



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
ELEKTROENERGEETIKA INSTITUUT

# **Elektrituuliku seisundi reaalajajälgimissüsteem ja selle rakendused**

**Elektroenergeetika õppekava**

**Energiasüsteemide õppetool**

**Magistritöö**

Õppetooli juhataja            prof    H. Tammoja

Juhendaja                        dots    J. Kilter

Lõpetaja                            T. Sarnet

**Tallinn 2015**

# **Autori deklaratsioon**

Deklareerin, et käesolev lõputöö, mis on minu iseseisva töö tulemus, on esitatud Tallinna Tehnikaülikooli elektroenergeetika instituudile haridusastme lõpudiplomi taotlemiseks elektroenergeetika erialal. Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

Lõpetaja (allkiri ja kuupäev) \_\_\_\_\_

# Lõputöö kokkuvõte

Autor: **Taavi Sarnet**

Lõputöö liik: **Magistritöö**

Töö pealkiri: **ELEKTRITUULIKU SEISUNDI REAALAJAJÄLGIMISSÜSTEEM JA SELLE RAKENDUSED**

Kuupäev:

84 lk

Ülikool: **Tallinna Tehnikaülikool**

Teaduskond: **Energeetika**

Instituut: **Elektroenergeetika**

Õppetool: **Energiasüsteemid**

Töö juhendaja(d): **dotsent Jako Kilter**

Töö konsultant (konsultandid): -

*Sisu kirjeldus:*

Elektrituulikute arvu kasv ja nende seadmete keerukuse kasv mõjutab oluliselt elektrituulikute ja tuuleelektrijaamade opereerimisele esitatavaid nõudeid. Kaugjälgimine ja kogutud andmete reaalsajale lähenev analüüs on muutumas üha tähtsamaks tuuleenergeetika sektori tulemuslikkuse parandamisel.

Käesolev töö toetub teemakohaste kirjandusallikatele, millised käsitlevad elektrituulikute reaalsajajälgimist ning erinevate reaalsajajälgimissüsteemide arhitektuurilahenduste ja nende praktikas kasutatavuse analüüsidele. Töö sisaldab elektrituulikute informatsiooni süsteemide arhitektuuri võrdlust, sisaldades näiteid erinevate allsüsteemide modelleerimisest ja erinevatest informatsiooni tasemetest tüüpidest ja kasutatavatest sideprotokollidest. Töös on kirjeldatud kuidas elektrituuliku tootja poolt tarnitud tarkvara toetab ja ühildub reaalsajajälgimissüsteemiga.

Magistritöö tähtsaimaks osaks on autori poolt koostatud lahendus reaalsaja jälgimissüsteemi jaoks. Lahendus võimaldab kombineerida ja integreerida erinevate tootjate elektriseadmeid ühe süsteemi piires. Samuti on koostatud lahendus andmete kogumise ja säilitamise kohta ning esitatud on informatsioon kuidas sellised süsteemid saavad praktikas töötada.

Töö raames on koostatud süsteemi kasutajaliides ning magistritöös on kirjeldatud selle võimalusi ja analüüsitud selle sobilikust operaatori poolelt vaadatuna. Analüüsitud on sealhulgas kasutajaliidest erinevatel informatsiooni hierarhilistel tasemetel ja kasutajaliideste erinevaid funktsioone. Täiendavalt käsitletakse töös süsteemi kaudu rikete avastamiseks ja vajadusepõhise hoolduse planeerimiseks kogutud andmete analüüsi erinevaid aspekte.

Käesolev töö näitab võimalusi operatiivjuhtimisesüsteemi kaudu kogutud ajalooliste andmete rutiinseks analüüsiks ja esitab näiteid kuidas elektrituulikute modelleerimine erinevate meteoroloogiliste- ja tootmisestsenariumite jaoks on paljulubav võimalus elektrituulikute vigade varajaseks avastamiseks ja seisakute vältimiseks.

*Märksõnad:* elektrituuliku reaalsajajälgimissüsteem, elektrituulikute operaatori kasutajaliidese arhitektuur, elektrituulikute modelleerimine

# Summary of the diploma work

<i>Author:</i> <b>Taavi Sarnet</b>	<i>Kind of the work:</i> <b>Master thesis</b>
<i>Title:</i> <b>REAL-TIME WIND TURBINE CONDITION MONITORING SYSTEM AND ITS APPLICATIONS</b>	
<i>Date:</i>	<i>84 pages</i>
<i>University:</i> <b>Tallinn University of Technology</b>	
<i>Faculty:</i> <b>Power Engineering</b>	
<i>Department:</i> <b>Electrical Power Engineering</b>	
<i>Chair:</i> <b>Power systems</b>	
<i>Tutor(s) of the work:</i> <b>Associate professor Jako Kilter</b>	
<i>Consultant(s):</i> -	
<i>Abstract:</i> <p>Increase in the number of wind turbines and wind power equipment complexity significantly affects the requirements for operation of wind turbines and wind power plants. Remote monitoring and near real-time analysis of the collected information, and the resulting early detection and prevention of the faults becomes increasingly important to improve the performance of the wind energy sector.</p> <p>The main part of this research focuses on analysis and comparison of the relevant literature on wind turbine real-time monitoring, on the analysis of different architectural solutions of real-time monitoring systems and their suitability in practice. The work provides a comparison of information systems architectures for wind turbines, including a description of examples for modeling different subsystems, and the types and levels of information and protocols available for communication.</p> <p>The most important part of the master's thesis is the author's solution to the monitoring system in real time. The solution allows combining and integrating the electrical equipment from different manufacturers in a single system. Author has also composed a solution for data collection and storage. Thesis also includes information and an assessment on how such systems will work in practice.</p> <p>Within the framework of the thesis a user interface is designed, and its capabilities are described and the suitability is analyzed from the point of view of the operator. Thesis also includes an analysis on user interface at different hierarchical levels of information as well as includes various features and user interfaces.</p> <p>Additionally, the work covers the topic of system failure detection, and analysis of the data collected concerning the various aspects of actual operator needs - maintenance planning.</p> <p>This work shows perspectives for routine analysis of historical data, collected through wind power plant SCADA system, and gives examples of how the modeling of wind turbines for different weather scenarios and production scenarios of wind turbines is a promising option for the early detection of errors and prevention of turbine downtime.</p>	
<i>Key words:</i> real-time monitoring system of wind turbine, operator interface architecture of wind turbines, modeling of wind turbine	

# Sisukord

Lõputöö ülesanne.....	6
Eessõna .....	9
Sissejuhatus .....	10
<b>1. Reaalajajälgimissüsteemide arhitektuurid .....</b>	<b>14</b>
1.1. Dispetšjuhtimissüsteemi andmed .....	16
1.2. Elektrituuliku kommunikatsiooni võimekus .....	19
1.3. Sideprotokollid .....	21
1.3.1. Jaotatud võrgu protokoll ( <i>DNP 3.0</i> ).....	22
1.3.2. <i>IEC 60870-5</i> .....	24
1.3.3. <i>OPC</i> .....	26
1.4. Elektrituuliku seisundi reaalajajälgimissüsteemi arhitektuuri võimalike alternatiivide analüüs .....	28
1.5. Operatsioonisüsteemide näited .....	29
1.5.1. <i>Nordex NC2 süsteem</i> .....	29
1.5.2. <i>Enercon remote monitoring</i> .....	31
<b>2. Erinevate tehniliste omadustega elektrituulikute jälgimiseks sobiva reaalajajälgimissüsteemi valik .....</b>	<b>32</b>
2.1. Süsteemi ülevaade .....	33
2.2. Liidesed .....	35
2.3. Server .....	38
2.4. Reaalajajälgimissüsteemi kasutajaliides.....	40
2.4.1. <i>Visualiseerimine</i> .....	42
2.4.2. <i>Automatiseerimine</i> .....	44
<b>3. Reaalajajälgimissüsteemi andmete kasutamise meetoodika .....</b>	<b>46</b>
3.1. Informatsiooni mudel .....	47
3.2. Normaalrežiimi ja osalise töörežiimi määramine .....	50
3.3. Elektrituuliku potentsiaalse väljundi modelleerimine.....	52
3.4. Elektrituuliku võimsuskõvera arvutusfunktsiooni koostamine.....	56
3.5. Teised operatiivset tööd kajastavad kõverad ja mõõdetavate parameetrite võrdlused ....	63
3.6. Informatsiooni mudelit kasutades vea leidmise näited.....	66
3.6.1. <i>Anemomeetrite vigade leidmine</i> .....	67
3.6.2. <i>Erinevad laba nurga muutmise seaded</i> .....	68
3.6.3. <i>Jahutussüsteemi rikkest tekitatud võimsuspiirang</i> .....	70
3.6.4. <i>Laagri temperatuuri tõus</i> .....	72
3.6.5. <i>Sensori vigade leidmine ja parameetri muutumiskiirus</i> .....	73
3.6.6. <i>Gondli suuna vigade leidmine</i> .....	74
3.7. Informatsiooni mudeli kasutamine .....	75
Lõputöö kokkuvõte.....	78
Kasutatud kirjandus .....	82

# Lõputöö ülesanne

Lõputöö teema: *Elektrituuliku seisundi reaalarajajälgimissüsteem ja selle rakendused*

Üliõpilane, üliõpilaskood: Taavi Sarnet, 121829AAVM

Lõputöö juhendaja, õppetool: dotsent Jako Kilter, Energiasüsteemid

Õppetooli juhataja: professor Heiki Tammoja

Lõputöö esitamise tähtaeg: 27.05.2015

---

Üliõpilane (allkiri)

---

Juhendaja (allkiri)

---

Õppetooli juhataja (allkiri)

## 1. Teema põhjendus

Tuuleelektrijaamade süsteemselt korraldatud ja elektrituulikute tegelikku tehnilist seisundit arvestavast hooldusest sõltub tuuleelektrijaamade kogutoodang ja saadav kasum. Pidev rutiinne andmete kogumine ja analüüsimine võimaldab avastada põhjuseid, mis takistavad elektrituulikutel saavutada maksimaalset toodangut ning planeerida elektrituulikute hooldust ja ennetavat remonti seisundipõhiselt vähendades avariilisi seiskumisi ja remondikulu.

Teema on eriti oluline ja aktuaalne seonduvalt tuuleelektrijaamade toetuste vähenemisega ja seetõttu on vajalik rakendada kõiki võimalusi tuuleelektrijaamade efektiivsuse tõstmiseks.

Lõputöös analüüsitakse elektrituulikute seisundi reaalarajajälgimissüsteemi võimalikke alternatiivseid arhitektuure mitme erineva elektrituulikute tootja generaatoritega tuuleelektrijaamade kombineeritud süsteemis, et leida parim lahendus erinevate tuuleelektrijaamade ühtseks operatiivjuhtimiseks.

## 2. Töö eesmärk

Töö eesmärgiks on elektrituulikute seisundi reaalaraja jälgimissüsteemi võimalike alternatiivsete arhitektuuride võrdluse ning tulemuste analüüsi põhjal erinevate tehniliste omadustega tuuleelektrijaamade ühtseks juhtimiseks sobiva reaalaraja jälgimissüsteemi arhitektuuri leidmine ja selle rakendusvõimaluste hindamine.

### **3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:**

- Milline reaalaja jälgimissüsteemi arhitektuur sobib erinevate tehniliste omadustega elektrituulikute jälgimiseks?
- Kuidas saadavaid andmeid rakendada tuuleelektrijaamade operatiivjuhtimises?
- Kuidas kasutada saadavaid andmeid vigade otsimiseks ja mitteplaaniliste seiskumiste ennetamiseks?

### **4. Lähteandmed**

Eesmärkide saavutamiseks ja küsimuste lahendamiseks kasutakse erialakirjandust, elektrituulikutootjate tehnilisi dokumente ja avaldatud uurimistöid operatiivjuhtimise ja reaalaja jälgimissüsteemide valdkonnas. Lisaks kogutakse teemakohased andmed elektrituulikute haldjatelt.

### **5. Uurimismeetodid**

Töö tulemuseni jõutakse kirjanduse analüüsi, vaatluse ja võrdleva analüüsi põhjal. Andmete analüüsimiseks kasutakse tabelarvutust, valemeid ja suurtele andmebaasidele kohaldatud statistilisi meetodeid.

### **6. Graafiline osa**

Lõputöö graafilise osa moodustavad töö põhiosas esitatud teksti illustreerivad joonised.

### **7. Töö struktuur**

Planeeritav töö struktuur:

- a. Sisukord
- b. Lõputöö ülesanne
- c. Eessõna
- d. Sissejuhatus
- e. Tulemused
  - i. Kirjanduse ülevaade
  - ii. Erinevate reaalajajälgimissüsteemide arhitektuuride kirjeldused
  - iii. Elektrituuliku seisundi reaalaja jälgimissüsteemi arhitektuuri võimalikke alternatiivide analüüs
  - iv. Erinevate tehniliste omadustega elektrituulikute jälgimiseks sobiva reaalaja jälgimissüsteemi valik

- v. Reaalaja jälgimissüsteemiga kogutud andmete kasutamise võimaluste kirjeldused tuulelektrijaamade operatiivjuhtimisel
- vi. Reaalaja jälgimissüsteemi andmete kasutamise meetodika väljatöötamine elektrituuliku võimalike vigade otsimiseks ja mitteplaaniliste seiskumiste ennetamiseks
- f. Kokkuvõte
- g. Kasutatud kirjandus
- h. Lisad

## **8. Lõputöö konsultandid**

-



## Eessõna

Käesoleva magistr töö teema valis töö kirjutaja konsulteerides juhendajaga. Teema valik on oluliselt mõjutatud autori viie aasta pikkusest töökogemusest taastuvelektrienergia tootmise ettevõttes. Konkreetne uurimistöö teema tulenes autori soovist analüüsida kaugjälgimissüsteemi kaudu kogutava elektrituulikute süsteemi parameetreid ja väljundinformatsiooni eesmärgiga seda kasutada elektrituulikute töö optimeerimiseks arvestades nii kaugjälgitavate elektrituulikute koostöö võimalusi kui ka elektrituru muutuvaid tingimusi. Analüüs on tehtud elektrituulikute operaatori vaatepunktist, oluline probleem kaugjälgitavate ja kaugjuhitavate elektrituulikute töö optimeerimisel on erinevate elektrituulikute tootjate erinevas vormis informatsiooni ühilduvuse saavutamine standardsete analüüsi meetodite kasutamise tarvis. Soovin tänada oma magistr töö juhendajat Jako Kilterit professionaalse juhendamise, mõistva suhtumise eest, tänu millele on käesolev töö valminud.

Taavi Sarnet

Tallinn Raua 1-3

Taavi67@hotmail.com

56757382

## Sissejuhatus

Elektrituulikud toodavad elektrienergiat muundades tuule energiat mehaaniliseks energiaks ning käitades seeläbi elektrigeneraatorit. Tulenevalt asjaolust, et tuule energia ei ole ajas konstantne suurus ning lühikeses ajaperioodis puudub ka võimalus tuule kiirust ja atmosfääri parameetreid piisavalt täpselt prognoosida, ei ole võimalik saavutada tuulest elektritootmise soovitatavat stabiilsust ilma täiendavate informatsiooni kogumise ja töötlemise ning kaugjuhtimise meetmeteta. Tulenevalt tuule kui energiaallika varieeruvusest on vajalik elektrituulikute stabiilseks tööks ning efektiivse energiatootmise tagamiseks rakendada rohkem kiiresti ja paindlikult reageerivaid juhtimissüsteeme kui seda on vaja konventsionaalseid energiaallikaid kasutavate tehnoloogiate juures. Kuna elektrituulikud on rajatud sageli inimasustusest kaugesse asukohtadesse, kus tuule energia ressurs on piisavalt suur elektrituulikute efektiivseks tööks, siis elektrituulikud on projekteeritud töötama autonoomsete juhtimissüsteemidega. Iga suurte elektrituulikute hulka kuuluv elektrituulik on projekteeritud ise olema võimeline juhtima enda laba kaldenurka, gondli pöördenurka ja määrama kas keskkond elektrituuliku ümber on sobilik elektrienergia tootmiseks, selleks vajavad elektrituulikud paljudest keerukatest osadest koosnevaid mõõte- ja juhtimissüsteeme.

Elektrituulikute enamasti suur kaugus inimasustuse keskustest ja vajadus kiiresti reageerida tekkivatele tehnilistele probleemidele toob kaasa vajaduse elektrituulikute kaugjälgimiseks. Tuuleturbiinide süsteemselt korraldatud ja tuulikute tegelikku tehnilist seisundit arvestavast hooldusest sõltub nende kogutoodang ja saadav kasum. Pidev rutiinne andmete kogumine ja analüüsi läbiviimine tuuleturbiini reaaliajajälgimissüsteemi võimalusi kasutades annab efektiivse täiendava võimaluse avastada need põhjused, mis takistavad tuuleturbiinil saavutada maksimaalset kogutoodangut ning korralise ja erakorralise hooldusvajaduse planeerimise kaudu vähendada remondikulu ja seisakuaegu.

Elektrituulikute tootjate poolt arendatud dispetšjuhtimissüsteemid on spetsiaalselt nende seadmete jaoks mõeldud süsteemid, mis erinevad üksteisest nii andmemahtude poolest, mida süsteemis võib kasutada kui ka rakenduste poolest, mida süsteemis kasutada saab. Näiteks on operaatorile tihti kasutatavaks tehtud ainult töödeldud andmed nagu 10 minuti ja ühe tunni keskmised andmed ning nende juurde lisanduvad parameetrite ekstreemum väärtused. Sellistel andmed ei anna süsteemi kohta edasi kogu võimalikku informatsiooni ja seetõttu ei ole kasutatavad paljudes rakendustes ja nende kaudu tehtavates analüüsides. Elektrituulikute tootjate lähenemine süsteemi rakenduste arendusse võib oluliselt erineda. Süsteemi võib mõeldud olla ainult operatiivseks juhtimiseks ehk süsteem annab edasi viimased veateated, reaalaaja andmed

ning ei paku võimalusi andmete analüüsiks. Isegi siis kui süsteem põhimõtteliselt võimaldab analüüsi võib andmete kättesaadav ja realselt kasutatav maht olla piiratud elektrituulikusse paigaldatud mäluseadmete mahuga, mis võib kaasa tuua olukorra et analüüsiks kasutatav andmete maht on piiratud mõne viimase kuuga.

Elektrituuliku operaatori reaalaajajälgimissüsteem ja selle juurde lisatavad analüüsi rakendused on lahendus, mis suudab ühtsesse reaalaajajälgimissüsteemi ja planeerimissüsteemi ning veadiagnostikasüsteemi ühendada erinevate elektrituulikute tootjate erinevate tehniliste lahendustega seadmed.

