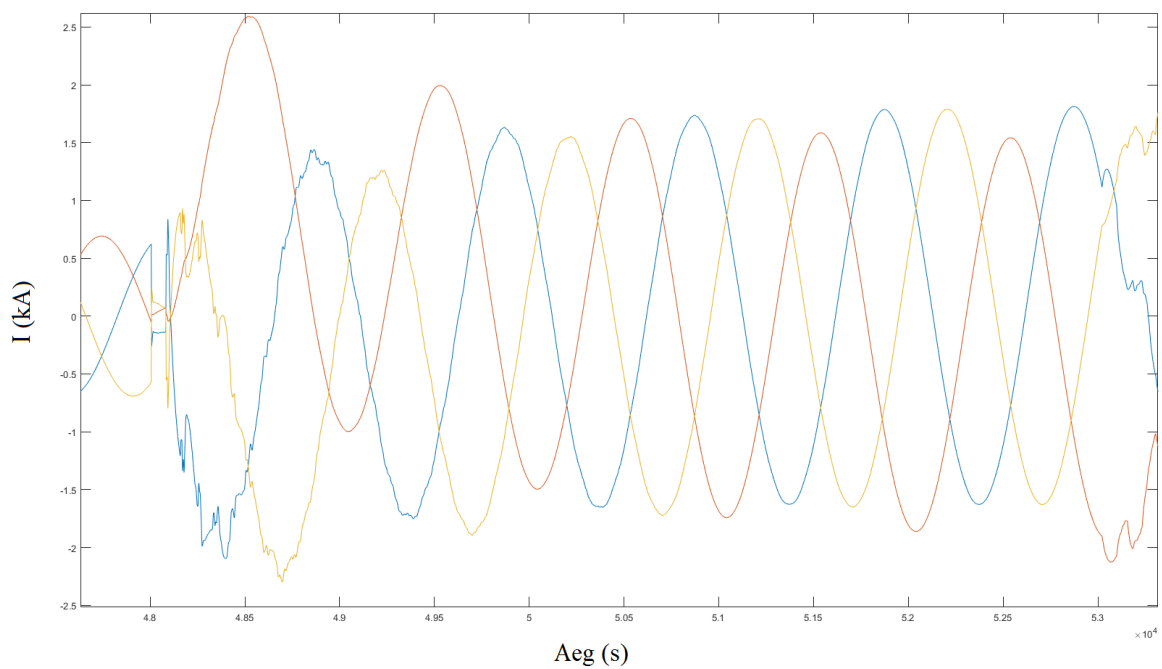
Selleks, et kaitse oleks võimeline rakenduma peab märkima ruutu „*Trip enabled*“ linnukesega. Juhul kui see ei ole tehtud, toimib kaitse signaalile. Makskaitse toimimisviis on sarnane joonisel 1.5. näidatud loogikaga.

#### Joonis 4.8. Fiidri L01 liigvoolukaitsmete sätete aken

Pärast kaitse rakendamist aktiveerub häiresalvesti. Häiresalvesti faili kirjutatakse ASCII formaadis. Häiresalvesti on kättesaadav mitmetest kohtadest. Esimene on kataloogis „Application/system/Digital Fault Recording“ [40]; teine on vajutades kataloogi „Settings“ ning valides lahtri „logfiles“. Avatud aknas valitakse „dfr“ ja vastav aeg. Joonisel 4.9. on toodud häiresalvesti näide, mille väljuva fiidri kaitse startis, kui vool ületas sätteväärtust 200A, seejärel ootas viiteaega 800 ms ning rakendus püsiva liigvoolu tõttu. Kaitse rakendus on kajastatud häiresalvestis veidi varem kui etteantud aeg. Kaitse rakendamise tingimusi võib näha „trip“ logist, mis asub lahtri „logfiles“ all „Settings“ kataloogis. Lülitid ei ole juhitud SASensor®-i poolt, seega signaalid jäävad peale. Häiresalvesti graafikutel on võimalik kuvada mõõteandmeid faaside ja fiidrite kaupa, digitaalsete sisendite aktiivseid olekuid, kiire *Fourier* teisendust (*FFT*) ning teise sektsiooni pinget. Selleks on vaja panna linnukest vastavasse ruutu häiresalvesti vaatamise ajal. Kuna laadimine toimub ketta pealt, siis see võib võtta veidi aega. Vasakul on võimalik valida signaale faaside ning fiidrite kaupa asetades linnukest vasasse ruutu. Pärast avamist on kõik signaalid valitud. Nende eemaldamiseks tuleb linnuke ära võtta.



**Joonis 4.9.** Testseade maksikaitse start ning rakenduse kuvavad DI-d



**Joonis 4.10.** RTDS voolukõverate häiresalvesti

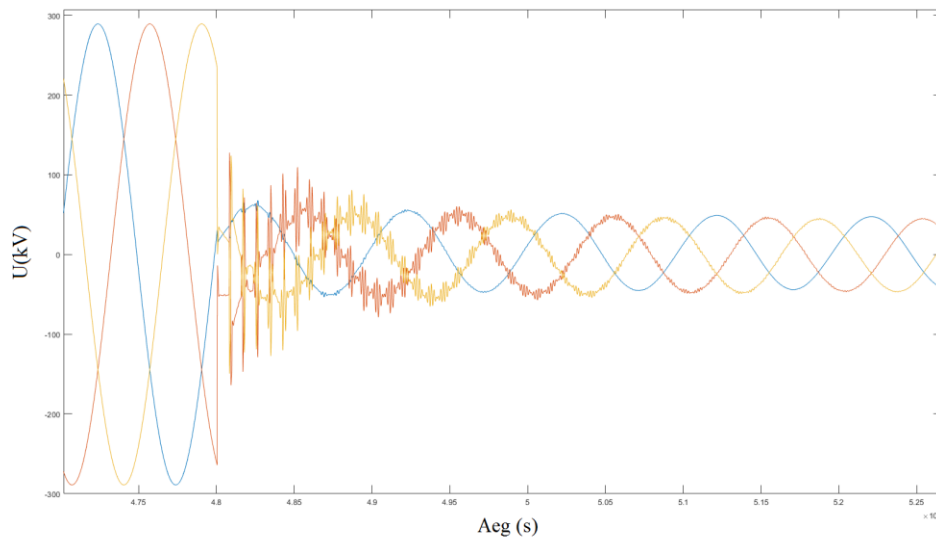
Lainekujud, mis on esitatud häiresalvesti graafikutes on väga sarnased kujudega, mida saadab välja RTDS. Järelikult häiresalvesti kuvab tegelikku mõõtmiste lainekuju võrgus toimunud häiretest. Joonistel 4.10.-4.12. on esitatud häiresignaali kujud, mis on saadetud RTDS-ilt välja ja need, mis on mõõdetud SASensor®-i poolt. RTDS-is toimus katse, mis oli seotud liini lühisest välja lülitamisega ning jälgitava liini koormuse suurenemisega. Võnkumised on