Uurimistöö eesmärk on välja pakkuda lahendus tuuleelektrijaamade gruppide reaalaajajälgimissüsteemi jaoks koos selle juurde käivate andmeanalüüsi rakendusega. Kirjeldatud reaalaajajälgimissüsteem on kasutatav tuuleelektrijaamade operaatorite poolt, selle eeliseks on võimekus jälgida tuuleelektrijaamu nende erinevatel hierarhia tasemetel sealhulgas gruppide tasemel, võimekus toetada vajadusepõhist hoolduse planeerimist, võimekus toetada toodangu planeerimist ning toetada ajalise järgnevuse registreerimisega automatiseeritud teavitus- ja raporteerimise süsteemi. Elektrituulikute reaalaajajälgimissüsteemi peamiseks arendamise vajaduseks ja stiimuliks on elektrituuliku tootjate poolt pakutava erineva tarkvara ühes süsteemis tööle rakendamise keerukus kuigi see on vältimatult vajalik elektrituulikute operaatorite efektiivseks tööks. Näiteks kolm erinevat süsteemi, mis on vajalikud elektrituulikute operatiivtöö korraldamiseks on dispetšjuhtimissüsteem, hoolduste planeerimise süsteem ja toodangu prognoosimise süsteemi, nende süsteemid vajavad pidevat omavahelist infovahetust ja integreeritust, et kõik süsteemid töötaks sama informatsiooni alusel ja paljusid tegevusi oleks võimalik automatiseerida.

Kasutades kumuleeruvalt analüüsitud ja kiiresti kättesaadavat tsentraalselt ajaloolist ülevaadet on võimalik oluliselt efektiivsemaks muuta hoolduste planeerimist ja elektrituulikute operatiivset efektiivsust. Osa tuuleelektrijaamade hoolduse informatsioonist on veel raskesti kättesaadavas vormis erinevates arvutifailides või isegi paber kandjatel ning pole seetõttu kiiresti leitav ega operaatori töös kasutatav, seetõttu on võimalikult kiire kaugjälgimissüsteemi kaudu kogutava informatsiooni analüüsi süsteemi arendamine oluline võimalus elektrituulikute opereerimise efektiivsuse parandamiseks. Elektrituulikute toodangu planeerimine on paljudest ajas muutuvatest faktoritest sõltuv keeruline protsess, mille efektiivsuse tõstmiseks läheb vaja ajakohast sisendinformatsiooni elektrituuliku dispetšjuhtimissüsteemist, mis annab edasi hetkevead ja efektiivse tagasiside puhul ka hinnangulised ajad vigade lahendamiseks ja elektrituulikute töö taastumiseks ja hoolduse planeerimise süsteemist, mis annab edasi planeeritud suuremad tööd nii elektrituulikute kui elektrivõrgu osas. Lisainformatsiooni on vaja

kaasata süsteemivälistest allikatest, näiteks metrooloogilistest süsteemidest. Ühine teavitussüsteem võimaldab erinevatel süsteemi kasutajatel operatiivselt ja efektiivselt koostööd teha. Ühine teavitussüsteem peab võimaldama operaatoril reaalajas teada saada, et elektrituuliku parameeter on väljaspool lubatud piire või on elektrituulik seiskunud, kui saama pidevalt ajakohastuva hooldusplaani ja toodangu prognoosi plaani vaate. Jooksvalt ajakohastuv teavitussüsteem tuuleenergeetika alal vajalik, kuna ilmastiku olude muutused võivad iga päeva plaani oluliselt muuta. Näiteks suurema tuule kiirusega päev võib tähendada, et plaanitud hooldust ei saa sellel päeval läbi viia ning see asjaolu peaks kajastuma koheselt uues toodangu prognoosis.

Elektrituulikute seisundi ja töö raporteerimiseks on samuti vaja informatsiooni eelnimetatud süsteemidest, millele lisandub informatsioon väljastpoolt, sellise informatsiooni näiteks on elektrituru informatsioon. Erinevatest süsteemidest eraldi informatsiooni kogumisel ja töötlemisel kaasneb oluline aja ja muude ressursside kadu ning, reaalajajälgimissüsteemi rakenduste läbi loodud, ühine süsteem saab paljud probleemid ära hoida või nende mõju vähendada. Üheks erinevatest süsteemidest eraldi informatsiooni kogumisest tuleneva probleemi näiteks on informatsiooni aegade sünkroniseerimine, teine suurem probleem elektrituulikute andmete raporteerimise juures on erinev andmete töötlemise lahendus erinevate elektrituulikute tootjate süsteemides. Näiteks võib kasutatavate suuruste, nagu kasutatavustegur, sisu tootjate vahel erineda ning väärtuste hilisem ühtlustamine võib olla aeganõudev ja raskendatud. Erinevatest süsteemidest eraldi informatsiooni kogumise probleemiks saab lugeda selge ülevaate puudumist kuidas elektrituuliku tootja süsteemi sees andmete töötlemine toimub.

Kasutades elektrituulikute kogutavaid ajaloolisi andmeid saab elektrituulikuid modelleerida ja võrreldes neid reaalajajälgimise andmetega on võimalik jooksvalt hinnata erinevate elektrituulikute tööd. Reaalajajälgimissüsteemi, ajalooliste andmete alusel läbiviidud modelleerimise ja andmete kiire keske analüüsi kaudu, rakendades kaugjuhtimissüsteemi ja hooldusmeeskondade kiiret teavitamist, on oluliselt võimalik parandada elektrituulikute ja tuuleelektrijaamade sooritusvõimet.

Uurimistöö seletuskiri on jaotatud viieks alajaotuseks, milles käsitletakse põhjalikult elektrituulikute reaalajajälgimissüsteemi ning mõõdetud andmete rakendamist.

Käesoleva uurimistöö esimene peatükk käsitleb täpsemalt elektrituulikute reaalajajälgimissüsteemide põhjalikumalt tutvustust, millega antakse ülevaade valdkonnas kasutatavatest dispetsjuhtimissüsteemidest. Lisaks süsteemide üldisele ülevaatele vaadeldakse elektrituulikute kommunikatsiooni võimekust ning nendest kogutavat informatsiooni olemust.

Täpsemalt kirjeldatakse kommunikatsiooni süsteeme, mis on oluliseks osaks dispetšjuhtimissüsteemides ning valdkonnas laialdasemalt kasutatavatest standarditest.

Teises peatükis kirjeldatakse elektrituuliku tootjast sõltumatu reaaliajajälgimissüsteemi valikul olulisi põhimõtteid ning süsteemile vajalike eeldus omadusi. Arutelu käigus selgitatakse serverite ning andmeside standardeid ning nende valiku mõju süsteemi universaalsusele. Täpsemalt kirjeldatakse süsteemi liideste ülesehitust ja nende talitus põhimõtteid, serveritele ning kasutajaliidestele esitatud nõudeid.

Kolmandas peatükis kirjeldatakse reaaliajajälgimissüsteemist saadavate andmete töötlus metoodikaid ning pakutakse välja lahendused, kuidas efektiivselt töödelda andmeid elektrituulikute seisundite hindamiseks sobivale kujule. Arutelu käigus antakse ülevaade kasutatavatest informatsiooni mudelitest ning nende rakendamisest andmete töötlemisel. Põhjalikumalt kirjeldatakse elektrituuliku talitus režiimi määratlemist ning mõõtmistulemuste ja informatsiooni mudeli põhjal elektrituuliku estimateeritud väljundi modelleerimist. Pakutakse välja metoodika elektrituuliku võimsuskõvera arvutusfunktsiooni koostamiseks ning kirjeldatakse selle rakendamist reaalsete mõõtmistulemuste põhjal. Lisaks kirjeldatakse elektrituuliku seisundi hindamise metoodikaid teiste mõõdetavate parameetrite võrdlemisel. Täpsemalt käsitletakse koostatud informatsiooni mudeli rakendamist elektrituulikute tulemuslikkuse indikaatorite määratlemisel, mille käigus kirjeldatakse vastavaid indikaatoreid ning nende arvutusmeetodeid.

Uurimistööks kogutud spetsiifilised algandmed, kirjandus ning süsteemi kirjeldused on kogutud autori poolt antud valdkonnas töötamise vältel. Valdav osa artiklitest pärinevad interneti andmebaasidest, millele autoril oli ligipääs Tallinna Tehnikaülikooli veebiportaalide kaudu.

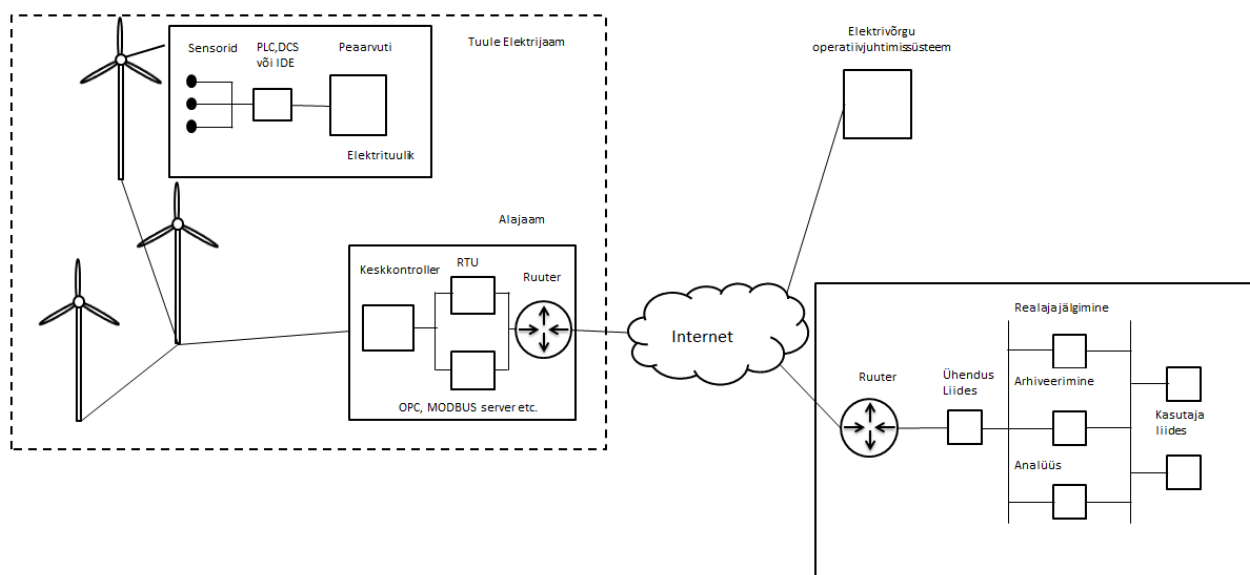
# 1. Reaalajajälgimissüsteemide arhitektuurid

Elektrituuliku dispetšjuhtimissüsteemi ehk SCADA (*supervisory control and data acquisition system*) lühend viitab telemeetria ja andmehõive süsteemi kasutamisele, mille töö käigus kogutakse informatsiooni läbi kaugterminaalide, edastatakse antud informatsioon tsentraalsesse süsteemi, viiakse läbi andmete kontroll ja analüüs ning seejärel esitatakse see sobival kujul operaatorile. Vajalikud juhtimiskäsud edastatakse tagasi kontrollitavasse protsessi.

Täpne ja õigeaegne informatsioon võimaldab optimeerida elektrituuliku tööd ja operatiivselt juhtida erinevaid protsesse. Protsesside operatiivse juhtimise ja optimeerimise võimalus omakorda võimaldab luua efektiivsema, töökindlama ja ohutuma süsteemi, mille kaudu on võimalik oluliselt vähendada kulusid. Elektrituulikute dispetšjuhtimissüsteemid on ülesehituselt mitmetasemelised:

- Elektrituulikute juhtimise tase
- Tuuleelektrijaama juhtimise tase
- Kommunikatsiooni tase
- Tsentraalse võrgu juhtimise tase
- Reaalaja juhtimise ja jälgimise tase

Joonis 1.1 kujutab mitme tasemelist tuuleelektrijaama dispetšjuhtimissüsteemi skeemi.



Joonis 1.1 Tuuleelektrijaama dispetšjuhtimissüsteemi skeem.

Iga moderne elektrituulik on juhitud elektrituulikust endast, kus on tavaliselt dispetšjuhtimissüsteemi programm, mida saab kasutada elektrituuliku reaalajas töö jälgimiseks ja

parameetrite muutmiseks, vastavalt vajadusele. Kui tegemist on mitmest elektrituulikust koosneva tuuleelektrijaamaga, siis koondatakse elektrituuliku juhtimine kesksesse juhtimisseadmesse, mis võimaldab nende ühist efektiivset juhtimist. Näiteks võrgu juhtimissüsteemi poolsed käsud reaktiiv- ja aktiivvõimsuse juhtimiseks on võimalik jaotada elektrituulikute vahel vastavalt vajadusele ning seeläbi vähendada võimsuskadusid, võrreldes olukorraga kui vastavad korraldused täide viia iga elektrituuliku juhtimissüsteemis eraldi.

Elektrituuliku ja tuuleelektrijaama seisundi informatsioon tehakse kaugjuhtimiseks keskselt kättesaadavaks läbi erinevate kommunikatsiooni protokollide nagu IEC 61400-25, IEC 60870 ja seadmete nagu kaugterminal, OPC server jne. Kommunikatsioonide kaudu võidakse seisundiinformatsiooni jagada ka mitme osapoole vahel, sealhulgas võivad nendeks seisundiinformatsiooni tarbijateks olla elektrituulikute operaatorid ja võrgu operaatorid.

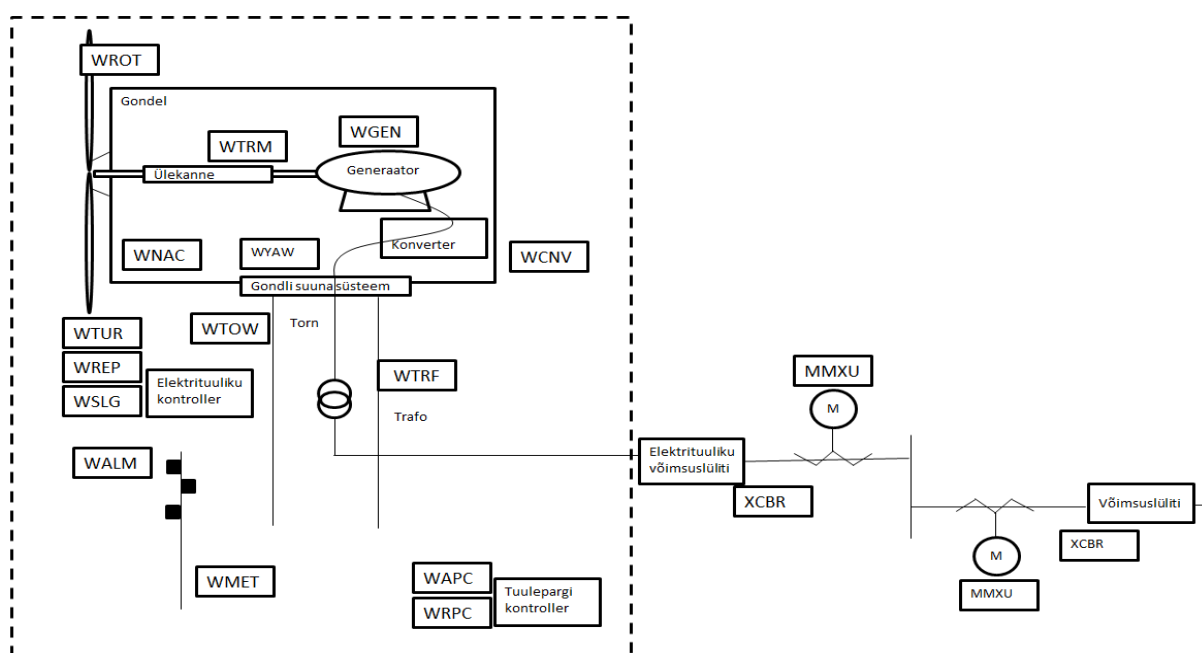
Tsentraalse juhtimise tase on elektrituulikute kaugjuhtimine, mille eesmärk võib olla erinev vastavalt sellele kes seda korraldab. Elektrituulik, nagu kõik võrguga ühendatud elektrienergia tootmiseseadmed, peab alluma võrguoperaatori juhtimiskäsklustele, mille eesmärk on avariiliste olukordade vältimine ja likvideerimine võrgus.

Reaalajajuhtimissüsteem koosneb tuuleelektrijaama kaugjuhtimissüsteemist, mille kaudu juhitakse tuuleelektrijaamade tööd kaugelt ja sekkutakse juhul kui on vaja likvideerida avastatud vead kas kaugelt, kui see on võimalik või antakse välja erakorraline töökäsk objekti lähedal asuvale hooldusmeeskonnale. Reaalajajälgimissüsteemi teine osa on informatsioonisüsteem, mis koosneb andmete kogumise, arhiveerimise ja analüüsi tasemest. Erinevalt elektrituuliku kaugjuhtimissüsteemist on selle taseme ülesanne jälgida elektrituuliku parameetrite muutust ajas, leida elektrituulikute süsteemist vigu, prognoosida elektrituulikute toodangut ja arvestades avastatud normist kõrvalekaldeid planeerida erakorralisi ja korralisi hooldustöid. Sellist süsteemi kasutavad elektrituulikute operaatorid, kes omavad tootjatega täishoolduse teenust, mille puhul elektrituulikute kaugjuhtimine toimub keskest kontrollkeskusest. Elektrituulikute operaatoritel on sellegi poolest parimate tulemuste saamiseks vaja lisaks ka omapoolseid süsteeme elektrituulikute seisundi analüüsimiseks ja tootmise planeerimiseks.

Elektrituuliku reaalajajälgimissüsteemi informatsioon on väärtuslik ressurss, mida operaatorid saavad jälgida, registreerida informatsioonis ilmnevaid seoseid ja seeläbi optimeerida elektrituulikute tööd kohese sekkumise ja pikemaajalise süsteemi optimeerimise kaudu. Andmete efektiivseks töötlemiseks on vajalikud erinevad andmete analüüsi ja töötlemise programmid, millised saavad anda ülevaatliku pildi elektrituuliku andmete struktuurist ja tähendusest.

## 1.1. Dispetšjuhtimissüsteemi andmed

Suurtel elektrituulikutel kasutatakse standardseid dispetšjuhtimissüsteeme ja samad süsteemid koguvad andmeid nii ühe elektrituuliku kohta, kui ka kogu tuuleelektrijaama kohta üldistatuna. Dispetšjuhtimissüsteem hindab elektrituulikute ja nende alamsüsteemide seisundeid kasutades sisenditena elektrituulikule asetatud sensoreid nagu anemomeeter, termopaar ja erinevad lülitid. Dispetšjuhtimissüsteem tavaliselt töötleb sisendandmeid ja muudab need kasutamiskõlblikeks ja enamasti suhteliselt madal tihedusega andmeteks. Näiteks sensorite hetkeväärtustest tuletatakse 10 minuti keskmised ja perioodi sisesed maksimaalsed ja minimaalsed väärtused.



Joonis 1.2 Elektrituuliku komponentide informatsiooni mudel [1].

Joonisel 1.2 on kujutatud elektrituuliku mudel ja standardi kohaselt kogutavad komponentide andmed läbi vastavate loogikasõlmede.

Elektrituuliku komponendid on tehnilised süsteemid, mida kasutatakse elektrituuliku töös. Elektrituuliku komponendid võivad koosneda omakorda erinevatest alamkomponentidest, üldjuhul kogutakse dispetšjuhtimissüsteemi jaoks andmeid järgmistest süsteemidest: rootor, ülekandesüsteem, generaator, konverter, gondel, gondli pööramise süsteem, torn ja alarmsüsteem. Peale elektrituuliku enda komponentide kogutakse andmeid veel lisasüsteemidest: meteoroloogiline süsteem, tuuleelektrijaama juhtsüsteem ja elektrisüsteem [1].

Elektrijaama komponentide vahelise side sisu kirjeldava informatsiooni võib jagada viite kategooriasse: protsessi informatsioon, statistiline informatsioon, ajalooline informatsioon, kontrollinformatsioon ja kirjeldav informatsioon. Tabelis 1.1 on toodud informatsiooni liigid ja millist informatsiooni liigid sisaldavad.



Protsessi informatsioon, statistiline informatsioon ja ajalooline informatsioon annavad edasi sisulise informatsiooni, mis on vajalik elektrituulikute jälgimiseks ja kontrolliks. Protsessi informatsioon annab ülevaate kogu protsessist ja protsessi üksikkomponentidest. Juhtimisinformatsiooniga saadetakse elektrituulikule edasi parameetrid, käsud ja seadepunktid. Kirjeldav informatsioon annab edasi informatsiooni tüübi, täpsusastme ja ajatemplid.

Tabel 1.1 Informatsiooni liigid [1].

Kategooria	Kirjeldus
<b>Protsessi informatsioon</b>	
<b>Staatus informatsioon</b>	Diskreetne info elektrituuliku süsteemi või komponendi hetkeseisundi või käitumise kohta
Staatus	Süsteemi või komponendi seisund (ST1/ST1...STn)
Alarm	Teadeanne sekkumisest ohutuse kaalutlusel, näiteks elektrituuliku kontrollsüsteemi poolt
Sündmus	Oleku muutus
<b>Analoog informatsioon</b>	Pidev info elektrituuliku süsteemi või komponendi hetkeseisundi või käitumise kohta
Mõõdetud andmed	Suurus protsessi parameetri kohta
töödeldud andmed	Mõõdetud andmed, mis on töödeldud (10 minuti keskmine jne.)
Kolme faasi andmed	Kolme faasi kohta mõõdetud suuruste andmed
<b>Juhtimise Informatsioon</b>	
<b>Juhtimise Informatsioon</b>	Süsteemi hetkestaatus ja käitumise diskreetne informatsioon
Käsk	Elektrituuliku juhitud diskreetsed väärtused
seadepunkt	Protsessi väärtuse kontrollväärtus
parameeter	Juhitud süsteemi väärtused
<b>Tuletatud informatsioon</b>	
<b>Statistiline informatsioon</b>	Statistiliste algoritmide tulemused
aja mõõtmine	Seisundi ajalised kestvused
loendamine	Seisundite arv
karakteristik	Vaadeldud andmete omadused (maksimum, miinimum, keskmine jne)
<b>Ajalooline informatsioon</b>	Informatsioon ajaloolistest andmetest
logi	Kronoloogiline nimekiri sündmustest
transient	Lühiajaline kõrge sageduslik informatsioon
raport	Perioodiline teade, mis koosneb tellitud infost.

Standardile vastamiseks kohustuslikud loogikasõlmed ja neis sisalduv info on järgmine:

- Elektrituuliku üldine info (WTUR)
- Elektrituuliku rootori info (WROT)
- Elektrituuliku ülekande info (WTRM)
- Elektrituuliku generaatori info (WGEN)

- Elektrituuliku konverteri info (WCNV)
- Elektrituuliku trafo info (WTRF)
- Elektrituuliku gondli suunasüsteemi info (WYAW)
- Elektrituuliku meteoroloogiline info (WMET)
- Elektrituuliku alarmsüsteemi info (WALM)

Elektrituuliku üldine informatsiooni elektrituuliku tööaja, kogu- ja hetkeelektrienergia kohta. Kõigi sõlmede kohta esitatakse info sõlme seisundite kohta [2,3].Elektrituuliku rootori info keskendub rootori ja aktiivse laba nurga seisundite kontrollile, sisaldab sellist infot nagu laba nurgad, rootori kiirus ja nurgad, elektrilise süsteemi voolud ja pinged, hüdraulikasüsteemi rõhk. Elektrituuliku ülekande info koosneb sõltub ülekande tüübist. Tavaline elektrituuliku ülekanne koosneb aeglasest võllist, mitmetasemelisest käigukastist, kiirest võllist ja mehaanilisest pidurist. Elektrituulikutel kasutatakse erinevaid ülekande lahendusi kuni selleni välja, et käigukasti ei kasutata [4]. Tähtsaim info koosneb, mida ülekande sõlme kohta kogutakse on laagrite temperatuurid, jahutus süsteemi väärtused sealhulgas õli temperatuurid, mehhaaniliste osakeste arvud jne [2,3]. Elektrituulikute juures kasutatakse peamiselt kaksik toitega asünkroon generaatorit või sünkroon generaatorit. Elektrituuliku generaatori info sõltub sisaldab andmeid generaatori kiiruste, staatori ja rootori temperatuuri, jahutussüsteemi temperatuuri, generaatori elektriliste hetkeväärtuste, sealhulgas voolutugevus ja võimuse kohta. Elektrituuliku konverteri info kogumise sõlmede arv võib suureneada vastavalt konverterite arvule. Tähtsam info, mida konverteri andmete sõlm sisaldab, on generaatori ja võrgu poolsed elektrilised parameetrid ning seadmete temperatuurid. Elektrituuliku trafo info sisaldab trafo elektriliste parameetrite väärtusi ja trafo jahutussüsteemi seisundeid sealhulgas trafo temperatuuri andmeid [4]. Elektrituuliku gondli sõlme alla liigitatakse gondli meteoroloogiline info sealhulgas tuule suund, tuule kiirus ja jäätumise olemasolu määramine. Elektrituuliku gondli suunasüsteemi info sõlm sisaldab hüdraulilise või elektrilise gondli suunda muutva süsteemi väärtusi ja andmeid kaabli keerdumise kohta [2,3]. Elektrituuliku meteoroloogilise info sõlm sisaldab andmeid tuulemõõde masti kohta. Tuulemõõde mast võimaldab mõõta nii horisontaalset kui vertikaalset tuule kiirust ja suunda. Elektrituuliku alarmsüsteemi info sõlm sisaldab kronoloogiliselt registreeritud ja hetkeandmeid alarmide ning hoiatuste kohta, alarmsüsteemi info antakse erinevate tasemete kohta. Kõik need elektrituulikute kontrolli ja andmete kogumise süsteemid annavad võimaluse optimeerida elektrituulikute koosneva elektrijaama tööd nii et see maksimaalselt kasutaks tuule energia potentsiaali. Elektrituuliku võime kasutada tuuleenergia potentsiaali ideaaltingimustel on tavaliselt ära toodud tehase poolse võimsuskõveraga [2,3].

Meteoroloogiline süsteem on tuuleelektrijaama lisasüsteem, mis kasutab tuule karakteristikute registreerimiseks tuulemõõte masti. Tuulemõõte masti kasutades mõõdetakse tuuleelektrijaama keskkonna tingimusi nagu tuule kiirus, tuule suund ja õhurõhk. Tuulemõõte mast annab mõõdetavatest parameetritest suhteliselt moonutustevaba ülevaate keskkonna tingimustest kuid nende kasutamiseks tuleb leida konkreetse elektrituuliku asukoha eritingimusi arvestavad korreleerivad funktsioonid selleks, et täpsemalt hinnata iga elektrituuliku töö efektiivsust [2].

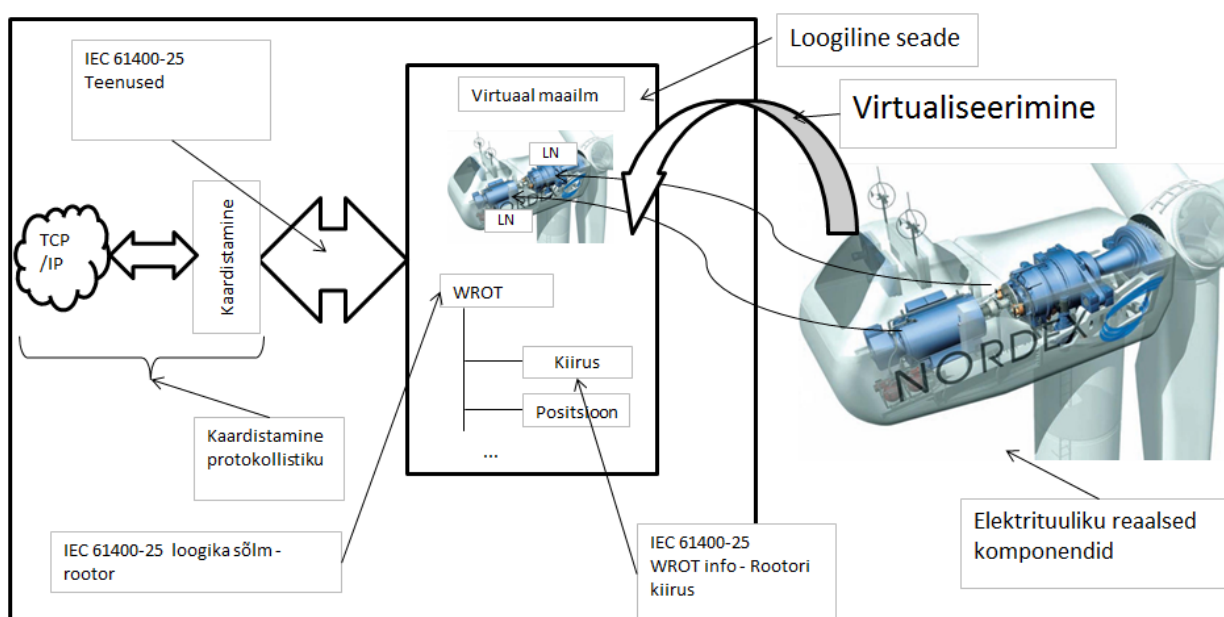
Elektrituulikute ja tuuleelektrijaama tööks läheb vaja veel elektrienergia kogumise komponente, mis koguvad igast fiidrist elektrienergia ja kannavad kogutud elektrienergia edastamiseks sobivaks konverteeritud parameetritega üle elektrivõrku. Elektrienergia kogumise, konverteerimise ja võrku ülekande ülesandeid täidab tuuleelektrijaama elektrisüsteem. Tuuleelektrijaama kontrollsüsteem kindlustab, et kõik süsteemid sealhulgas elektrienergia kogumise, konverteerimise ja võrku ülekande süsteem kohaneks operatiivselt elektrivõrgu staatiliste ja dünaamiliste seisunditega.

## **1.2. Elektrituuliku kommunikatsiooni võimekus**

Elektrituuliku ja elektrijaama korrektseks tööks peavad elektrituulik ja elektrijaam suutma vahetada informatsiooni kõikide elektrijaama süsteemide vahel. Elektrituuliku ja elektrijaama informatsioonivahetus tähendab, et elektrituulik on jälgitud ja kontrollitud erinevate elektrituuliku väliste osaliste poolt nagu kohapealne dispetšjuhtimissüsteem, kaugjuhtimise dispetšjuhtimissüsteem ja elektrivõrgu operatiivjuhtimissüsteem. Elektrijaama jälgimise süsteemi eesmärk on osalistele anda informatsiooni kogu süsteemist ja selle komponentidest. Elektrijaama jälgimise süsteemi kaudu kogutud informatsioon on vajalik, et juhtida tuuleelektrijaama tööd. Näiteks kujutame ette olukorda, kus võrgu dispetšisüsteem annab käsu vähendada elektrijaama väljundvõimsust. Tuuleelektrijaama juhtimissüsteem peab võrgu dispetšisüsteemi käskluse täitmiseks teadma kogu tuuleelektrijaama väljundvõimust ja konkreetsete elektrituulikute staatust. Kontrollsüsteem toetudes kogutud informatsioonile saab otsustada, millistesse seadmetesse on otstarbekas edastada võimsuspiirangu käsklused juhul kui tuuleelektrijaama võimsus ületab võrgu dispetšisüsteemi poolt ette antud väärtusi. Pärast käskluse edastamist seadmetele peab kontrollsüsteem saama ka tagasisidet, kas käsklus on edukalt täidetud [5].

Tüüpiliselt kõik kaasaegsed tuuleelektrijaamade komponendid, mis peavad vahetama informatsiooni teiste komponentidega ja osalistega, on varustatud niinimetatud intelligentsete elektrooniliste seadmetega (IED), mis saavad infot süsteemi välistele vastuvõtjatele ja võtavad infot väljast vastu [5].

Elektrituuliku kommunikatsiooni ja juhtimise standard kasutab süsteemide ja komponentide kirjeldamiseks objektorienteeritud modelleerimist, et võimaldada kommunikatsiooni seadmete vahel. Objektorienteeritud mudeli puhul kirjeldatakse igat reaalselt komponenti kui objekti millel on mõõdetavad väärtused, binaarsed olekud, käsud ja seadeväärtused. Komponentide modelleerimiseks objektide tegemiseks tuleb kindlaks teha reaalse komponendi kogu informatsioon ja funktsionaalsus. Igal andmepunktil on nimi, klass ja iga andmepunkt esindab infot seadmes, mida saab lugeda ja uuendada. Joonisel 1.3 on kujutatud elektrituulikute objektorienteeritud modelleerimine [1].



Joonis 1.3 Elektrituuliku objektorienteeritud modelleerimise etapid reaalsest seadmest sideprotokollini [1,6].

Objektorienteeritud mudel lubab süsteeme ja komponente organiseerida ja defineerida kasutades standardnimetusi standardkomponentide jaoks, sõltumatult konkreetse komponendi või seadme tootjast, ning me ei pea tegelema numereeritud suurustega. Näiteks kui seadmehel on võll, mille pöörlemiskiirus on mõõdetud, siis sellel on alati sama nimi, ükskõik kes on selle tootja ning seda informatsiooni on võimalik lugeda kõikide programmidega, mis seda standardit toetavad.

Peale andmete lugemise ja uuendamise protsessi võivad seadmed omada teisi funktsioone nagu ajalooliste logide loomine ja tegevused, mida käivitavad seadme sisesed või välised käsud.

Objektorienteeritud mudeli ja informatsioonivahetus mudeli siderakendus on defineeritud kasutades sideprotokollistiku. Informatsiooni vahetus serveri ja kliendi vahel vajab ühetaolist kommunikatsiooniprotokolli mõlemal pool [7].

### 1.3. Sideprotokollid

Vastavalt IEC 61400-25-4 standardile kaardistatakse elektrituulikute informatsiooni mudelprotsessi informatsioon üldlevinud dispetšjuhtimissüsteemides kasutatavate sideprotokollide põhiselt. Sideprotokollid määravad ära seadmete ühilduvuse sõnumi struktuuri, sõnumi saatmise ja vastuvõtmise korra, moduleerimiseviisi, sidevõrgu struktuuri, vigade tuvastamise ja parandamise meetodi [8].

Andmeside arenedes muutus infovahetus komplitseeritumaks ja suhtlusviisid mitmekesisemaks ning tekkis olukord, kus eri firmade seadmete koostöö muutus komplitseerituks. Eri firmade seadmete koostöö lihtsustamiseks on kasutusele võetud OSI-mudel, mis on avatud süsteemide ühendamise seitsmekihiline arhitektuur [9].

OSI-mudeli seitse kihti on järgmised:

- Füüsiline kiht
- Kanalikiht
- Võrgukiht
- Transpordikiht
- Seansikiht
- Esitluskiht
- Rakenduskiht

Protokollikihist olenevalt on andmed koondatud järgmisteks üksusteks:

- Füüsiline kiht – bitt
- Kanalikiht – kaader
- Võrgukiht – pakett, datagramm
- Transpordikiht – segment, andmevoog
- Kõrgemad kihid – andmed

Elektrituulikute side tarvis kasutatakse peamiselt veebipõhiseid protokolle. Kõik peamised dispetšjuhtimissüsteemides kasutatavate protokollide juures on välja arendatud TCP/IP põhised lisad. Sellisteks lisadeks on DNP 3.0 TCP/IP, IEC 60870-5-104 ja Modbus TCP/IP. Kuigi andmeside üle veebiühenduse on suhteliselt aeglane ja ebakindel tavalise SCADA talitlusega võrreldes on elektrituulik juhtimis- ja kontrollikeskusest geograafiliselt kaugel ja veebitehnoloogiate kasutamine on seetõttu lihtsaim või ainus võimalus andmeside korraldamiseks. TCP/IP protokollide lisade kasutamise puhul IEC 60870-5 standardi kohaselt OSI-mudeli füüsilist kihti ja kanalikihti ei kasutata [8,9].

### 1.3.1. Jaotatud võrgu protokoll (DNP 3.0)

Jaotatud võrgu protokoll on telekommunikatsiooni standard, mis defineerib kommunikatsiooni peajaama, kaugterminalide (RTU) ja teiste kohtterminalide (IED) vahel. See on arendatud välja avatud, koostalitusvõimelise ja lihtsa protokollina dispetšjuhtimissüsteemide tarbeks. Juhtimissüsteemides kasutatakse jaotatud võrgu protokolliga informatsiooni kogumiseks ja juhtimiskäskude saatmiseks füüsiliselt eraldatud arvutite vahel. DNP 3.0 on disainitud saatma suhteliselt väikeseid andmepakette kindlal viisil, nii et saadetud sõnumid saavad deterministlikus järjekorras. Ette määratud järjekorras andmepakettide vastuvõtt on DNP 3.0 standardi erinevus üldotstarbelistest protokollidest, nagu näiteks FTP protokoll. FTP protokolliga saab saata küllalt suuri faile, kui seda meetodil, mis üldjuhul ei sobi dispetšjuhtimissüsteemis kasutamiseks. DNP 3.0 kasutab info saatmiseks ja vastuvõtmiseks ülem-alluv pollimismeetodit, kui kasutab ka ülem- alluv süsteeme sama süsteemi sees [10].

DNP 3.0 on avatud protokoll standard ja see on kasutusele võetud paljude tootjate poolt. Avatud standardi eeliseks on koostalitusevõime nende tootjate seadmete vahel kes DNP 3.0 standardit kasutavad. See tähendab, et kasutaja saab osta teatud süsteemi seadmed, näiteks peajaama, ühelt tootjalt ja kaugterminalid osta teiselt tootjalt. DNP 3.0 standardi järgse süsteemi peamine eelis on võimalus järk - järgult süsteemi uuendamine sõltumata konkreetse tootja seadmete tootmisse võtmise ajast ja nende hinnast [11].