tingitud

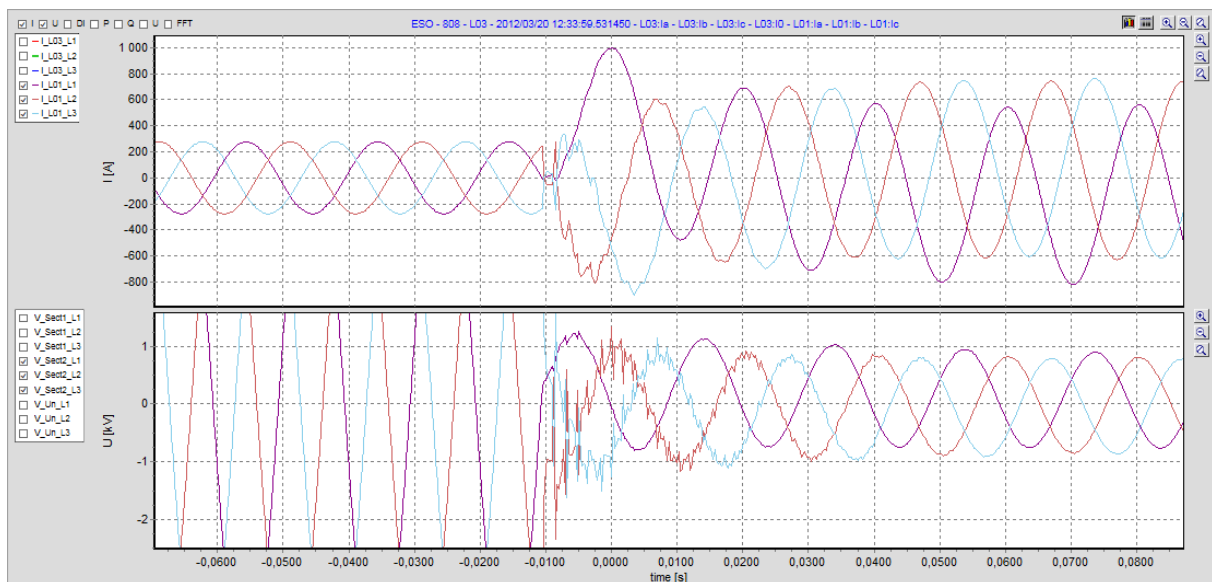
ka

generaatori

olemasolust.



**Joonis 4.11. RTDS pingekõverate häiresalvesti**



**Joonis 4.12. SASensori häiresalvesti: üleval on voolu graafik, all on pinge graafik**

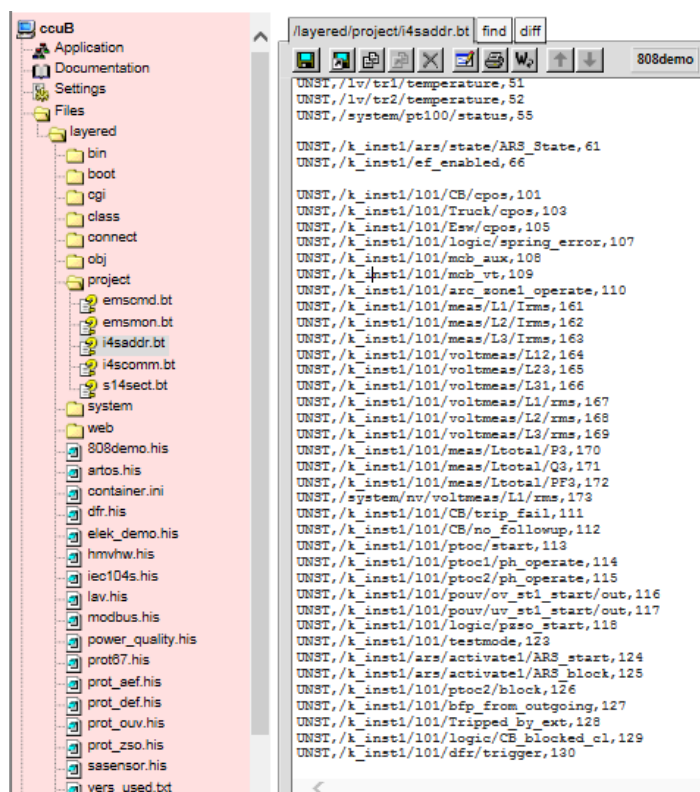
Protsessi kogukestvus on umbes 800 ms. Peale protsessi võnkumiste summutamist on saavutatud püsirežiim suuremate koormusvooludega faasides. Voolu laine kuju täpselt järgib RTDS-ilt saadud lainekuju. Tähelepanu tasub pöörata häiringu esimese poolperioodi peale. Ajaskaala mugav resolutsioon on 0.01 s ehk poolperioodi kestvuse aeg. Mõõtkava võib muuta detailsemaks, kuid siis on näha signaali täpset kuju, mitte graafiku ülevaadet. Selline lähenemine, autori arvates, sobib pigem täppisanalüüsiks, kui inseneri läbivaatuseks. Tänu kujude täpsele välja joonistamisele on võimalik luua täpsemaid matemaatilisi mudeleid, et sooritada varustuse labori katseid. Kõrgresolutsioonilised mõõteandmed annavad võimalust



jälgida ka keerukamaid dünaamilisi protsesse võrgus ja joonistada täpseid lainekujusid. Samamoodi saadud andmete teadmine võib olla kasulik uute standardite loomiseks ning uute energia kvaliteedi parandusmeetmete välja töötamiseks.

### 4.3. Kommunikatsiooni protokoll IEC 60870-5-104 Slave võimekuse testimine

Kommunikatsiooni protokoll *IEC 60870-5-104* eelseadistatud parameetrid on standardiga määratud vaikimisi kokku lepitud parameetrid. Kasutatakse standardseid *ASDU*-si (*Application Service Data Unit*). Testseade *SASensor* on *IEC 104 Slave* seade. See tähendab, et temalt saab pärida andmeid *IEC 104 Master*, näiteks, *SCADA*. Selleks, et teada saada, mis *IEC 104* aadressit omab *SASensor*®-i objekt, võib selle üle vaadata kataloogist „Files“ kaustast „project“ failist „i4saddr.bt“. Joonisel 4.13. on näidatud *IEC 104s* konfiguratsiooni failidele teeviit.



Joonis 4.13. IEC 104s failid kataloogis

Tarkvara The Vinci abil oli emuleeritud *IEC 60870-5-104 Master*. Kasutades *IEC 104s* juhendis [41] oleva *ASDU* tüüpi oli teostatud *GI* küsitlus. Lahtrid, kus kõik moodulid olid paigas olid tulnud küsitlusele vastustena ning nende seisund oli „OK“. Lahtrid, mis ei olnud kokku ühendatud või moodulid ei olnud simuleeritud saatsid tagasisidet „NT“ (*Not Topical*).

See tähendab, et *SASensor*<sup>®</sup> ei ole kindel signaalide tõele vastavuses. Peale *GI*-t olid teostatud juhtimised vastavate aadressite kaupa. Juhtimissignaali *ASDU* tüüp on 46: *double command*. Juhtimispunktide signaalide aadresse võib vaadata üle failist „*emscmd.bt*“. Esimese lahtri L01 väljalülitamiskäsu *IOA* on 181. Katsete ajal *SASensor*<sup>®</sup> saatis välja mõõteandmeid (Joonis 4.14.), digitaalsete sisendite olekuid (Joonis 4.15.).

Aadressid 161-163 on kolme faasi voolud(A), 164-165 on faas-faas pinged(kV), 167-169 on kolme faasi faaspinged(kV), 170 on aktiivvõimsus (W) ning 171 on reaktiivvõimsus. Signaali tähistus *M\_ME\_TF\_1* tähendab, et see on liikuva komaga mõõteväärtus *CP56Time2a* ajatempliga[43].

M_ME_TF_1 (TI=036)	spont	60	161	194,31723	OK	[W][0]2012.03.21 15:26:55.359	70	-
M_ME_TF_1 (TI=036)	spont	60	162	194,30423	OK	[W][0]2012.03.21 15:26:55.359	68	-
M_ME_TF_1 (TI=036)	spont	60	163	194,20921	OK	[W][0]2012.03.21 15:26:55.359	67	-
M_ME_TF_1 (TI=036)	spont	60	164	6453,35791	OK	[W][0]2012.03.21 15:27:01.348	166	-
M_ME_TF_1 (TI=036)	spont	60	165	6448,65723	OK	[W][0]2012.03.21 15:27:01.348	162	-
M_ME_TF_1 (TI=036)	spont	60	166	6443,95117	OK	[W][0]2012.03.21 15:27:01.348	164	-
M_ME_TF_1 (TI=036)	spont	60	167	3721,69409	OK	[W][0]2012.03.21 15:27:01.348	141	-
M_ME_TF_1 (TI=036)	spont	60	168	3723,72925	OK	[W][0]2012.03.21 15:27:01.348	140	-
M_ME_TF_1 (TI=036)	spont	60	169	3721,62305	OK	[W][0]2012.03.21 15:27:01.847	138	-
M_ME_TF_1 (TI=036)	spont	60	170	-2180029,75000	OK	[W][0]2012.03.21 15:28:06.895	1615	-
M_ME_TF_1 (TI=036)	spont	60	171	-72378,83594	OK	[W][0]2012.03.21 15:28:06.893	1699	-

**Joonis 4.14. The Vinci IEC 104 L01lahtri mõõteandmed**

TI	Cause	ASDU	IOA	Value	Status	TimeTag	Count
M_SP_NA_1 (TI=001)	Inrogen	60	66	OFF[0]	OK	-	0
M_ME_TF_1 (TI=036)	spont	60	107	-4359707,00000	OK	[W][0]2012.03.21 16:41:36.204	2
M_ME_TF_1 (TI=036)	spont	60	108	-2180038,75000	OK	[W][0]2012.03.21 17:01:44.628	1
M_SP_NA_1 (TI=001)	Inrogen	60	109	OFF[0]	OK	-	0
M_SP_NA_1 (TI=001)	Inrogen	60	110	OFF[0]	OK	-	0
M_SP_NA_1 (TI=001)	Inrogen	60	111	OFF[0]	OK	-	0
M_SP_NA_1 (TI=001)	Inrogen	60	112	OFF[0]	OK	-	0
M_SP_TB_1 (TI=030)	spont	60	113	ON[1]	OK	[W][0]2012.03.21 17:09:52.878	145
M_SP_NA_1 (TI=001)	Inrogen	60	114	OFF[0]	OK	-	0
M_SP_NA_1 (TI=001)	Inrogen	60	115	OFF[0]	OK	-	0
M_SP_NA_1 (TI=001)	Inrogen	60	116	OFF[0]	OK	-	0
M_SP_NA_1 (TI=001)	Inrogen	60	117	OFF[0]	OK	-	0
M_SP_NA_1 (TI=001)	Inrogen	60	118	OFF[0]	OK	-	0
M_SP_NA_1 (TI=001)	Inrogen	60	123	OFF[0]	OK	-	0
M_SP_NA_1 (TI=001)	Inrogen	60	124	OFF[0]	OK	-	0
M_SP_TB_1 (TI=030)	spont	60	125	ON[1]	OK	[W][0]2012.03.21 17:10:21.278	453
M_SP_TB_1 (TI=030)	spont	60	126	ON[1]	OK	[W][0]2012.03.21 17:09:51.053	141
M_SP_TB_1 (TI=030)	spont	60	127	ON[1]	OK	[W][0]2012.03.21 17:09:51.153	131
M_SP_NA_1 (TI=001)	Inrogen	60	128	OFF[0]	OK	-	0
M_SP_NA_1 (TI=001)	Inrogen	60	129	OFF[0]	OK	-	0
M_SP_TB_1 (TI=030)	spont	60	130	ON[1]	OK	[W][0]2012.03.21 17:09:52.878	145