DNP 3.0 tunnusjooned on:

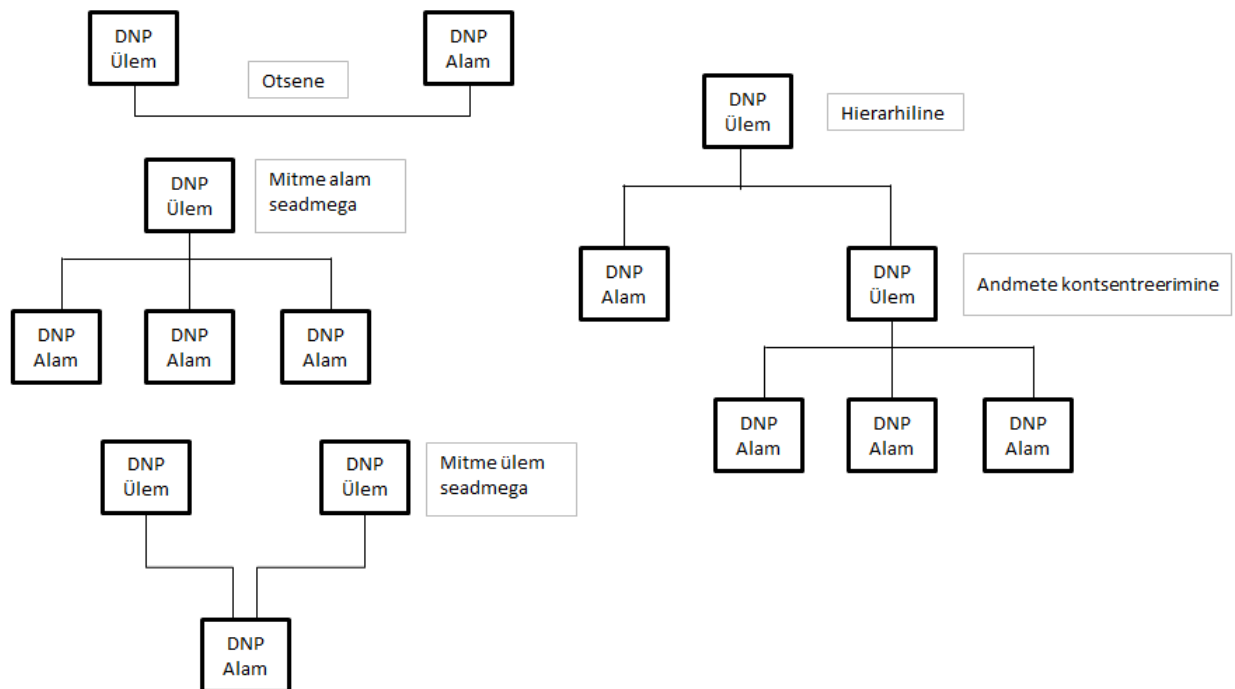
- Toetab ajatempliga sõnumeid võimaldamaks sündmuste järjestuse (SOE) salvestamist
- Jagab sõnumid mitmeks kaadriks, et pakkuda täpsemat vea diagnostikat ja kiireid kommunikatsiooni sarju.
- Lubab võrdsete õigustega ja ülem-alluv võrgu topoloogiat
- Lubab mitme ülemaga võrgu topoloogiat.
- Võimaldab kasutaja poolt defineeritud objekte
- Võimaldab sündmuste teavitusi ilma ülema poolse pollimiseta ehk võrdõiguslikku kommunikatsiooni.
- Turvaline seadistuse/failide ülekandmine
- Võimaldab aja sünkroniseerimist ja ajatempliga sündmusi

DNP 3.0 eelised on:

- Avatud standard
- Suur kasutajate poolne toetuskogukond
- Protokoll on toetatud paljude seadmetootjate poolt

- Kihiline arhitektuur, mis vastab IEC arhitektuuri mudelile
  - Optimeeritud töökindlaks ja efektiivseks dispetšjuhtimissüsteemi kommunikatsiooniks
- DNP 3.0 erinevad topoloogiad on kujutatud joonisel 1.4 ja need jagunevad:

- Ülem-alam otsene
- Hierarhiline koos andmete kontsentreerimisega
- Mitme alam seadmega mitmepunktilist ühendust
- Mitme ülem seadmega



Joonis 1.4 DNP 3.0 seadmete vahelise ühenduse topoloogia [10].

DNP 3.0 protokoll on tuntud selle poolest, et protokollile vastavuse kontroll on tugev. Protokollil on ulatuslik spetsifikatsioonide loend andmeobjektide kohta ja sertifitseerimise süsteem. Sertifitseerimise protsessis on defineeritud teostuse alamosad millede teostust tuleb seadmel eraldi sertifitseerida. See tähendab, et tootjad võivad toota süsteeme vähendatud funktsionaalsusega ja kasutaja protokollile vastavuse kaudu kontrollida, et ostetud seade pakub lubatud funktsionaalsust [11].

Alates DNP 3.0 standardi loomisest elektrienergia jaotusvõrgu jaoks Ameerika Ühendriikides on DNP 3.0 standard saavutanud olulise leviku nii geograafiliselt kui ka erinevate tööstussektorite vaheliselt. DNP 3.0 kasutatakse paljude tootjate poolt elektri-, vee ja paljudes teistes infrastruktuuri ja tööstussektorites Põhja-Ameerikas, Lõuna-Ameerikas, Lõuna-Aafrikas,

Austraalias ja Uus-Meremaal. Euroopas pakub DNP 3.0 standardile konkurentsi IEC 60870-5 standard, mis on Euroopas laialdaselt kasutusel, sealjuures IEC protokollid kasutatakse peamiselt elektri sektoris ja DNP 3.0 standardit kasutatakse nafta, gaasi, vee ja turva sektorites [11].

### 1.3.2. IEC 60870-5

IEC 60870-5 viitab standardi kogule, mis on koostatud Rahvusvahelise Elektrotehnika komisjoni (IEC) poolt, et pakkuda avatud standardeid dispetšjuhtimissüsteem telemeetriaks, kontrolliks ja informatsiooni ülekandmiseks. IEC 60870-5 standard pakub detailset ja funktsionaalset kirjeldust distantjuhtimisega seadmete ja süsteemide kohta, millised on suutelised kontrollima geograafiliselt hajutatud protsesse. IEC 60870-5 on põhiliselt mõeldud kasutamiseks elektri sektoris ja sisaldab andmeobjekte, mis on spetsiaalset mõeldud elektrisektoris kasutamiseks, kuid standard ei ole piiratud ainult elektri sektoris kasutuseks [5].

IEC 60870-5-101 toetab kakspunkt ja mitmepunktilise kommunikatsiooni ühendusi, võimaldades üle kanda biti-seeria väikse ribalaiusega andmekommunikatsiooni, jagunedes õiguste alusel. Võrdõiguslik kommunikatsioon – piiratud kakspunkt ühenduste puhul:

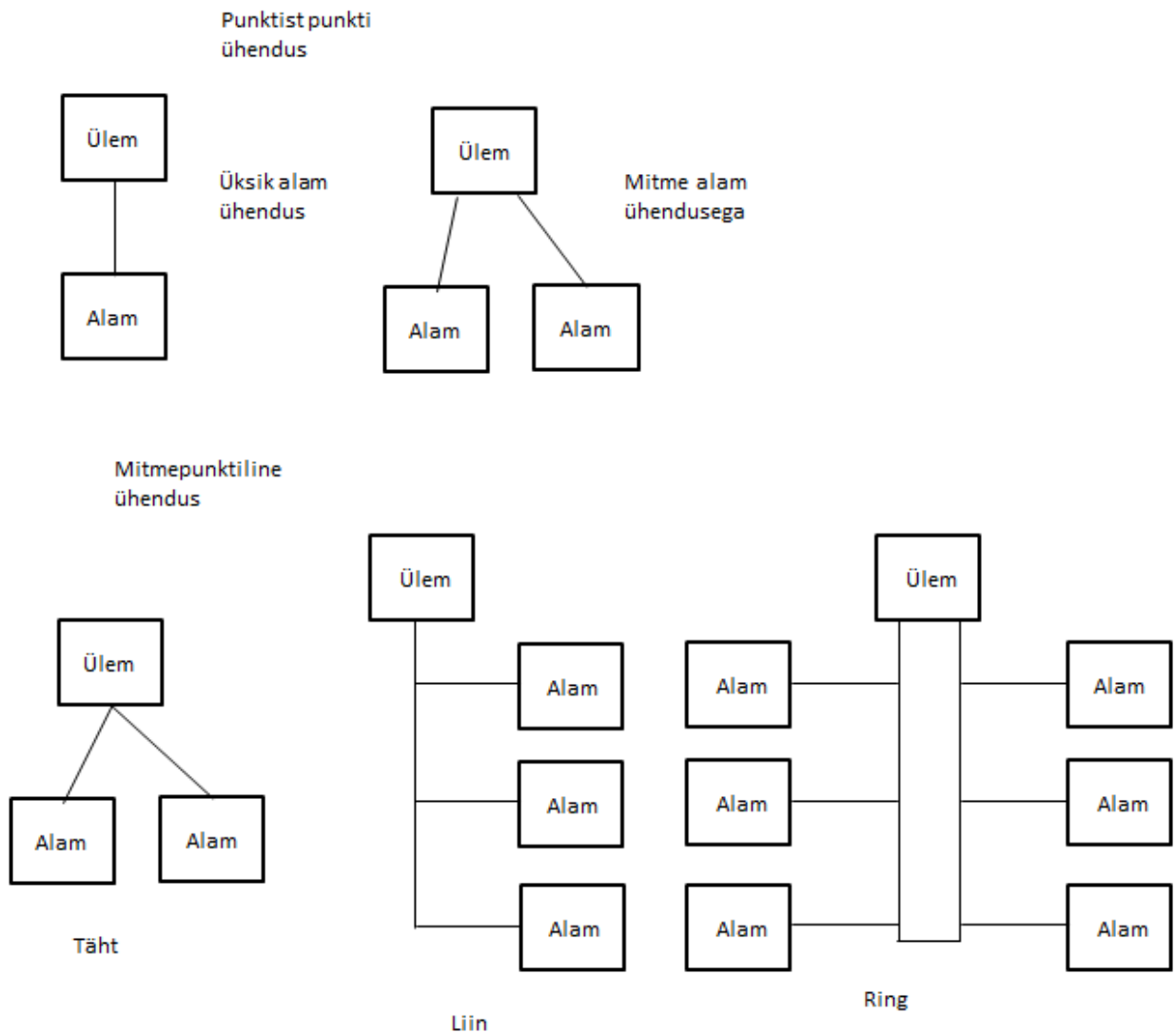
- Mõlemad pooled saavad algatada info vahetust
- Parema efektiivsusega kommunikatsiooni süsteemi kasutus
- Samaaegne ressursi kasutuse võimalus, kaks seadet võivad samaaegselt üle kanda. Süsteem vajab sama ressursi üheaegselt kasutusest tuleneda võivate vigade vastast kaitset ja rikkest taastumise süsteemi
- Kasutatav kakspunkt ühenduse korral

Ülem-alam kommunikatsioon –sobib mitmepunktiliseks ühenduseks:

- Ainult ülem seade/süsteem saab info vahetust algatada
- Ressursi samaaegse kasutuse kaitset ei ole vaja
- Alam andmeühenduse kiht on lihtsustatud

Protokoll pakub valikut kasutada tasakaalustatud või mitte-tasakaalustatud kommunikatsiooni kanalikihis, mis formeerib kaadrid ja edastusteenused võrgukihile. Mitte-tasakaalustatud kommunikatsiooni puhul ainult ülem seade/süsteem võib alustada kommunikatsiooni saates esmased kaadrid. Ülem seadme lahendus lihtsustab süsteemi disaini kuna süsteem ei pea toetama sama ressursi samaaegse kasutuse ärahoidmissüsteemi. Tasakaalustatud kommunikatsiooni saab kasutada aga see on piiratud kakspunkt ühenduste puhul. Seega protokoll toetab alam süsteemi poolt alustatud kommunikatsiooni, kuid ei võimalda seda mitmepunktilise topoloogia puhul ja sellisel juhul peab kasutama tsüklilist pollimisskeemi sekundaarsete jaamadega suhtlemise jaoks [5].





Joonis 1.5 IEC 60870-5 0 seadmete vahelise ühenduse topoloogia [5].

Koostalitusvõime protokolliga IEC 60870-5 saavutatakse läbi standardis toodud vastavuse ettekirjutuse. Vastavuse ettekirjutus identifitseerib erinevad operatiivrežiimid, seadistusvõimalused, ASDU-d ja lisainformatsiooni, mis on tähtis vastavuse tagamiseks. Kuna IEC 60870-5 on lihtsa andmetüüpide ja aadresside struktuuriga protokoll, siis selline meetod on suhteliselt lihtsalt rakendatav, kuid kasutajad peavad eelnevalt kontrollima juhtiva jaama teostust kindlustamiseks, et kõik vajalikud andmetüübid on toetatud [11].

Joonisel 1.5 on näha, et IEC 60870-5 topoloogia jaguneb kaks punkt topoloogiaks ja mitmepunktiliseks topoloogiaks. Kaks punkt ühenduses on üks ülem jaam ja üks alamjaam/välijaam. Mitmepunktilises ühenduses on üks ülemjaam ja mitu alam/välijaama. Ringi ühenduse peamine erinevus on teise ühenduspordi lisamine, et suurendata süsteemi töökindlust. Süsteemis võib kasutada erinevaid ühenduse liike, luues hierarhilise võrgu, kus üks kohtterminal

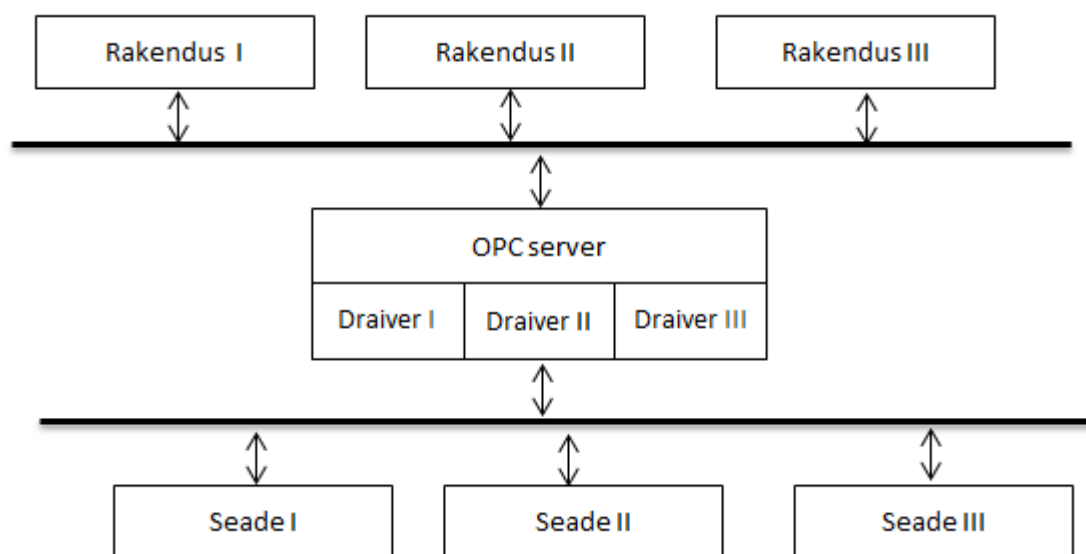
võib olla ülemjaam teistele kohtterminalidele, olles samas alamjaam kaugemal asuvale terminalile [5].

IEC 60870-5 eelised on:

- Avatud standard
- Aadressisüsteemi suurem paindlikus ja muutuvad aadressi pikkused
- Protokoll kasutab võrdõiguslikku, (kakspunkt ühenduses), ja ülem-alam kommunikatsiooni.
- Lihtne protokoll, mis ei varieeru oluliselt erinevate andmeobjektide jaoks ja mille aadressi süsteem on lihtsam kui DNP 3.0.

### 1.3.3. OPC

OPC standardid, mis on väljastatud organisatsiooni *OPC Foundation* poolt pakuvad lahendusi süsteemi integratsiooniks tööstusautomaatikas. Peamised kasutusvaldkonnad on liidesed, mis ühendavad tööstuslikke automaatika rakendusi nagu kasutajaliides ja dispetšjuhtimissüsteemid ning kontrollitavaid ja jälgitavaid seadmeid, et üle kanda hetke ja ajaloolisi andmeid. OPC standardid defineerivad fundamentaalsed mehhanismid ja funktsioonid protsessi andmete lugemiseks ja kirjutamiseks, sündmuste ja alarmide jälgimiseks ja töötlemiseks ning ajalooliste andmete arhiveerimiseks. OPC tehnoloogia põhineb Microsoft'i poolt arendatud DCOM (*Distributed Component Object Model*) tehnoloogial, kuid seda saab täiendada XML protokolliga mitte Windows'il põhinevate süsteemide jaoks.



Joonis 1.6 OPC seadmete vahelise ühenduse topoloogia [12].

Nende tehnoloogiate kasutamise abil on standard võimaline ühendama automaatika komponente juhtimisseadmetega ja samas võimaldama koostalitusvõimet ettevõtte abisüsteemidega nagu Ettevõtte Ressursside Planeerimine (ERP), mis on tarkvaralahendus ettevõtte tegevuse juhtimiseks. OPC kommunikatsiooni arhitektuur on kujutatud joonisel 1.6 [12].

OPC standard põhineb klient-serveri arhitektuuril. OPC server pakub standardliidest igale OPC COM objektile, mis lubab OPC kliendil objektidega andmeid vahetada ja juhtimist üldisel viisil läbi viia. OPC klientrakendus saab ühenduse luua mitme erineva OPC serveriga [12].

OPC standard koosneb tehniliste nõuete kogust. Tähtsamad neist on:

- OPC Data Access (DA)
- OPC XML-DA
- OPC Historical Data Access (HDA)
- OPC Alarm and Event (A&E)

OPC DA standard defineerib standard COM objektide, meetodite ja omaduste kogumi kliendi ja serveri vahel protsessi muutujate lugemiseks, kirjutamiseks ja jälgimiseks. Peamised kasutus alad on reaalaja andmete ülekandmine PLC-st, DCS-st ja teistest juhtimisseadmetest süsteemidesse nagu kasutajaliides, dispetšjuhtimissüsteem jne [12].