**Joonis 4.15. The Vinci IEC 104 L01 lahtri digitaalsete väljundite seisundid**

Antud hetkel oli liigvoolukaitse rakendus väljundfiidris L03. Aktiivsetele signaalidele on lisatud ajatempel. Sellega nad eristuvad signaalidest, mis on tulnud *GI*-st („Introgen“). Hetkel on aktiivsed aadressid 113 – liigvoolukaitse start, 125 – RLA blokeeritud, 126- liigvoolukaitse blokeeritud, 127 – VLTK väljundfiidrist, 130 – häresalvesti käivitus. *SCADA*

emuleerimise katse näitas, et *SASensor*<sup>®</sup> on suuteline vastu võtma juhtimisi, saatma mõõtmisi, edastama digitaalsetest sisenditest seireinfot. Jälgitud oli ka loogika toimimist. Näiteks liigvoolukaitse blokeerimise loogika toime sisendfiidris. Sellest poolest see ei erine hajutatud süsteemi *IED*-dest. Ainuke eripära on see, et kõik signaalid tulevad ühest füüsilisest kohast ning ei oma viiteaega.

#### **4.4. Tsentraliseeritud süsteemi katsetamisel märgatud positiivsed ja negatiivsed küljed**

Autori isikliku kogemuse põhjal on toodud tsentraliseeritud süsteemi positiivsed ja negatiivsed küljed. Esile toodud kõige silmapaistvamad aspektid, millisi autor oli suuteline märgata. Positiivsed küljed:

- Süsteemi on väga lihtne paigaldada ja teostada elementide asendust nii füüsiliselt kui tarkvaraliselt. Kogu süsteem toimib põhimõttel „*Plug & Play*“.
- Kasutajaliidese kasutamiseks ei pea omama erilist tarkvarat.
- Alajaama vaatepilt on ülevaatlik ja annab esimesest pilgust kokkuvõtliku informatsiooni kogu alajaamast.
- On olemas turvameetmed. Süsteemi sätestamiseks peab ennast autoriseerima.
- Täpne mõõtmine ning suur häiresalvesti maht.
- Häiresalvesti kanalite suur arv võimaldab vaadelda andmeid kogu alajaama ulatuses ühel pildil.
- Kommunikatsiooni protokoll *IEC 60870-5-104* lihtsasti jälgitav konfiguratsioon.
- Sätete ülespanemiseks kasutatakse primaarvoolu ning pole vajadust koefitsiente välja arvutamiseks.

Negatiivsed küljed:

- Kulub suur hulk maandusklemme.
- Puu struktuuriga on vaja kohaneda. Kasutajasõbralikkuse tase on madal.
- Ei ole selge kuidas on konfigureeritud väljundid (võiks olla maatriksi kujul). Vajaliku info otsing võib osutuda tülikaks.
- Vigade otsimine ja diagnostika on keerukas.

Autori poolt esitatud negatiivsed küljed on suuremas osas seotud autori liiga väikese kogemusega tsentraliseeritud süsteemi kasutamisel. Need probleemid peavad olema välditavad vastava väljaõpe ning tehnilise tugi poole pöördumise abiga.

## Kokkuvõte

Töö eesmärgiks on tutvustada lugejale tsentraliseeritud kaitse ja juhtimissüsteemi ning tõsta selle teadlikkust. Teema „Keskpingealajaama kaitse- ja automaatikasüsteem tsentraliseeritud süsteemi platvormina SASensori näitel“ on seotud alajaamade sekundaarsüsteemi digitaliseerimisega ning rekonstrueerimisega. Selleks, et lugejal tekiks ulatuslik ettekujutus alajaama olemasolevatest sekundaarsüsteemidest, käsitletakse töös digitaalse alajaama põhimõtteid. Paljudes Eestis olevates jaotusalajaamades on vananenud sekundaarsüsteem. Traditsiooniliselt alajaamades kasutati hajutatud lahtripõhist süsteemi. Aga tänapäeva võrguettevõtetal on olemas valik: kas kasutada klassikalist hajutatud süsteemi või üle minna tsentraliseeritud süsteemile nii rekonstrueerimisel kui ka uue alajaama rajamisel. Kui töö eesmärk on saavutatud, siis lugejal tekib arusaam CPC süsteemi ülesehitusest, omadustest ja toimimispõhimõtetest. Lugejale esitatakse ka subjektiivse autori hinnangut CPC süsteemile. Järeldusena võib lugeja iseseisvalt eristada ja kaaluda CPC süsteemi poolt ja vastu argumente. Järgnevalt võetakse kokku olulisemad töö punktid ning töö tulemused.

Digitaalse alajaama mõiste on levinud tänu standardi *IEC 61850 Communication Systems and Networks in Substations* kasutuse alustamisele alates 2000-ndatest aastatest. Digitaalse alajaama eesmärk on seadmete halduse kergendamine, kulude vähendamine, integreeritavuse tagamine ning releeterminalide vahelise andmeside parandamine. Standard tähendab üldist lähenemist alajaama andmeside korraldamisele kõikide turu osanike poolt. Standard *IEC 61850* määrab alajaama kihilist struktuuri. Esimene alajaama kiht on protsessi kiht. Siin asuvad kõik primaarseadmed ning sisend-väljund moodulid. Teine on lahtrikiht, kus asuvad releeterminalid, arvestid, tsentraliseeritud kaitse protsessorite plokid. Kolmas on alajaama kiht, kus asuvad kaugterminalid, kommunikatsiooni moodulid ja kohalikud kasutaja liidesed. Kihtide vahele on standardiga *IEC 61850* mõeldud andmesiidid, mis koosnevad *Ethernet switch*-idest ning tagavad liiasust. Protsessi- ja lahtrikihtide vahele on mõeldud protsessisiin ning lahtri ja alajaama kihtide vahele on mõeldud alajaama siin. Liiasuse tagamiseks kasutatakse levinumad liiasuse protokolle *RSTP/HSR/PRP*. Tänapäeval on laialt kasutusel alajaama siin, kus liiguvad *GOOSE IEC 61850-8-1* sõnumid releeterminalide vahel ning *MMS* kaugterminali ning releeterminalide vahel. Juhtimiskeskus peab sidet alati alajaama kihiga ning ühineb kaugterminaliga ühte virtuaalsesse võrku. Lähitulevikus kavatakse kasutusele võtta protsessisiini. Protsessisiinis hakkavad liikuma *Sampled Values IEC 61850-9-2* (diskreetitud valimid) optilistest mõõteanduritest ning jaotla seadmete väljaviigudest.

Digitaalse alajaama ülesehitamiseks kasutatakse kahte lähenemist: hajutatud ning tsentraliseeritud. Hajutatud lähenemine eeldab, et iga seade omab piiratud vastutusala. See on loodud eraldiseisvate fiidriterminalide baasil. Kommunikatsiooni eest vastutab eraldiseisev kaugterminal. Hajutatud süsteemi üles sättimiseks on tarvis vähemalt kolme pädevat inseneri: releekaitse insener, telemaatik, arvestite seadistamise insener. Erinevate seadmete suur hulk tekitab vajadust iga seadme põlvkonna spetsialisti välja koolitamist. Tootjapõhine riist- ja tarkvara seob võrguettevõtet konkreetse seadmete tootjaga. Kui ajaga süsteem vananeb, siis selle osade vahetamine või parandamine muutub kalliks ja ebaotstarbekaks. Tsentraliseeritud süsteem eeldab, et üks võimas arvutuselement kannab vastutust kogu alajaama kaitsete, automaatika ja seire toimimise eest. Moodulid, mis koguvad infot primaarseadmetest võivad asuda tsentraalsest arvutist kaugemal ning edastada andmeid läbi *Ethernet* võrku. Kommunikatsiooni jaoks tsentraliseeritud süsteem omab samamoodi moodulit, mis on süsteemi osa. Personali koolitamine on ühest poolest kergendatud piiratud seadmete hulga olemasoluga. Teisest poolest iga töötaja, kes puutub kokku tsentraliseeritud süsteemiga peab teadma alajaama releekaitse, juhtimis ja kommunikatsiooni süsteemi põhimõtteid. Tsentraliseeritud süsteemi põhiosa on tarkvara, mis võib olla kergesti vahetatav ilma riistvara muutmiseta. Tsentraliseeritud süsteem eeldab avatud platvormi, kus tarkvara ei ole seotud riistvaraga. Süsteemi osade vahetamine on kergendatud moodulpõhise ülesehitusega.

Alajaama seadmete vahel luuakse sideühendusi. Standardi *IEC 61850* kasutamine toimub *Ethernet* võrgu kasutamisega. Nii hajutatud, kui ka tsentraliseeritud süsteemid vajavad andmeside kanaleid, et infot vahetada. Andmeside kanalite topoloogiaid nimetatakse arhitektuurideks. Arhitektuur määrab süsteemi andmeside võimekust ja funktsionaalsust. Erinevad arhitektuurid maksavad erinevalt ning tagavad erinevat töökindlust. Kohal, kus on vajalik suurem töökindlus, kasutatakse keerukamaid arhitektuure. Mida rohkem andmete liikumise teekondi rikke korral tagab arhitektuur, seda parem on selle töökindlus. Suurem töökindlus tähendab maksumuse suurenemist. Võrguettevõtte jaoks on oluline leida optimum andmeside arhitektuuri maksumuse ning töökindluse vahel. Hajutatud ja tsentraliseeritud süsteemide arhitektuure võib kasutada koos, nagu „ hübriid“ lahendus või eraldi, nagu eraldiseisev süsteem. On oluline arvutada iga pakutava arhitektuuri nii esialgse investeeringu maksumust, kui ka elutsükli kulusid. Arvutuste käigus on vaja arvestada arhitektuuride iseärasusi, seadmete keerukust, personali osavust, rikete tõenäosusi ja muid aspekte, mis mõjutavad arhitektuuri elutsükli investeeringute mahtu. Hajutatud arhitektuur osutus olla ligi 50% kulukam, kui tsentraliseeritud arhitektuur.