OPC DA eesmärk on standardiseerida mehhanism, kuidas mitmed andmeallikad omavahel suhtlevad. Erinevad objektid tehakse kättesaadavaks serveri nimeruumis ja server pakub meetodid nende hierarhias liikumiseks. OPC klienti ja serveri vahelise suhtluse jaoks on kasutusel erinevad mehhanismid nagu sünkroonsed ja asünkroonsed „kõned“ (*calls*), uuendus (*refresh*) ja tellimus (*subscription*). Sünkroonse lugemise korral peab klient ootama, kuni server vastuse saadab, asünkroonse lugemise korral saadab server vastuse kohe. Uuendus ja tellimus on tagasi helistamisega mehhanismid ehk klient soovib serverilt kindlaid protsessi väärtusi ja server saadab need mingi perioodi järel [13].

OPC poolt pakutavad reaalaja andmed ei ole alati kätte saadavad. Näiteks juhul kui ühendus seadmega on ajutiselt katkenud. OPC lahendus sellele probleemile on kasutada edastatava andmete jaoks ajatemplite ja kvaliteeti süsteemi. Andmekvaliteet näitab kas andmed on täpsed, mitte kätte saadavad, või kvaliteet on teadmata [13].

OPC XML-DA on standard, mille eesmärk on lahendada OPC COM DA tarkvara platvormist tingitud piiranguid. OPC COM DA põhineb COM/DCOM tehnoloogial, mis on mõeldud

talitlema Windows-i tarkvara platvormil, kuid paljud valdkonnas rakendatavad eri tarkvaraga arvutisüsteemid ei ole võimelised kasutama antud objekti mudelit [13].

OPC XML-DA on defineeritud iseseisva tehnilise nõudena (*specification*), et oleks garanteeritud parem koostalitusvõime mitte Window'si tarkvaraga ja paindlikumaks ühenduseks läbi interneti. OPC XML-DA standardis on COM/DCOM vahetatud välja HTTP/SOAP ja veebiteenuse tehnoloogiaga [13].

OPC HDA võimaldab OPC kliendil ligi pääseda protsessi toor- ja töödeldud andmetele. OPC HDA serverid võivad koguda lihtsalt toorandmeid perioodi kohta või teha nende andmetega arvutusi ja omada kokkupakkimise algoritme [13].

OPC A&E võimaldab paindlikult edastada protsessi sündmus- ja alarmteateid vastavalt vajadusele ehk standard kasutab erinevat andmeedastus mehhanismi [13].

Koostalitusvõime OPC protokollide kasutatavate seadmete vahel saavutatakse läbi OPC Foundation poolt pakutava sertifitseerimise programmile. Sertifitseerimise programm on kahtasemeline. Esimene tase koosneb enese testidest ja töörühmadest (*workshops*). OPC Foundation pakub ühilduvuse testimine tööriistu ja korraldab iga aastaseid koostalitusvõime töörühmasid, kus tootjad saavad seadmete omavahelist tööd testida. Teine tase koosneb sertifitseerimise testimise teenust pakkuvatel laboritel [13].

#### **1.4. Elektrituuliku seisundi reaalaajajälgimissüsteemi arhitektuuri võimalike alternatiivide analüüs**

Elektrituulikute dispetšjuhtimissüsteemid on kahte liiki - avatud ja suletud tarkvaraga süsteemid. Elektrituulikute tootjad arendavad enda kontrollitud suletud süsteeme, et võimaldada suhtlust sama tootja seadmetega. Nende süsteemide eeliseks on, et tegemist on niinimetatud „võtmed kätte“ lahendusega ehk tegemist on täislahendusega. Selliste süsteemide peamiseks probleemideks on suur sõltuvus ühest süsteemi arendajast, dokumentatsioon süsteemi kohta on raskesti kättesaadav ja süsteem ei ole lihtsalt uuendatav. Avatud süsteemid on kolmanda osapoole arendatud süsteemid, mis põhinevad avatud tarkvaral. Sellised süsteemid on populaarsed, kuna pakuvad koostalitusvõimet teiste süsteemidega ja on uuendatavad uute rakendustega.

Elektrituulikute tootjate poolt operaatorite jaoks pakutud süsteemid jagunevad kahte tüüpi:

- Veebipõhine lahendus
- Spetsiaalselt arendatud rakendused

Veebipõhine lahendus on mõeldud kasutamaks läbi veebibrauseri. Veebibrauseri lahendused näitavad elektrituulikute hetkeandmeid ja sündmusi. Rakenduse analüüsi lahendused võivad tootjate vahel suurelt kõikuda. Näiteks võib tegemist olla puhtalt elektrituulikult tulevate agregeeritud väärtuse näitamisega või veebirakenduse jaoks on välja arendatud erinevad graafikud ja andmete võrdlusvõimalused nagu energiaroosid ja maatriksgraafikud. Sellised veebirakendused erinevad ka ajalooliste andmete mahu poolest, mida kasutaja saab analüüsida. Veebilahendused on tihti majutatud tuuleelektrijaama peaarvuti juurde ja see võimaldab veebirakenduste kaudu ligipääsu andmete arhiivile. Andmete arhiivi suurus on erinevate tootjate puhul erinev, kuid peamiselt on sinna salvestatud agregeeritud andmed nagu 10-min keskmised väärtused, *min* ja *max* väärtused ja veateated. Sellise lahenduse suurim eelis on ülemaailmne ligipääs [14].

Eraldiseisvad rakendused, mis ei kasuta veebibrausereid andmete edastamiseks, pakuvad suuremat töökindlust ja võimaldavad kiiret hetkeandmete analüüsi. Sellise süsteemi arhiivi analüüsi võimalused on piiratud asjaoluga, et elektrituuliku andmed tuleb enne alla laadida süsteemi, kus programm töötab. Andmete analüüsi võimalused on piiratud andmete kättesaadavuse tõttu piiratud. Eraldiseisvate rakenduste eeliseks on ka suurem turvalisus [14].

Mõlemad eelpool toodud süsteemid sisaldavad võimekust elektrituulikute kaugjuhtimiseks. Elektrituulikute operaatorite jaoks võimaldatakse tavaliselt sisse- ja väljalülitus operatsioonid.

## **1.5. Operatsioonisüsteemide näited**

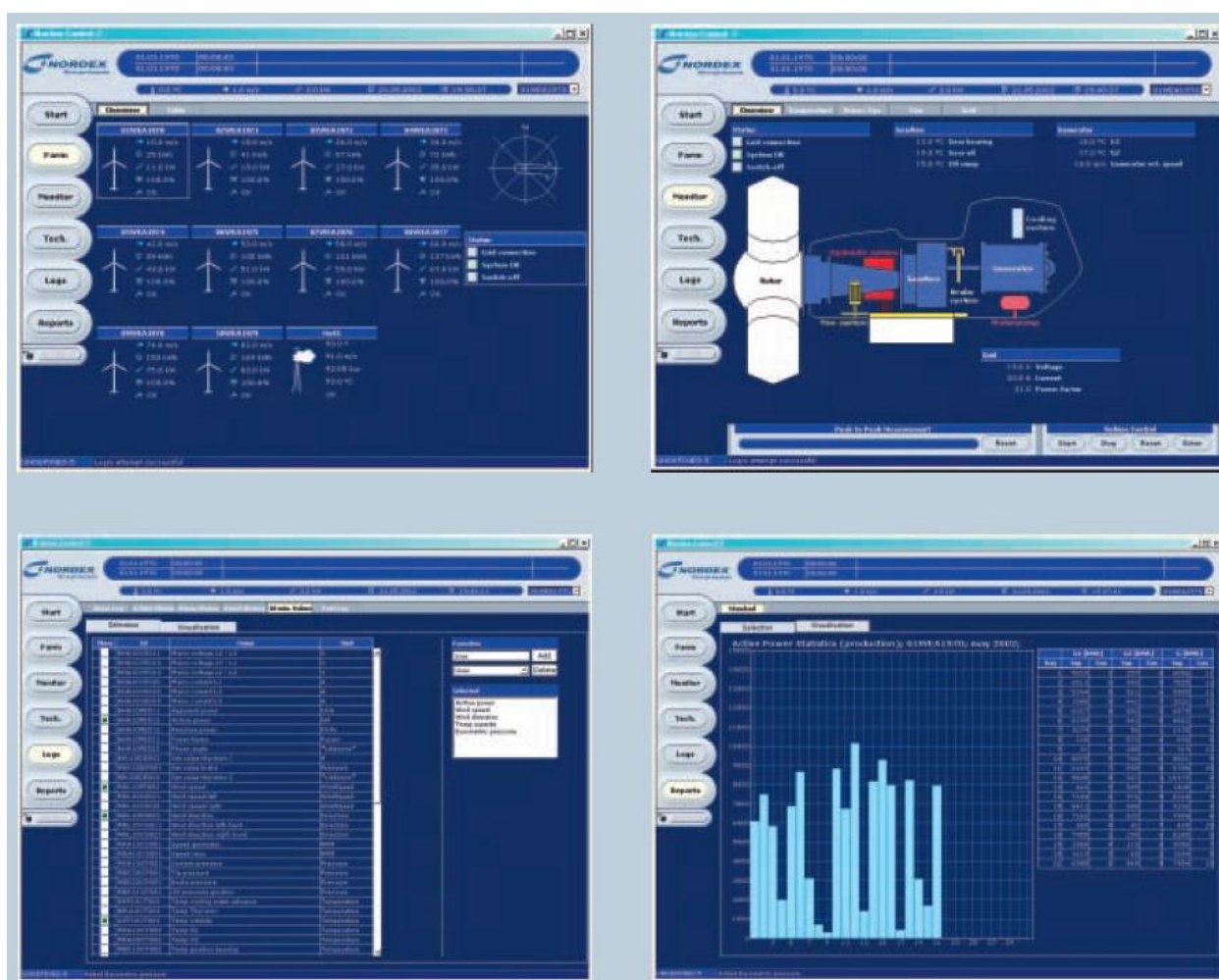
### **1.5.1. Nordex NC2 süsteem.**

Nordex Control 2 lahendus annab kasutajale vajaliku riist- ja tarkvara, et juhtida nii üksiku elektrituuliku kui ka tuuleelektrijaama tööd. Nordex NC2 töötab läbi veebiportaali, mis pakub teenuseid jälgimiseks, juhtimiseks ja analüüsiks. Teenused jagunevad:

- Jälgimis- ja juhtimissüsteemiks
- Meteoroloogiliste seadmete jälgimise süsteemiks
- Elektrisüsteemi jälgimissüsteemiks
- Logi ja raporti süsteemiks
- Autoriseerimise süsteemiks
- Teadete süsteemiks
- Andmete eksporti süsteemiks

Jälgimis- ja juhtimissüsteem sisaldab endas süsteemi ülevaadet, temperatuure, rõhkusi ja veateateid ning võimaldab erinevate elektrituuliku süsteemide näiteks pööramiseadme juhtimist,

sisse ja välja lülitamist. Meteoroloogilise seadmete jälgimissüsteem annab ülevaate tuulemõõtemasti andmetest ja hetkestaatuses. Elektrisüsteemi jälgimissüsteem annab ülevaate tuuleelektrijaama sisevõrgu ja ülekandevõrgu ühenduse hetkeandmetest ja hetkestaatuses. Logi ja raporti süsteem sisaldab raporteid nagu veateadete logi, aktiivsed veateated, veateadete ajalugu, sündmuste ajalugu, 10 minuti keskmised väärtused, toodangu statistika jne. Autoriseerimissüsteem koosneb süsteemi- ja asukoha põhisest sisselogimissüsteemist. Teadete süsteem kasutab e-maili põhist lahendust veateadete edastamiseks operaatoritele. Andmete ekspordi süsteem töötab CSV ja XML failidega [15].



Joonis 1.7 Nordex NC2 veebilahenduse graafiline väljund [15].

Nordex Control 2 portaal võimaldab individuaalsete elektrituulikute andmete kogumist erinevatest tuuleelektrijaamadest ja koondatud andmete visualiseerimist. Nordex Control 2 süsteemi andmete dubleerimine toimub igas elektrituulikus eraldi kasutades selleks PLC-des integreeritud andmete arhiive, kus säilitakse 10 minuti keskmiste, veateadete ajaloo, toodangu ja kasutustegurite andmeid. Selline lahendus kaitseb andmete täielikkust kommunikatsiooni

katkestuste puhul. Ühendussüsteemi võib seadistada üle erinevate arvutivõrgu topoloogiate nagu LAN, WAN, Intranet, Internet ja Extranet. Joonisel 1.7 on kujutatud Nordex NC2 veebilahendus [15].

### **1.5.2. Enercon remote monitoring**

Enercon remote monitoring süsteem on elektrituuliku tootja ENERCON'i poolt arendatud süsteem andmehõiveks, kaugjälgimiseks, avatud ja suletud juhtimisahelaga juhtimiseks, süsteem on kasutatav nii üksiku elektrituuliku kui ka tuuleelektrijaama jaoks. Enercon remote monitoring võimaldab kasutajal ligi pääseda tuuleelektrijaama serveri infole kasutades selleks spetsiaalselt arendatud liidest, mis visualiseerib elektrituulikute hetkeinfo, võrgu hetkeinfo, elektrituulikute komponentide parameetrid, hetke veateated ning andmete ajaloo. Neid andmeid saab visualiseerida tabelina ja graafikuna. Andmete analüüsiks saab ajalooliseid andmeid elektrituuliku serverist *dBase IV* formaadis alla laadida, mis võimaldab paindlikku andmete töötlemist [14,16].

Enercon METEO on süsteem, mille kaudu on saab Enercon'i süsteemiga ühendada meteoroloogilisi andmeid. Selle süsteemi peamine komponent on andmete logimisseade, mis on ühendatud tuulemõõte mastiga [16].

Andmete graafiliseks visualiseerimiseks kasutab Enerconi süsteem veebipõhist lahendust Enercon Service info portal veebilehe kaudu, mis sisaldab endas graafikuid nagu võimsuskõver ja ka elektrituuliku hoolduse ajalugu [16].

## 2. Erinevate tehniliste omadustega elektrituulikute jälgimiseks sobiva reaalajajälgimissüsteemi valik

Elektrituulikute tootjate ülese reaalajajälgimissüsteemi rajamise kõige olulisemaks eesmärgiks ja tulemuseks on elektrituulikute andmete vabastamine elektrituulikute tootjate suletud süsteemidest, et teha need kätte saadavaks lisaväärtust andvatele süsteemidele. Uurimistöö eesmärgid ühendatud süsteemi väljatöötamiseks saavutatakse andmete kogumisega avatud süsteemi ja arendades selliste omadustega kasutajaliidese, mis võimaldab andmete liikumist erinevate süsteemide ja nende osade vahel.

Elektrituulikute tootjate poolt pakutavad dispetšjuhtimissüsteemi lahendused, mida kasutatakse elektrituulikute reaalaja jälgimiseks on suletud süsteemid, mis on mõeldud suhtlema nende poolt kasutatud tarkvaraga, mille arenduse osas on operaatorid sõltuvad tootjatest, mis puudutab tarkvara arendust ja uuendust. Peale selle on paljude operaatorite juhtimise all rohkem kui ühe tootja elektrituulikud ja nende süsteemid ei oma tavaliselt koostalitusvõimet. Neil põhjustel on operaatorid hakanud kasutama kolmanda osapoole dispetšjuhtimissüsteeme, mis on kohandatud vastavalt operaatori vajadustele.

Käesoleva töö autori esitatud reaalajajälgimissüsteemi kasutamise plussid on järgmised:

- Kõik andmed on ühes kohas ja kiiresti saab ülevaate kõigi tuuleelektrijaamade tööst.
- Elektrijaamade tööst saab parema ülevaate, sest ühildada saab võrguoperaatori sätteid, (kohtterminali sätteid ja juhtimised), ja elektrituulikute andmed.
- Lihtsam ajalooliste andmete töötlemine, kuna andmed on ühes süsteemis ja ei pea tegelema erinevate andmebaaside failidega.
- Lihtsustab elektrituulikute töö võrdlemist, kuna kõik kvaliteeti parameetrid on arvutatud samade meetoditega.
- Andmete tihedust saab oluliselt tõsta ehk ei pea enam kasutama agregeeritud andmeid nagu 10 minuti keskmised.
- Elektrituulikute olukorra raportite ja tööraportite tegemise saab automatiseerida.
- Suletud dispetšjuhtimissüsteemide arvutustest ei ole head ülevaadet nende kontrollimiseks

Kasutades eelpool toodud reaalajajälgimissüsteemi arhitektuuri koos kolmanda osapoole andmete kogumise, töötlemise ja analüüsimise tarkvaraga on välja töötatud kolmanda osapoole reaalaja süsteem, mille loomise peamised eesmärgid on mastaapsuse lihtne suurendamine, võimalikult suur andmetihedus, andmebaaside võimalikult väikse maht, erinevate elektrituuliku

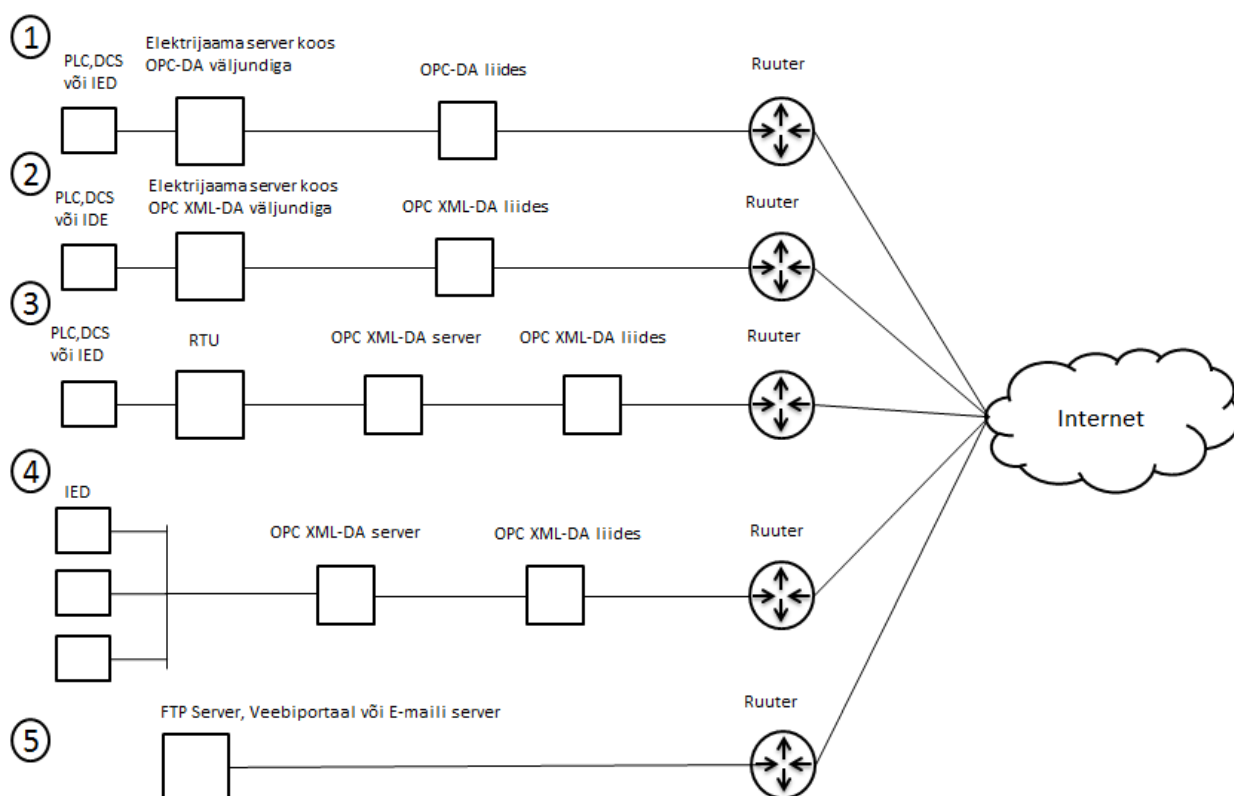


tüüpide ühendamine, erinevate sideprotokollide ühendamine, andmete kao vähendamine olukorras, kus andmeedastus käib üle interneti ja sidekatkestused on tõenäolised ja elektrituulikute tehnilise info ning nende tööplaneerimise info ühendamine ühtsesse süsteemi.