Eesti võrguettevõtte Elektrilevi ning Rootsi võrguettevõtte Ellevio on võetud kasutusele tsentraliseeritud süsteemi *SASensor*<sup>®</sup>. *SASensor*<sup>®</sup> on Hollandi firma *Locamation* toode. Eestis süsteemi *SASensor*<sup>®</sup> paigaldati alajaama 808 pilootprojekti raames. Autoril õnnestus külastada seda objekti. Alajaama 808 on ühendatud üle 4000 tarbija, mis tähendab, et see on vastutusrikas objekt. Rootsis süsteemi *SASensor* paigaldati alajaama Kyrkviken. Süsteemi koosseisu kuulub neli mooduli tüüpi ning tsentraalne arvutusseade. Mooduleid nimetatakse vastavalt: *CIM* – vooluliidese moodul, *VIM* – pingeliidese moodul, *VCU* – kommunikatsiooni moodul ja *BIM* – võimsuslülitiliidese moodul. Keskjuhtimisseadet nimetatakse *CCU*-ks. Moodulid peavad sidet keskjuhtimisseadmega *Ethernet* võrgu vahendusel kasutades *SASensor*-i<sup>®</sup> siseprotokoll. Kogu süsteem kujutab endast „lahtivõetud *IED*“, sest moodulid täidavad samu funktsioone, nagu *IED* kaardid. Alajaama 808 tsentraliseeritud süsteemi paigaldamisel kasutati vanu jaotusseadme klemmkappe. Uus montaaž oli tehtud keskjuhtimisseadmete kappidele ja kommunikatsiooni mooduli kapile. Madalpinge seire paigaldati vana telemaatika kappi. Kogu alajaama toitesüsteem oli ümberehitatud alalisvoolu süsteemiks. Alajaama 808 *SASensor* süsteem tarbib arvutuslikult 35% vähem energiat, kui tarbiks samaväärne *IED* põhine kaitse ja juhtimissüsteem. Süsteemi *SASensor* seire ja kaitse all on nii alajaama keskpinge, kui ka alajaama madalpinge osa. Autori poolt läbiviidud küsitluste vastused näitavad, et võrguettevõtted on huvitatud tsentraliseeritud süsteemi kasutamises. Peamine takistus otsuse tegemiseks on väike kogemus tsentraliseeritud süsteemiga kokkupuutel. Nii Eestis kui Rootsis esineb varustuse uuendamise probleem. Ressursid on piiratud, aga uuendust vajav alajaamade hulk on suur. Alternatiivsele lahendusele üleminekut kaalutakse mitmekülgsest. Vaadeldakse kulude peale, funktsionaalsuse peale, võimalike tööde mahtude peale ning kaalutakse puudujääke. Eesti ja Rootsi spetsialistid hindasid tavapäraste *IED*-dega seotud probleeme. Olulisem on nende keerukus ja tülikas seadistamine. Praegusel hetkel *SASensor* lisaväärtust koostavad kõrgresolutsioonilised mõõtmised ei ole kasutusel rohkem, kui *IED* poolsed mõõtmised. Ehituse töömahtu hinnati samasuguseks nagu hajutatud süsteemi puhul. Seadistamiseks kuluvat tööaega hinnati ajaliselt vähemaks. Vastustes oli arutatud alajaamade vahelise juhtimise teema ning selgus, et seda on otstarbekam sooritada *SCADA*-s. Tulevikukindlateks *SASensor*<sup>®</sup>-i iseärasuseks on toodud esile avatud platvorm. Pindala kasutamise poolest hindasid Elektrilevi spetsialistid *SASensor*<sup>®</sup>-i kulukaks seadmeks. Ellevio spetsialist mainis kompaktsust. See oli tingitud sellega, et Eestis *SASensor*<sup>®</sup> paigaldati jaotusalajaama, aga Rootsis piirkonna alajaama. Puudujääkideks Elektrilevi spetsialistide poolt on märgitud

tehniline ja funktsionaalne pool. Ellevio spetsialist pani tähele tsentraliseeritud süsteemi tarnijate väiksele hulgale. Eestis tsentraliseeritud süsteem oli paigaldatud vana elektro-mehhaaniliste seadmete asemel ning seetõttu seire kvaliteeti hinnati paremini. Rootsis on vastupidi – *SASensor*® süsteemi paigaldati digitaalse süsteemi duublina ning olulisi muutusi ei märgatud. Tuleviku funktsioonideks Ellevio ja Elektrilevi spetsialistid sooviksid kasutada diferentsiaalkaitset ning distantkaitset. Soovide erinevus seisnes *FLIR* automaatika võimaldamises ning alajaamade vahelise lülituste teostamises Eestis.

Tallinna Tehnika Ülikoolis asuv *SASensor*® seade oli kokku pandud autori osalusega autori poolt koostatud toiteskeemi järgi. Sideskeemi alusel olid kokku pandud moodulite ja *CCU* vahelised sidekanalid. Voolu ja pingesignaalid olid saadud *RTDS*-i poolt. Keerukad automaatika katsed ei olnud teostatud. Esmaseks tutvumiseks oli vaadeldud kasutaja liides ja märgitud selle iseärasused. Kasutajaliideses on kõik sisu nähtav menüü puu struktuuri alt. Selle puuduseks on liiga suur hulk infot korraga ühes kohas, mis võib osutada keerukaks inimesele, kes ei ole esialgse süsteemiga tuttav. Autoriga oli katsetatud mõõtmiste salvestamine nn trendid. Selgus, et ühest küljest trendid on inertsed ning ei näita kohe seisundi muutust. Teisest küljest need omavad piisavalt head täpsust ning võivad olla aluseks koormusgraafikute koostamiseks iga viie minuti tagant. Kõrgeresolutsioonilisi mõõtmisi võib rakendada näiteks lühikeste ülimööduvate kaablirikete tuvastamiseks. *SASensor*-ist koguti mõõtmisi mitmete aastate jooksul ning analüüsi tulemusena oli loodud rikete tuvastamise ja eristamise algoritm. Selleks, et oleks kindlam rikete eristamine, kasutatakse nulljärgnevusvoolu. Kui sellega tulemust ei saavutata, siis kasutatakse ka nulljärgnevusvoolu juurdekasvude maksimaalse ja tegeväärtuste võrdlemist. Suhete väärtuste alusel algoritm otsustab millise rikkega on tegu. Meetodi eeliseks on see, et selle kasutamiseks ei pea teadma võrgu maandamisviisi. Kõrgresolutsiooniga mõõtmisi kasutatakse ka häiresalvesti loomiseks. Autori poolt oli märgatud suur sarnasus *RTDS*-i poolt väljaantavate signaalide ja *SASensor*®-iga mõõdetud signaalide vahel. Eriti selgelt on sarnasus jälgitav voolu signaalidel. Võrgu signaalide kuju muutusi võib jälgida otse *SASensor*®-i häiresalvesti pealt. Andmed on autori arvates sobilikud täppisanalüüsiks. *SASensor*® kirjutab häiresalvesti faile *ASCII* formaadis. Kaitsefunktsioonide töö oli kontrollitud *SASensor*®-iga mitteseotud katsete ajal. *RTDS*-ilt tulid pinged ja voolud ning *SASensor*-il oli kaitse pandud tundlikumaks. See tagas, et kaitse rakenduks. Oli võimalik jälgida maksikaitse tööd vastavalt viiteajale. Mõõtesignaali kadumist ei juhtunud, sest *SASensor* ei juhtinud jõuahelaid. Kaitsete toimimise ajad ning väärtused, mille juures nad toimisid on võimalik lisaks häiresalvestile samuti näha „*trip*“ logist. *IEC*

60870-5-104 protokollis ülem oli modelleeritud *The Vinci Expert* tarkvara abiga. Oli märgitud mõõteandmete kõrge uuendamiskiirus. Arvatavasti, SCADA-s tuleb tekitada viiteaega, et ei küsitleks nii tihti andmeid ummistuse tekkimise vältimiseks. Kaitsete töö ajal toimisid blokeeringud ning kaitseid ise. Oli näha VLTK toimet, kui väljuva fiidri „võimsuslüliti“ ei lülitunud nõutud aja jooksul. Peatükis 4.4. autor toob esile tsentraliseeritud süsteemi positiivsed ja negatiivsed küljed isikliku kogemuse alusel. Hinnangud on autori subjektiivsed arvamused ning võivad erineda professionalide arvamustest.

Antud magistr töö käigus oli teostatud:

- Alajaama juhtimise põhimõtete selgitus
- Digitaalse alajaama seadmete funktsioonidega näitlik tutvustamine
- Hajutatud ja tsentraliseeritud süsteemide eripärade esile toomine
- Hajutatud ja tsentraliseeritud süsteemide arhitektuuride tutvustamine
- Hajutatud ja tsentraliseeritud arhitektuuride elutsükli kulude hindamine ja analüüs
- Reaalse Eestis Elektrilevi AJ 808-1 asuvaga tsentraliseeritud süsteemi tutvustamine ja lahenduse kirjeldamine
- Eesti võrguettevõtte Elektrilevi ja Rootsi võrguettevõtte Ellevio automaatika spetsialistide küsitlemine tsentraliseeritud süsteemi kohta ja vastuste analüüsiv esile toomine
- Testseadme *SASensor*<sup>®</sup> paigaldus ja katsetamine. Tsentraliseeritud süsteemi tutvustamine näidete peal
- Autori poolt esile toodud *CPC* positiivsed ja negatiivsed küljed

Töös on ülevaatlilikult näidatud tsentraliseeritud süsteemi iseärasused, reaalsed näited ning autori isiklik kogemus tsentraliseeritud kokkupuutel süsteemiga. Autori arvates, töös esitatud teave maht on piisav hinnangulise arvamuse tekitamiseks tsentraliseeritud süsteemist. Töö läbilugemise järel on võimalik sooritada otsust tsentraliseeritud süsteemi paigaldamise suhtes. Autori arvamusel Eesti võrguettevõtjad võivad julgelt kaaluda üleminekut alajaamade tsentraliseeritud kaitse ja juhtimise süsteemidele. Mida rohkem *CPC* süsteeme on kasutusel, seda tõhusam ja kiirem on selle valdkonna areng.



# Kirjandus

- [1] J. Chang, B. Vincent, M. Reynen, "Protection and Control System Upgrade Based on IEC- 61850 and PRP", ProRelay. 2014, IEEE
- [2] Tiigimägi E., Valtin J., "Elektrivõrgud - loengukonspekt", 2012, Tallinn
- [3] Elering, Eesti elektrisüsteem, <http://elering.ee/elektrisusteem/> [WWW] 21.02.2017
- [4] Siemens, kõrgepingeline GIS-ide kataloog, [http://www.energy.siemens.com/hq/pool/hq/power-transmission/high-voltage-substations/gas-insulated-switchgear/GIS\\_72\\_550\\_e.pdf](http://www.energy.siemens.com/hq/pool/hq/power-transmission/high-voltage-substations/gas-insulated-switchgear/GIS_72_550_e.pdf) [WWW] kasutatud [18.02.2017]
- [5] Siemens, NXPLUS-C-kataloog, [http://w3.siemens.com/powerdistribution/global/SiteCollection/Documents/en/mv/switchgear/gas-insulated/nxplus-c/catalogue-nxplus-c\\_ru.pdf](http://w3.siemens.com/powerdistribution/global/SiteCollection/Documents/en/mv/switchgear/gas-insulated/nxplus-c/catalogue-nxplus-c_ru.pdf) [WWW] kasutatud 18.02.2017
- [6] Centralized Substation Protection and Control, Report of WG K15, 2015, IEEE Pes
- [7] Elering, "401 Requirements for relay protection and system automation", 2016, Tallinn
- [8] "IEC 61850 Substation Overview", [www.moxa.com/SmartGrid](http://www.moxa.com/SmartGrid), MOXA [WWW] kasutatud 27.02.2017
- [9] Meldorf M., Tikk T., Kilter J., "Elektrisüsteemi operatiivjuhtimine", 2010, Tallinn
- [10] Melder M., "Protsessiini digitaliseerimise jamineerimise võimalused Eesti kõrgepingelinealajaamade andmehõivesüsteemides", Tallinn, 2015
- [11] Võrgueeskiri, <https://www.riigiteataja.ee/akt/12831412>[WWW] Kasutatud 22.02.2017
- [12] Raesaar P, "Elektrivõrkude töökindlus", [Loengukonspekt,] Tallinn, 2010
- [13] ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ СЕТЯМИ (КУЭС), [http://www.ntc-power.ru/innovative\\_projects/software\\_for\\_grid\\_management-kues/](http://www.ntc-power.ru/innovative_projects/software_for_grid_management-kues/)[WWW] Kasutatud 22.02.2017
- [14] R. Tao, B. Jiang, C. Wang "Sampling Rate Conversion and Data Synchronization in Big Merging