## 2.1. Süsteemi ülevaade

Välja töötatud kolmanda osapoole reaalaraja süsteem kasutab andmete kogumiseks ja töötamiseks OSIsoft'i poolt loodud PI tarkvara. PI süsteem võimaldab reaalarajas jälgida tuuleelektrijaamas toimuvaid sündmuseid, edastada ja arhiveerida andmeid ning lihtsustab oluliselt seadmete juhtimist ja talitluse analüüsimist. PI süsteem hoiab kõik kriitilised talitlusandmed spetsialiseeritud aegridade andmebaasis nii, et andmed on alati saadaval ja võimaldab andmete kasutamist kõikidel ettevõtte tasanditel. PI süsteemi oluliseks eeliseks on efektiivne andmebaas, mis võimaldab suurt hulka andmeid arhiveerida väikse ruumikuluga ja seega võimaldab säilitada pikaajalist andmebaasi.

Loodud PI süsteemi üldine arhitektuur on toodud joonisel 2.1.



Joonis 2.1 Uurimistöös esitatud süsteemi seadmete vaheliste side topoloogia.

PI süsteem kogub andmeid läbi viie erineva ühenduse, mida kasutatakse andmete kogumiseks erinevatest süsteemidest. Neid ühendusi kirjeldavad järgmised harud:

1. Tuuleelektrijaama ühendus läbi OPC-DA serveri.
2. Tuuleelektrijaama ühendus läbi OPC XML-DA serveri.

3. Alajaama ühendus läbi kaugterminali ja OPC XML-DA serveri.
4. Alajaama ühendus läbi kohtterminali ja OPC XML-DA serveri.
5. Seadmete ja veebiportaalide ühendamine läbi failide vahetuse.

Esimesed kaks haru kirjeldavad andmete liikumist tuuleelektrijaamast PI süsteemi. Elektrienergia tootjate seas on saanud tavaliseks pakkuda ligipääsu nende arendatud süsteemidele läbi OPC andmestandardi. Kasutusel on peamiselt OPC-DA ja OPC XML-DA standardid. Elektrienergia tootjad pakuvad tavaliselt juba seadistatud OPC servereid, mis lubavad lisaks ülekandele ka väärtuste kirjutamise võimalust, väärtuste kirjutamise võimalus lubab käivitada elektrienergia juhtimisprotseduure tuuleelektrijaama serveris. Kasutatud OPC standarditest on eelistatum OPC XML-DA, kuna OPC XML-DA on suhteliselt lihtsalt seadistatav ja töötab ka interneti kaudu.

Kolmas haru ehk alajaama ühendus läbi kaugterminali ja OPC XML-DA serveri kirjeldab tuuleelektrijaama alajaamade standard andmeedastust. Kaugterminal ehk RTU edastab elektrijaama olulisema informatsiooni ja võimaldab võrguoperaatoril elektrijaama võrgu kaudu juhtida. Kaugterminali informatsioon edastatakse võrguoperaatorile läbi IEC 60870-5-101 ja IEC 60870-5-104 protokollide, kuid PI süsteemi ühenduste lihtsustamiseks on otsustatud kasutada ainult OPC standardit, mis töötab server-klient põhimõttel. Selleks, et sideprotokollide erinevuse probleemi lahendada kasutatakse OPC serverit, mis ühendatakse samase võrku kui kohtterminal. Selle OPC serveri näol on tegemist mitteseadistatud kolmanda osapoole serveriga, mis tähendab, et selle seadistamisel tuleb kaardistada erinevad andmepunktid ühest protokollist teise. Edasine ühendus toimub läbi standard OPC liideste.

Neljas haru, ehk alajaama ühendus läbi kohtterminali ja OPC XML-DA serveri, kogub samuti alajaama seadmete infot, kuid erinevalt kolmandast harust, kus kasutatakse kaugterminali, kogutakse info otse kohtterminalidest ehk IED-st. Kohtterminalid koguvad informatsiooni kõikidest tähtsamatest alajaama lülitest sealhulgas trafo, fiidri voolu ja pingetrafo ja võimsus-, lahk-ning maanduslülitid. Kohtterminalide ühendamiseks kasutatakse IEC 61850 standardit, mis on spetsiaalselt välja töötatud alajaama automaatika jaoks. Sarnaselt kaugterminalile on selle ühenduse jaoks kasutatud kolmanda osapoole OPC serverit, mis kogub erinevatest seadmetest andmed ja kaardistab need OPC rakenduste jaoks [17].

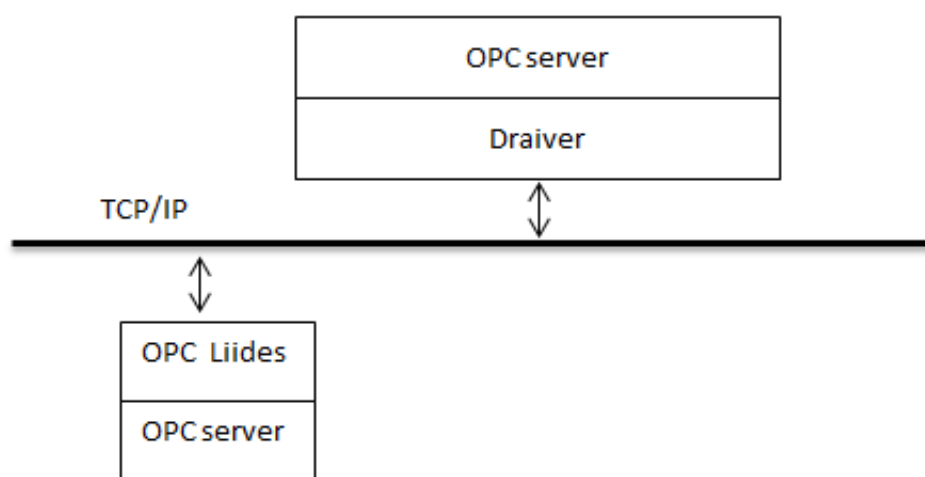
Viies haru, ehk seadmete ja veebiportaalide ühendamine läbi failide vahetuse, kirjeldab ühendusi, mille puhul andmete edastus läbi OPC sideprotokolli ei ole võimalik, kuid serverid on võimelised andmeid edastama kas XML, CSV või TXT failina. Failide selline edastamine toimub erinevate protokollidega aga peamiselt, mida ühenduseks kasutatakse on FTP (*File*

*transfer protocol*) serverid, kust FTP rakendused saavad automaatselt andmeid vahetada, e-maili serveri. Paljud kaugmõõtmisseadmed on varustatud lisaseadmetega oma mõõtmistulemuste regulaarselt e-mailiga saatmiseks, ja veebiserveritega mis edastavad info XML failidena. Seadmed, mida nii süsteemi ühendatakse on tuulemõõte mastid, LIDAR-d, SODAR-d ning ka paljud veebilehed ja teenusepakkujad. Tuulemõõtemastide ja SODAR/LIDAR tehnoloogia kasutus tuuleenergeetikas on oluline, kuna võimaldab täpsemaid tuule mõõtmisi, kuid nende andmete ühtlustamine elektrituuliku andmetega osutub tihti keeruliseks suure mitteautomatiseeritava käsitöö hulga tõttu. Automaatselt samasse süsteemi laetuna on see protsess kiire ja lihtne. On oluline, et selline süsteem suutaks andmeid koguda ka teenusepakkujatelt, kes operaatorile teevad toodangu ja tuule prognoose. Toodangu ja tuule prognoosid on olulised hoolduse planeerimisel ja toodangu optimeerimisel.

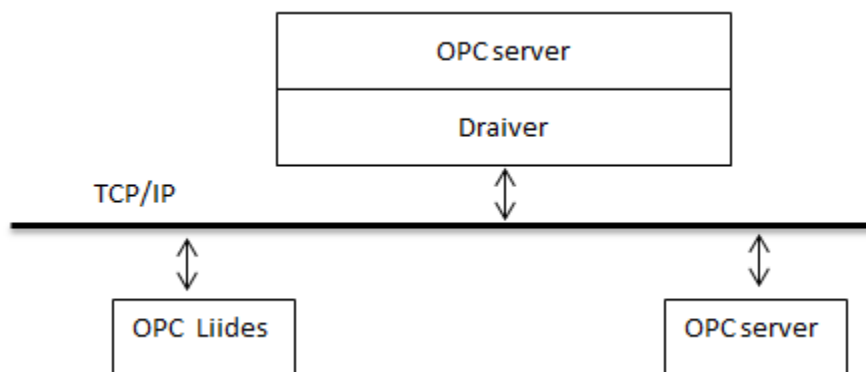
## 2.2. Liidesed

OPC liidesed (*OPC interface*) on klient rakendused, mis suhtlevad OPC serveriga ja edastavad andmeid arhiveerimise ja reaalaaja jälgimise serverisse. OPC liidest võib seadistada selliselt, et see töötaks samas süsteemis kui OPC server, arhiveerimise server või täiesti erinevas süsteemis.

Joonisel 2.2 on toodud võrguskeem, mis lubab liidese tasemel andmete puhverdamist ja joonisel 2.3 on toodud võrguskeem, kus liides asub eraldi arvutis.



Joonis 2.2 OPC liidese tasemel puhverdamist võimaldav ühendus [18].



Joonis 2.3 Eraldi võrgus asuva OPC liidese ühendus [18].

Liidese tööd võib kirjeldada järgmiselt:

- Ühenduse loomine arhiveerimise ja reaalaja jälgimise serveriga
- Seadistatud andmepunkti nimekirja laadimine serverist
- Ühendus OPC serveriga
- OPC gruppide loomine
- Üksikobjektide lisamine gruppidesse
- Gruppide aktiveerimine
- Andmekogumise alustamine

Pärast algusprotsesside läbimist töötab liides sõlmprotsessis, mis sisaldab järgmiseid ülesandeid.

- Teeninda plaani järgsed sisendpunktid ja menetle iga skaneerimisklass vastavalt järjekorrale
- Teeninda iga väljund punkt vastavalt sündmustele
- Teeninda iga „päästikuga“ sisendpunkt vastavalt sündmustele
- Kontrolli kas arhiveerimise ja reaalaja jälgimise serveri andmepunkti nimekirjas on toimunud muutus.

Andmeid loetakse OPC serverist liidese käivitamisel moodustatavate gruppide kaupa,. OPC server puhverdab kõige viimased andmed ja liides loeb andmed puhvrist. Kui liides loob OPC serveris grupid, seadistab liides grupis andmete uuendamise sageduse. OPC liides võib oma ajatemplites kasutada nii enda süsteemi aega kui ka OPC ajatempleid. See võimalus on oluline reaalajajälgmissüsteemi andmete aegade ühtlustamiseks [18].

Andmete puhverdamine on nende andmete ajutine säilitamine, mida liides kogub ja arhiveerimise serverisse edastab. Vältimaks andmete kadu aegadel kui liides ei saa ühendust

arhiveerimisserveriga võimaldab liides ladustada andmed liidese mälusse, seni kuni ühendus taastub. Ühendus, mis puhverdamist võimaldab on toodud joonisel 2.2.

OPC liidese skaneerimine gruppide kaupa võib toimuda kolme erineva põhimõtte alusel

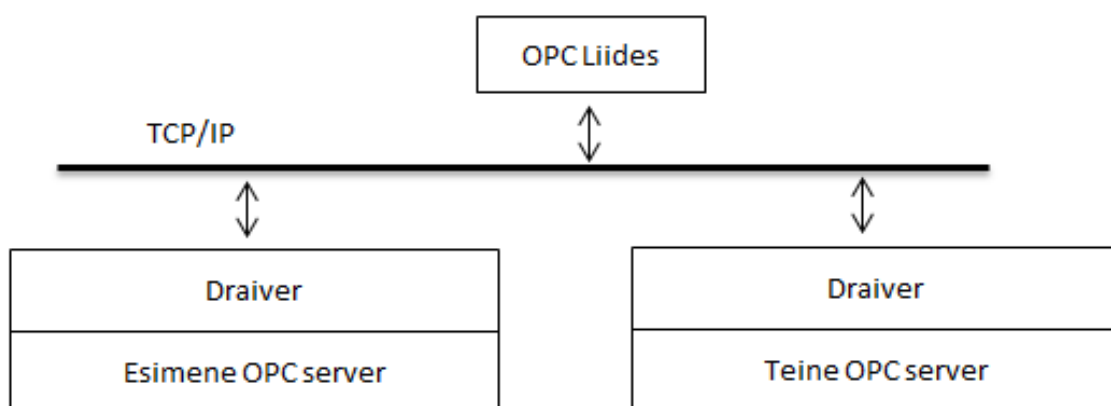
- Pollimise põhimõttel
- Sündmuse põhimõttel
- Nõustamise põhimõttel

Pollimise põhimõttel töötav skaneerimine tähendab, et informatsiooni vahetuse liidese ja serveri vahel toimub kindlate ajavahemike järel. Sündmuse põhimõttel töötav skaneerimine tähendab, et informatsiooni vahetus toimub siis kui liides saab teate, et päästikandmepunkt on saanud uue väärtuse. Nõustamispõhimõttel skaneerimine tähendab, et informatsiooni vahetus toimub pärast seda kui OPC server saab uue väärtuse [18].

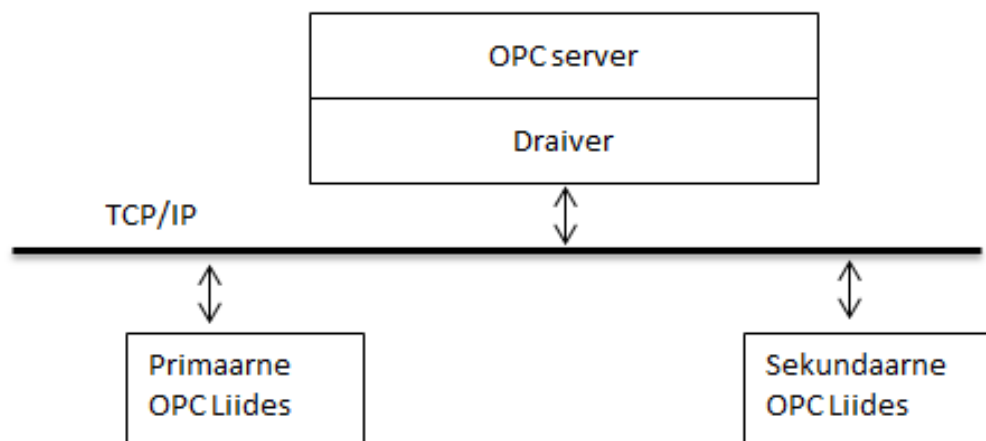
Andmete täielikkuse saavutamiseks võimaldab OPC liides liiasust (*redundancy*) nii OPC serveri tasemel kui ka liidese tasemel.

Serveri tasemel tähendab liiasus, et liidest võib seadistada vahendama OPC serverit juhul kui OPC server ei ole kättesaadav või OPC serveri andmete kvaliteet muutub. Sellisel juhul on andmekogumine kindlustatud kõige madalamal tasemel ja andmete kogumine on tagatud serveriga ühenduse katkemisel. Serveri tasemel on liiasus toodud joonisel 2.4 [19].

Liidese tasemel liiasus tähendab, et kaks liidest töötavad samal ajal, kuid ainult üks saadab andmeid arhiveerimise serverisse. Vahetus kahe liidese vahel toimub juhul kui päästikandmepunktide kvaliteet või väärtus muutub. Liidese liiasus on toodud joonisel 2.5 [19].



Joonis 2.4 Serveri tasemel liiasus, kus süsteemi kindlust tagab liidese kiire ühendamine dubleeritud serveriga [19].

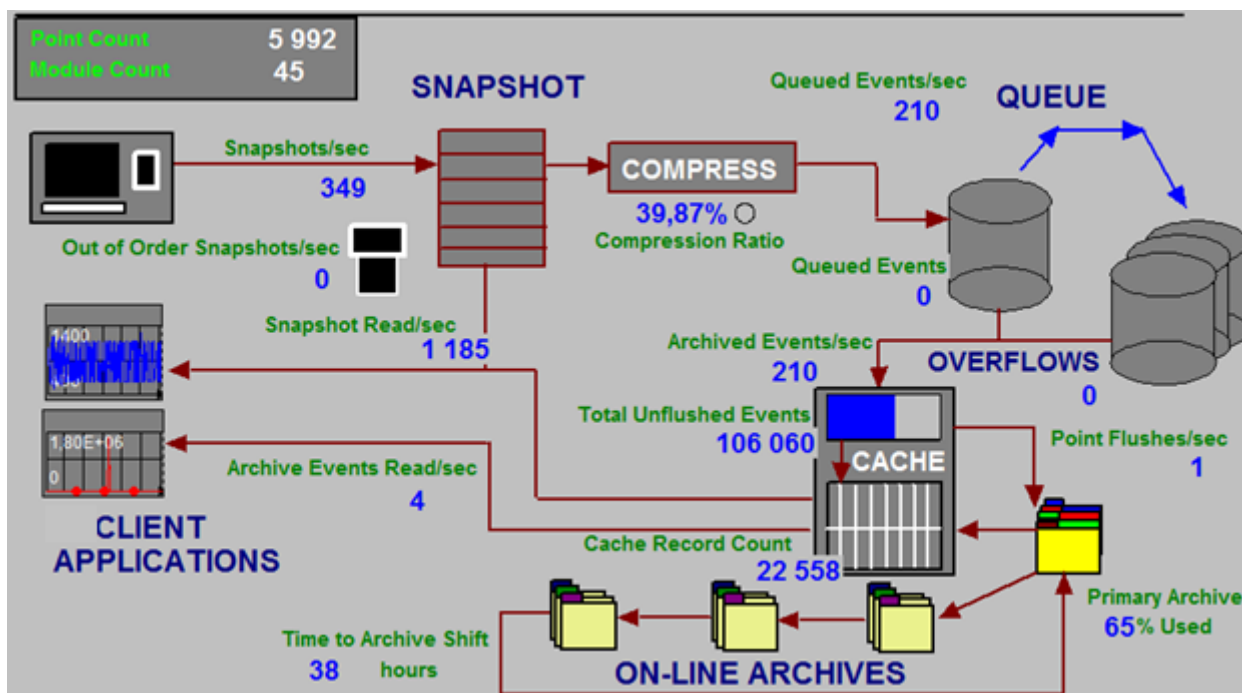


Joonis 2.5 Liidese tasemel liiasus, kus süsteemi kindlust suurendab liidese vahetus ühenduse vea korral [19].