- Unit", 2011, IEEE
- [15] Lisowiec A. \*, Nowakowski\*A., "Modern IED in today's Smart Grids",2013, IEEE
- [16] R. Santodomingo, S. Rohjans, M. Uslar, J. A. Rodríguez-Mondèjar, M. A. Sanz-Bobi,"Facilitating the Automatic Mapping of IEC 61850 Signals and CIM Measurements", IEEE, 2013
- [17] J. Starck, A. Hakala-Ranta, Martin Stefanka, "Switchgear Optimization Using IEC 61850-9-2 and Non-Conventional Measurements", ABB, Finland
- [18] M.Vadiati, M. Abbas Ghorbani, A. R. Ebrahimi, M. Arshia, "Future Trends of Substation Automation System by Applying IEC 61850", IEEE, 2008
- [19] B. Bauernschmitt, M. Kaliwoda, B. Keune, D. Hilbrich, C. Rehtanz "An integral Engineering Process for centralised Protection & Control Systems according to IEC 61850-6", 2015, Dorthmund, Germany
- [20] D. Dolezilek, D. Whitehead, V. Skendzic "Integration of IEC 61850 GSE and Sampled Value Services to Reduce Substation Wiring", 2010, Switzerland
- [21] G. Antonova, L. Frisk, J.C. Tournier, "Communication Redundancy for Substation Automation", 2011, IEEE
- [22] HSR pilt, <http://www.processonline.com.au/content/industrial-networks-buses/article/redundancy-in-industrial-networks-part-2-712482703>, [WWW], kasutatud 05.05.2017
- [23] PRP pilt, <http://www.flexibilis.com/technology/parallel-redundancy-protocol-prp/>, [WWW], kasutatud 05.05.2017
- [24] RSTP pilt, <https://tinyurl.com/mn84d7z> ,[WWW] kasutatud 05.05.2017
- [25] A. Mazikas, Elektrilevi OÜ "Piirkonna- ja jaotusalajaamade fiidriterминаalide nõuded", 2016, Tallinn
- [26] F. VOLBERDA, S. VAN LOON, F. BALDINGER, M. VAN RIET, "CHALLENGE OF MANAGING ORGANISATIONAL CHANGES, NECESSARY FOR NEW SUBSTATION AUTOMATION SYSTEMS", 2009, CIRED, 20th International Conference on Electricity Distribution

- [27] Farias, V. S. , Fernandes, N. C., "Life Cycle Cost Analysis of Substation Automation Implementation",2014, IEEE
- [28] U.B. Anombem, H.Y. Li, P. Crossley, R. Zhang, C. McTaggart"Process bus architectures for substation automation with life cycle cost consideration", 2005, IEEE
- [29] SSE, Locamation SASensor High-Medium Voltage (HMV) Primary substation protection at Caputh substation, 2013
- [30] F. Baldinger, O. Mansour, B. Almgren, B. Almer,"OPEN PLATFORM FOR PROTECTION, MONITORING AND CONTROL FOR OPTIMAL FLEXIBILITY IN GRID OPERATION", CIRED, Paper 328, 2014
- [31] CCU600 Series, Central Control Unit manual, 2015, Locamation
- [32] VCU 100 Series, Versatile Communication Unit manual, 2013, Locamation
- [33] BIM 640 Series,Breaker Interface Module manual, 2013, Locamation
- [34] VIM 620 Series, Voltage Interface Module manual, 2013, Locamation
- [35] CIM 630 Series, Current Interface Module manual, 2015, Locamation
- [36] V300F\_M/en M/A009, VAMP 300F, User manual, Schneider-Electric, 16.03.2017
- [37] Data Concentrator TELEM-GW6e User manual, 2013, Martem AS
- [38] RuggedSwitch® RS900, 9-Port Managed Ethernet Switch with Fiber Optical Uplinks, 128-bit Encryption, Siemens, Brošuur
- [39] SASensor Measurements manual, Locamation, 2015
- [40] SASensor manuals, Applications: Digital Fault Recording manual, Locamation, 2010
- [41] SASensor manuals, IEC60870-5-104 Slave manual, Locamation, 2013
- [42] T. Gu., F. Provoost "IMPROVING NETWORK PERFORMANCE BY RECOGNITION AND LOCATION OF SELF-EXTINGUISHING FAULTS", CIRED, 2013, Stockholm
- [43] B. A. Siddiqui, P. Pakonen, P. Verho "Novel Inductive Sensor Solutions for On-line Partial Discharge and Power Quality Monitoring", 2017, IEEE, Tampere

# Lisad

## L.1. Küsimustiku eesti keelse variandi küsimused

1. Millised on Elektrilevi probleemid alajaamade digitaliseerimisel?
2. Kuidas saab kasutada kõrge resolutsiooniga mõõteandmed AJ 808-st Elektrilevi OÜ huvides? Kuidas planeeritakse kasutada kõrge resolutsiooniga mõõteandmeid tulevikus?
3. Milline on Elektrilevi nägemus ressursikulust alajaamaga 808 sarnase alajaama konfigureerimiseks ja seadistamiseks?
4. Kuidas muutus fiidrite vahelise suhtlemise kiirus võrdlemisi hajutatud süsteemi *GOOSE* sõnumitega? (kui sellised eksperimendid olid tehtud)
5. Millised on olnud tavapäraste *IED*-ede kõige sagedasemad vead ja probleemid? Mis tekitab vigade korral kõige rohkem kulutusi?
6. Millised oleksid olnud aj. 808 töömahud tavapärase süsteemi kasutamise korral; vaskkaabeldus, optiline kaabeldus, paigaldustööd jms võrreldes tsentraliseeritud lahendusega?
7. Kuidas saab hinnata 808-alajaamas oleva tsentraliseeritud kaitse ja automaatika lahenduse hoone pindala kasutamist?
8. Millised AJ 808 tsentraliseeritud automaatika ja releekaitse süsteemi iseärasusi võib märkida kasulikuks ja tulevikukindlaks?
9. Mis on AJ 808 tsentraliseeritud automaatika ja releekaitse süsteemi puudujäägid Elektrilevi OÜ seisukohalt? Miks?
10. Kuidas muutus alajaama 808 juhitavus ja jälgitavus pärast *SASensor*®-i paigaldamist?
11. Kas on lähitulevikus võimalik stsenaarium, mille käigus üks piirkonnalajaam juhib 3-4 jaotusalajaama, mis koordineerivad linnaosa madalpingevõrku ning dispetšer vaid jälgib, et automaatika ja arvutid töötaksid õigesti? Kui jah, siis kuidas võiks tsentraliseeritud kaitse ja automaatika süsteem olla kasutatud antud stsenaariumi realiseerumisel Elektrilevi OÜ arvamusel?
12. Milliseid releekaitse- ja automaatikafunktsioone sooviks Elektrilevi täna ja tulevikus oma alajaamades piirangutevabas olukorras kasutada?