Jooniselt 2.1 on näha, et OPC liideseid on paigaldatud samasse võrku, kui OPC serverid ja riistvara paikneb tuuleelektrijaamas. Sellise lahenduse puhul saab kasutada OPC liidese tasemel puhverdamist. Süsteem kasutab liidese tasemel liiasust, et vältida andmete kaotsi minekuid võimaliku serveri ja liidese vahelise kommunikatsiooni vea tõttu.

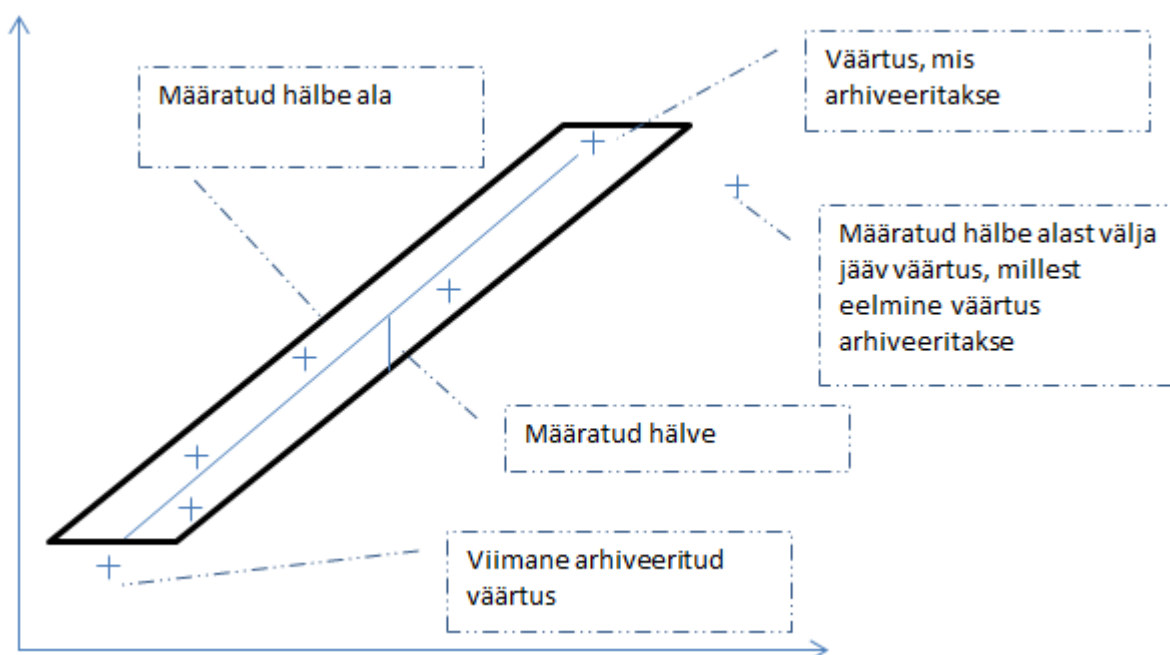
### 2.3. Server

Serveri töö käigus jagatakse serverisse tulevad andmed kahte rühma. Joonisel 2.6 on kujutatud arhiveerimise ja reaalaja jälgimise süsteemi serveri töö põhimõtted. Joonisel 2.6 kujutatud „*snapshot*“ on hetke andmed ja server võimaldab kasutada neid andmeid peale esmast töötlust plaanipärastes arvutustes ja serveri klient programmid saavad neile andmetele kohe ligipääsu, et reaalajajälgimissüsteem töötaks võimalikult kiiresti. „*Snapshot*“ väärtused muutuvad iga kord kui uued andmed selle andmepunkti kohta süsteemi sisse tulevad. Kõik sisse tulevad andmed läbivad andmetötluse algoritmid, mis vähendab arhiveeritavate andmete mahtu. Serveris on iga andmepunkt, olgu see siis serveri sisene arvutus või OPC serverist kogutud mõõtetulemus, seadistatud kindla nimesildi alla. Iga andmepunkti kohta võib määrata tema skaala ning kuidas andme pakkimise algoritmid andmepunkti andmeid peaks töötleva. Iga andmepunkti aja sünkroniseerimine sõltub neist seadistustest. Näiteks kas andmepunkt saab ajatempli serveri enda poolt või kasutatakse andmete kogumisel kaasa tulnud ajatemplit [20].



Joonis 2.6 Serveri andmekogumise ja arhiveerimise ülevaatlik skeem.

Server kasutab kokkupakkimise algoritmi mida nimetatakse pöördukse kokkusurumis/pakkimis, (*swinging door compression*), meetodiks. See meetod jätab välja väärtused, mis jäävad kahe arhiveeritava andmepunkti vahele. Kui uus andmepunkt tuleb „*snapshot*“ süsteemi, siis eelnev andmepunkt jäadvustatakse arhiivi eelmise „*snapshot*“ väärtuse ja ajatempliga. Väärtus arhiveeritakse ainult siis kui see jääb välja etteantud kõrvalekalde piiridest. Algoritmi seletus on toodud joonisel 2.7 [21].



Joonis 2.7 Andmete pakkimise algoritm, mis vähendab süsteemi kogutavaid andmemahhte [21].

Peale andmete arhiveerimise on serveri peamiseks funktsioonideks on luua andmepunkte serveris, mis arvutatakse kasutades planeerijaid. See rakendus pakub kasutajale sisse programmeeritud valemeid ja funktsioone, mis võimaldavad arvutada tuuleelektrijaama jaoks vajalikke suurusi ja enda genereeritud veateateid. Need arvutused võivad sisendina kasutada nii hetkeväärtusi kui ka arhiveeritud väärtusi. Arvutused võivad olla nii sündmuse põhised kui ka aja põhised. Sündmuse põhiste arvutuste puhul toimub arvutus juhul kui muutus toimub päästikandmepunktis. Ajapõhise arvutuse korral toimub arvutus kindla ajavahemiku möödumisel. [21]

Serveris on erinevad väljundliidesed võimaldamaks kasutada kogutud andmeid andmete analüüsi rakendustes, hoolduste planeerimisel ja seadmete jälgimisel. Server võimaldab järgmisi ühendusi andmepäringuteks:

- SQL serveril põhinev ühendus nagu OLEDB
- SQL serveril põhinev ühendus JDBC
- OPC spetsifikatsioonil põhinev ühendus

SQL serveril põhinev andmeühendus võimaldab serverisse kogutud andmetele näiteks relatsioonandmebaasile ligi pääseda ning kasutada SQL päringuid andmete edastamiseks. OLEDBi kasutakse Windows süsteemis ja JDBCi kasutatakse teistel operatsioonisüsteemidel. OPC spetsifikatsioonil põhinev ühendus muudab arhiveeriva serveri OPC serveriks.

## **2.4. Reaalajajälgimissüsteemi kasutajaliides**

Reaalajas jälgimine ja juhtimine on elektritootmise ja elektriülekanne infrastruktuuri ettevõtetes muutunud üldkasutatavaks. Reaalajajälgimissüsteemid koos juhtimiskeskustega, mis pidevrežiimis jälgivad tuuleelektrijaamade ja elektrituulikute tööd on muutunud tuuleenergeetika lahutamatuks osaks. Reaalajajälgimissüsteemid ja juhtimiskeskused pakuvad kõige efektiivsemaid meetodeid ja võimalusi maksimeerimaks elektrituulikute toodangut. Eelmises punktis kirjeldatud reaalajajälgimissüsteem võimaldab:

- Efektiivselt kontrollida tuuleelektrijaamade grupi tootlikust
- Võrrelda väljundeid tuuleelektrijaamade vahel
- Võrrelda elektrituulikute väljundit tootja spetsifikatsiooniga
- Võrrelda ennustatud ja tegelikku energia toodangut
- Detailset algpõhjuste diagnoosi
- Optimeerimise tulemuslikkuse hindamist
- Erinevate elektrituulikute tüüpide tootlikkuse hindamist



- Tuuleelektrijaama finantsanalüüsi

Efektiivne tuuleelektrijaamade grupi tootlikkuse kontrollimine on võimalik, kui reaalaajajälgimissüsteem on üles ehitatud hierarhiliselt, nii et süsteem kogub infot nii elektrituuliku, tuuleelektrijaama kui ka tuuleelektrijaamade gruppide tasemelt. Igalt tasemelt saab koguda erineva kasutuseesmärgiga infot, mille alusel saab muuta tuuleelektrijaamade gruppide informatsioon võrreldavaks. Andmed, mida erinevatelt hierarhilistelt tasemelt kogutakse on toodud Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Reaalaajajälgimissüsteemi kasutaja liidese ideelised tasemed andmete visualiseerimiseks.

Tase hierarhias	Andmed
<b>Elektrituulik</b>	Alarmid, võimsus kõverad, toodang ja väljund parameetrite statistika.
<b>Tuuleelektrijaam</b>	Tuuleelektrijaama asendiplaan, asukohta topograafia, tuule ressursside andmed ja elektrituuliku tulemuslikkuse indikaatorid.
<b>Tuuleelektrijaamade grupp</b>	Geograafiline asend, elektrituulikute vanused, tüübid ja nimivõimsused, tuuleelektrijaama tulemuslikkuse indikaatorid.

Visualiseerides kogu elektrituulikute gruppi, kasutades selleks hierarhilist ülesehitust, on võimalik anda jooksev ülevaade elektrituulikute tööst ja võrrelda geograafiliselt sarnastes tingimustes olevate elektrituulikute tööd omavahel. Geograafiliselt lähedaste tuuleelektrijaamade üksteisega võrdlemine võimaldab leida valesi mõõdetud väärtuse kahtlusega juhtumeid, jäätumiskadusid ning muid kõrvalekaldeid oodatavatest väärtustest. Tuuleelektrijaamade grupi tasemel võrdlemine võimaldab ka erinevate elektrituulikute tüüpide analüüsi juhul kui sama tüüpi elektrituulikuid leidub erinevates tuuleelektrijaamades.

Regulaarne elektrituulikute jälgimine on efektiivne meetod elektrituulikute toodangukadude vältimiseks. Kõige lihtsamal tasemel võimaldab elektrituulikute regulaarne jälgimine kaugjuhtimise kaudu elektrituulikuid uuesti käivitada, mis võimaldab vähendada seisakuaegu ja seeläbi kaotatavat toodangut.

Elektrituulikud annavad veateate ja automaatselt seiskavad ennast mitmetel erinevatel põhjustel, selleks et tagada ohutust ja vältida rikete süvenemist ja levikut. Enamus elektrituuliku seiskamise käske on programmeeritud elektrituulikute juhtimissüsteemi, selleks et kaitsta elektrituuliku enda seadmeid. Näiteks veateated, mille puhul elektrituuliku kaugjuhtimisega taaskäivitamine on tavaline, on elektrituuliku vibratsiooni taseme ületamise ja laba kalde juhtimissüsteemi

veasignaali järgsed taaskäivitamised. Elektrituuliku vibratsiooni taseme ületamisest põhjustatud seiskumine tuleneb sageli resonantsnähtustest elektrituulikus, mis ilmnevad ainult teatud kindla tuule suuna ja kiiruse puhul. Laba kalde juhtimissüsteem ei suuda mõnikord piisavalt kiiresti reageerida puhangulise tuule kiiruste järskudele muutustele. Elektrituulikute taaskäivitamine toimub vastavalt veatüübile kas automaatselt, kaugelt või kohapeal elektrituulikust. Eelkirjeldatud vigadest tingitud seiskumiste järgselt toimub automaatne taaskäivitamine ainult kindla arvu kordi, seejärel peab süsteemi kaugjuhtimise kaudu taaskäivitama. Regulaarne elektrituulikute jälgimine võimaldab operaatoril leida need juhud, kus elektrituulik ei saa ennast automaatselt taaskäivitada. Samuti võimaldab regulaarne jälgimine avastada seiskumisi, mida peab taaskäivitama kohapeal elektrituulikust ning saata välja hooldusmeeskond probleemi tuvastama ja lahendama.

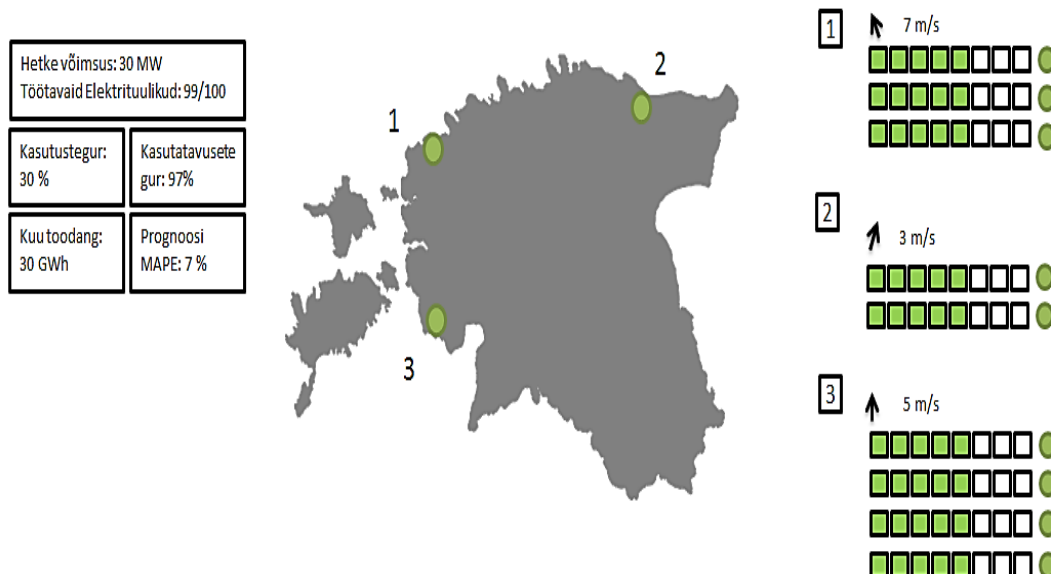
Elektrituulikute väljundi tootja spetsifikatsiooniga võrdlemine ja detailne algpõhjuste diagnoos on üks peamisi reaalajajälgimissüsteemi andmeanalüüsi suundi. Rutiinne andmeanalüüs annab lisavõimaluse leida tuuleelektrijaamade toodangukadusid. Optimeerimise tulemuslikkuse hindamine on samuti analüüsi tulemus, mis püüab hinnata kas elektrituuliku väljund sarnastel tingimustel on suurenenud või kas elektrituuliku vigade arv ajas on läbiviidud optimeerimise tulemusel vähenenud.

Tegeliku toodangu ja prognoositud toodangu ning finantsprognoosi ja finantsanalüüsi võrdlusandmed, millised saadakse elektrituulikute andmete töötlemisel, on vajalik informatsioon elektrituru tingimustele kohandamiseks ja selleks vastavate elektrituulikute toodangute modelleerimiseks.

#### **2.4.1. Visualiseerimine**

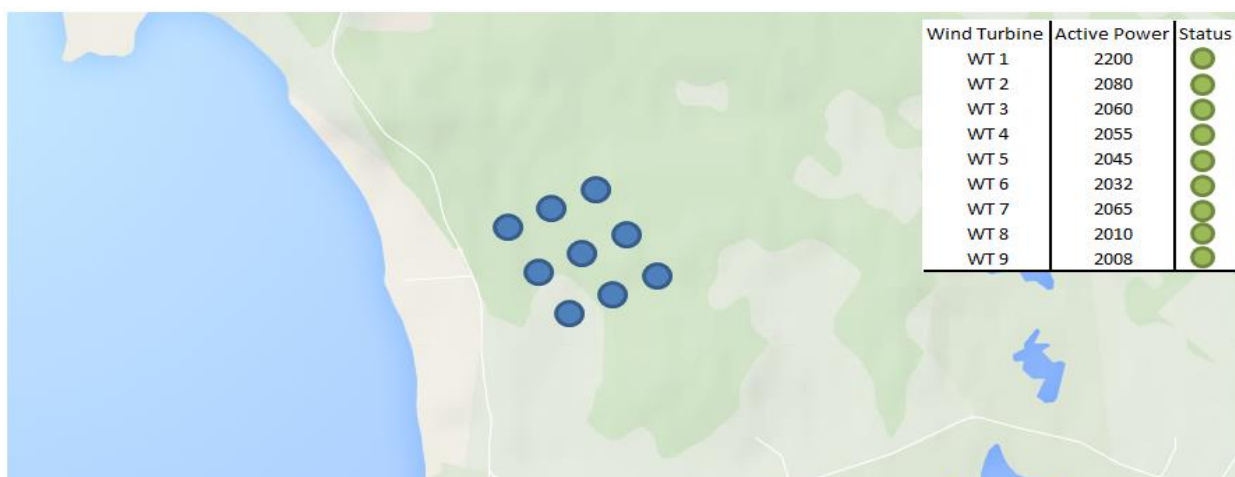
Reaalajajälgimissüsteemi kasutajaliidese peamiseks eesmärgideks on reaalajajälgimissüsteemi andmete esitamine kujul, mis võimaldab andmete analüüsi, sisaldades lihtsamaid andmeanalüüsi rakendusi ning pakkudes ka võimalust andmete alla laadimiseks, et kasutajad saaks vajadusel rakendada rohkemate võimalustega arvutusmudeleid sealhulgas programmides Excel või Matlab. Kasutajaliidese ülesehitus põhineb andmete hierarhilisel esitamisel. Kasutajaliidese esimese taseme vaate eesmärk on anda üldülevaade tuuleelektrijaamade grupi andmetest. Joonisel 2.8 on kujutatud kasutajaliidese esimese taseme vaade. Esimese vaate andmekäsitus on jagatud kolme rühma:

1. Tuuleelektrijaama grupi tulemuslikkuse indikaatorid
2. Tuuleelektrijaama grupi geograafilised andmed
3. Tuuleelektrijaamade geograafiliselt jagatud grupi info



Joonis 2.8 Visualiseerimise esimene tase, kus esitatakse ülevaade tähtsamatest tootlikkuse indikaatoritest ja elektrituulikute seisunditest.

Tuuleelektrijaama grupi tulemuslikkuse indikaatorid annavad võimalikult kiiresti võimaluse hinnata ajaperioodi tuuleelektrijaama toodangut ja prognooside täpsust. Tuuleelektrijaamade grupi geograafiline info annab edasi tuuleelektrijaamade paiknemise geograafilisel kaardil. Peale üldise asendi määramise peavad olema lisatud ka kõikide tuuleelektrijaamade topoloogiad, mis on kasutatavad analüüsiks varjutusi, keeriseid ja teisi tuulega seotud nähtusi. Selline vaade on kujutatud joonisel 2.9. Tuuleelektrijaamade grupeerimine vastavalt nende paiknemisele ja vastavalt sellele info edastamine võimaldab operaatoril kiiresti otsustada selle üle kas tuuleelektrijaama töö vastab oodatule. Samuti on kasulik koguda tuule infot vastavalt elektrituulikute erinevatele gruppidele ühe tuuleelektrijaama piires.



Joonis 2.9 Tuuleelektrijaama geograafiline tase.

Visualiseerimise järgmine, teine tase, mis on tihti operaatorile kõige olulisem, on veateadete ülevaade vastavalt tuuleelektrijaama gruppidele või tuuleelektrijaama alamtasemele nagu tuuleelektrijaama elektrituulikute geograafiline grupp. Teine tase on kujutatud joonisel 2.10. Teise taseme vaate eesmärk on esitada ülevaade hetke veateadetest, teise taseme vaade on esitatud maatriksi kujul. Maatriksvaate juures on olemas valik, mille kaudu on võimalik näha elektrituuliku veateadete ajalugu. Veateate ajaloo analüüsimine on oluline, kuna sageli on veateated seotud teatud dünaamiliste protsessidega ja elektrituuliku seisaku põhjustanud rike ei ole alati kõige hilisem veateade.

Süsteem	Tuuleelektrijaam I	Tuuleelektrijaam II	Tuuleelektrijaam III	Tuuleelektrijaam IV
Anemomeeter	2			
Juhtseade			1	
Käigukast		1		
Generaator				4
Elektrivõrk				
Pidurid				
Muundur		4		
Hooldus			4	
Trafo				
Gondli suuna süsteem			5	
Laba kalde süsteem		5		

Aeg	Elektrituulik	Kirjeldus	Kood	Kestvus
21.05.2015 17:31	WT 5	Pitch Fault	AM90	15:11:18
21.05.2015 17:31	WT 5	Sensor Timeout I/O	AM12	0:00:14
21.05.2015 15:37	WT 3	Pump Fault	AM122	23:16:17
21.05.2015 15:16	WT 3	Lubrication system fault	AM344	0:20:58
21.05.2015 15:14	WT 3	Inverter fault	AM78	0:01:59
21.05.2015 15:14	WT 3	Generator Fan inverter fault	AM1	0:00:05
21.05.2015 15:10	WT 3	Pitch control fault	AM0	0:03:37
21.05.2015 15:07	WT 3	Test mode	AM56	0:03:35
21.05.2015 15:06	WT 3	Temperature fault	AM89	0:00:50

Joonis 2.10 Tuuleelektrijaamade veateadete maatriksi ja viimaste veateadete informatsiooni visualiseerimine.

Visualiseerimise kolmas tase on ülevaade elektrituulikute parameetritest tuuleelektrijaama tasemel. Selline vaade annab võimaluse saada korraka ülevaade erinevatest parameetrite väärtustest ja võimaldab kiiresti leida need parameetrid, mis on väljaspool piirväärtusi.

Visualiseerimise neljas tase on andmete analüüsi rakendus, mis võimaldab näha andmete ajalugu graafilise väljundi kujul. Lihtsamal kujul sisaldab graafiliselt esitatud analüüs andmeid kujutatuna ajagraafikuna, erinevate väärtuse omavaheliste suhete graafiku või diagrammina või radarikujundina tuule andmete jaoks.

#### 2.4.2. Automatiseerimine

Kasutajaliidese juures on vaja automatiseerida teavitused ning hoolduse ja toodangu prognooside planeerimine. Elektrituulikute dispetšjuhtimissüsteemi sisse programmeeritud teavitused on tihti piiratud kas ainult veateate teavitussüsteemiga või puudub dispetšsüsteemis oma teavituse

funktsioon täielikult. Kasutajaliidese tasemel teavituste automatiseerimine on efektiivne viis vähendamaks elektrituulikute toodangukadu kuna võimaldab operaatoritel kiiresti reageerida erinevatele vigadele. Teavitussüsteem kujutab endast normaalväärtuste piirkonnast väljumise määramist, veateate tüübi valimist, sellise veateate eristamist millele operaator peab kindlasti reageerima, sealhulgas eristama veateated, mille puhul elektrituuliku automaatne taaskäivitus ei toimi. Teavitus kasutab erinevaid kaugside võimalusi, sealhulgas, SMSi ja E-posti.

Elektrituuliku operaatori üks olulisemaid andmebaase on elektrituulikute hoolduste andmebaas. Kaasaegne hoolduste andmebaasi täitmine on automatiseeritud kasutajaliidese ja andmebaasi kogutakse kogu infot hooldusmeeskonnale tehtud väljakutsetest iga elektrituuliku kohta, hoolduse andmebaasist peavad näha olema kõik aktiivsed ja ajaloolised elektrituulikuga seotud probleemid, samuti peab hoolduse andmebaas sisaldama iga probleemi kohta inseneride vahel vahetatud infot. Hoolduse planeerimise esimene vaade on kalendri põhine navigatsioonivahend, mis võimaldab valida ajaperioodi, millal planeeritud töö või probleem esineb. Valides ajaperioodi on võimalik täita hoolduse või probleemiga seotud infolahtrid, sealhulgas:

- Millise seadmega on ettenähtav probleem või töö seotud
- Määrata täpne ajaperiood, mille jooksul probleem või töö on aktiivne
- Määrata, mis seisus on elektrituulik selles perioodis, ehk kas tegemist on seisakuga või võimsuspiiranguga.
- Üldine infolahter, kuhu saab lisada väljastpoolt süsteemi infot.
- Infolahter, kuhu saab kiiresti lisada infot reaalajajälgimissüsteemist, näiteks veateateid.

Hoolduse planeerimise kirjete loomise järgselt saab hooldusmeeskond või operaator lisada infot tehtud tööde kohta ja kasutatud materjalide kohta. Selline info on vajalik järgmiste perioodide hoolduste planeerimiseks ja erinevate materjalide vastupidavuste analüüsiks, kuid hoolduste andmebaasi kõige suurem kasu tuleb tulevikus vigade diagnoosimise lihtsustumisest ja selle täpsuse suurenemisest. Tuuleenergia tootmise juures on käesoleval ajal vajalik toodangu prognoosimine järgmiseks päevaks. Toodangu planeerimise juures on määrava tähtsusega teada kas elektrituulik seisab või on selle võimsus piiratud ning selle seisundi ajaline kestvus. Automatiseerida saab tuuleelektrijaamade väljundvõimsuse hooldusega seotud muutused iga tunni kohta, mis muudab lihtsamaks arvutusmodelite kasutamise toodangu prognooside koostamisel.

### **3. Reaalajajälgmissüsteemi andmete kasutamise metoodika**

Modernsed tuulikud on tänapäeval varustatud suure hulga erinevate sensoritega, millede peamine eesmärk on elektrituuliku efektiivsem juhtimine, näiteks aktiivne laba kalde reguleerimise süsteem, või süsteem juhtimine ohutuse tagamiseks, näiteks liigpingete ja ületemperatuuride vältimine. Elektrituuliku sensorid edastavad peakontrollerisse tavaliselt toorandmeid sagedusega andmeid (1 Hz kuni 0,1 Hz). Elektrituuliku dispetsjuhtimissüsteemi andmed on lihtsalt kättesaadavad ja sisaldavad palju väärtuslikku infot elektrituuliku töö ja komponentide oleku ja koormuste kohta. Peale selle on elektrituuliku dispetsjuhtimissüsteemi andmete modelleerimise kaudu võimalik avastada elektrituulikute selliseid vigu, millede mõju komponentidele on vähem intensiivne kuid pikaajaline, ning milliseid ei ole lihtsalt avastatavad seisundi seiresüsteemiga. Seisundi seiresüsteemid (CMS) suudavad tavaliselt avastada seadme kahjustusi mõõtes ja analüüsides füüsikalisi parameetrid, mis on sõltuvad kahjustusest ja muutuvad vastavuses komponendi kahjustuse arenguga. Näiteks valed seaded laba kalde juhtimise või gondli pööramise süsteemis võivad suurendada elektrituulikule mõjuvat koormust, kuid selliste valede laba kalde juhtimise või gondli pööramise süsteemi seadete mõju seadmete vibratsioonile, mida seisundi seiresüsteem suudab jälgida, on väike. Kuigi dispetsjuhtimissüsteemi andmeid saab efektiivselt kasutada elektrituulikute töö jälgimiseks ja selle kohta järelduste tegemiseks siis paljudel juhtudel ei ole seos nende andmete ja süsteemi vearežiimide vahel koheselt ja vahetult selge ning vajab elektrituulikute töö piisava detailsusega modelleerimist [22].

Reaalajajälgimissüsteemi andmekogumisserveri arvutusmootori abil on reaalajajälgimissüsteemi juurde lisatud elektrituuliku töös anomaaliaid otsivad analüüsid. Tähtsamad analüüsid on automaatselt kasutajaliidesesse salvestatud, et nende kasutamine operaatori poolt oleks võimalikult kiire. Nende analüüsides idee on pakkuda ennustava vajaduspõhise hoolduse võimekust, mis pikemas perspektiivis võimaldab vähendada hooldusvajadust ning anda ka operaatorile oluliselt suuremaid valikuvõimalusi, millal konkreetseid hooldusi teha. Suurem valikuvõimalus hoolduste planeerimisel võimaldab planeerida hooldusi madala toodanguga perioodidele ja paremate ilmastikutingimustega päevadele, parandades nii tootmise kui ka hoolduse efektiivsust.

Efektiivseks elektrituuliku töö modelleerimiseks on vaja saavutada andmeedastuse, andmete hoiustamise ja analüüsimise piisav automatiseeritus. Lõppeesmärgina lubab elektrituulikute töö modelleerimine läbi statistilise analüüsi ja automatiseeritud tarkavara lahenduste leida ja

ennustada vigu, aidata paremini elektrituulikute töö hooldust planeerida, paranda logistikat ja leida probleemseid elektrituuliku, ennetada avariilisi seisakuid ja seeläbi tõsta elektrituulikute kasutamise efektiivsust.

Punktis esitatud graafikud on valmistatud kasutades Nelja Energia AS andmebaasi elektrituulikute andmeid.

### **3.1. Informatsiooni mudel**

Praktiliseks lahenduseks kuidas määrata piisava täpsusega elektrituulikute erinevaid töörežiime selleks on vaja kasutada informatsiooni mudelit, mis võtaks arvesse elektrituuliku igat võimalikku töörežiimi. Üks selline mudeli ülesehitus on välja pakutud IEC TS 61400-26-2 tehnilises juhendis.

Tabel 3.1 annab informatsiooni mudeli kategooriate ülevaate. Informatsiooni mudel koosneb neljast tasemest, mis defineerivad elektrituuliku olekud. Informatsiooni mudel määrab esmalt, kas elektrituuliku kohta on olemas informatsioon, sellisena et elektrituuliku olekut oleks võimalik määrata. Kui informatsioon elektrituuliku kohta on olemas siis järgmisena kontrollitakse kas elektrituulik on operatiivses olekus, mitteoperatiivses olekus või on elektrituulik vääramatu jõu tagajärjel seiskunud. Operatiivne olek on kõik sellised olekud, milles elektrituulik saab tavalises töörežiimis olla, mitteoperatiivsed olekud on defineeritud kui kõik sellised elektrituuliku olekud, mis on määratud ja tulenevad välistest käsklustest millega elektrituulik viiakse operatiivsest režiimist välja, sellisteks elektrituuliku oleku näideteks on hooldusrežiimis olek või võrguoperaatori poolt väljalülitatud olek. Operatiivne olek jaguneb omakorda olukordadeks, kus elektrituulik genereerib elektrienergiat ja mittegenereerivateks olekuteks. Sisemised mittegenereerivad olukorrad võivad tuleneda reageerimisest veateatele, liiga väikesest tuule kiirusest ja võrguriketest. Genereerivad olukorrad jagunevad normaaltöörežiimiks ja osaliseks töörežiimiks, osalise töörežiimi puhul elektrituuliku töö ei ole optimaalne.

Tabel 3.1 Informatsiooni mudeli tasemed [23].

Informatsiooni kategooriad			
Tase 1	Tase 2	Tase 3	Tase 4
Informatsioon saadaval	Operatiivne	Genereeriv	Normaalrežiim
			Osalise töö režiim
		Mitte genereeriv	Tehniline seisak
			Mittesobivad keskkonna tingimused
			Soovitud seisak
			Mittesobivad võrgutingimused
	Mitte operatiivne	Plaanitud hooldus	
		Plaanitud parandustööd	
		Rikked	
		Peatatud	
Vääramatu jõud			
Informatsioon ei ole saadaval			

Informatsiooni mudeli peamine eesmärk on automatiseerida tarkvara abil elektrituuliku töörežiimide määramine, et siis leida kõrvalekaldeid elektrituuliku normaalses töös. Joonis 3.1 esitab informatsiooni mudeli kolm kihti. Esimene tasand on aja tasand, kus kogutakse erinevate kategooriate ajalised kestvused. Näiteks kui kaua hooldus kestis, kaua elektrituulik taaskäivitus jne. Teine tase on mõõtmistulemused. Siia tasemesse kogutakse tegelikult mõõdetud parameetrite väärtused. Kolmas tase on arvutatud väärtused, mis peaks vastama teatud sisendile.

Aja kiht			
Mõõtmiste kiht			
Arvutuste kiht			
Informatsiooni kategooriad			
Tase 1	Tase 2	Tase 3	Tase 4
Informatsioon saadaval	Operatiivne	Genereeriv	Normaalrežiim
			Osalise töö režiim
		Mitte genereeriv	Tehniline seisak
			Mittesobivad keskkonna tingimused
			Soovitud seisak
			Mittesobivad võrgu tingimused
	Mitte operatiivne	Plaanitud hooldus	
		Plaanitud parandus tööd	
		Rikked	
		Peatatud	
Vääramatu jõud			
Informatsioon ei ole saadaval			

Joonis 3.1 Informatsiooni mudeli kihid, mis kirjeldab andmepunkti Informatsiooni [24].



Informatsiooni mudeli esimene kontroll peab olema andmeside korrektse töö kontroll. Vastavalt sidevõrgu ülesehitusele peab kontroll sisaldama vähemalt järgmisi kontrolle:

1. Tuuleelektrijaama serveriga sideühenduse olemasolu.
2. Andmepunkti väärtuste muutumiskiirus.
3. Andmepunkti väärtuste ettenähtud füüsilistesse piiridesse jäämine.

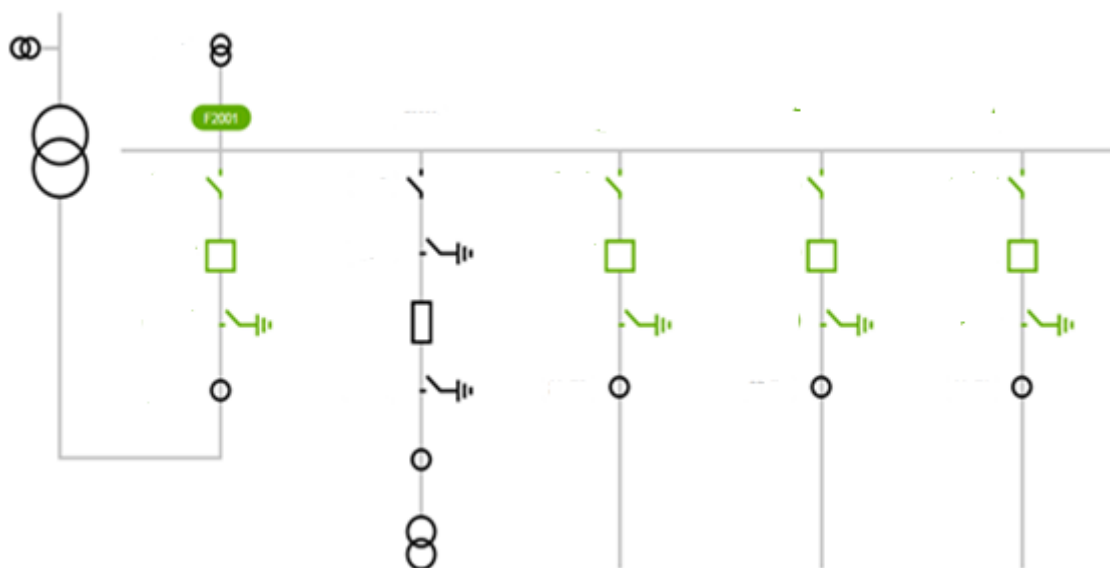
Sideühenduse kontroll on saavutatav läbi pingimise liidese, mis kontrollib ühenduse olemasolu ja andmepakettide edastamist seadmete vahel. Peale pingimise liidese on vaja kontrollida kas sensoritest tulevad ülekantavad andmed võivad muutuda sõltuvalt ettenähtud andmete vahetuskiirusest. Andmete muutumise kontroll on vajalik, kuna sideühenduse kontroll testib ühendust, kuni esimese serverini aga tavaliselt liigutatakse tuuleelektrijaama siseselt andmeid mitmete erinevate seadmete vahel, mille omavahelise side katkemine ei ole lihtsasti avastatav. Peale side puudumise peab informatsiooni kättesaadavuse kontrollimiseks testima ka sensorist edastatavate andmete ettenähtud füüsilistesse piiridesse jäämist. Andmete füüsilistesse piiridesse jäämist on vaja kontrollida nii ajatemplite kui ka väärtuste järgi. Ajatemplite järgi kontrollitakse kas väärtuse tõusu kiirus ei ole kiirem kui võimalik ja väärtusi kontrollitakse nende füüsiliselt võimalikesse piiridesse jäämise kriteeriumi alusel. Andmepunkti väärtuste kontrollimiseks on vaja arvutusliidest, mis võimaldab lahendada automatiseeritud loogika, agregaatide ja ajatempli kontrolli ülesandeid. Kasutades automaatset loogika kontrolli on võimalik moodustada veateateid iga eelpool toodud juhu kohta.

Informatsiooni mudeli teine kontroll seisneb elektrituuliku operatiivoleku kontrollis. Elektrituuliku dispetšjuhtimissüsteem annab tavaliselt edasi infot kas elektrituulik on välja lülitatud ja seega operatiivse oleku kontroll on lihtne loogika ülesanne olekut tähistava „lipu“ asendi kontrollimisega, aga kuna on võimalik, et elektrituuliku „lipp“ võib mingil põhjusel valesse seisusse jääda siis süsteem peab täiendavalt läbi elektrituuliku hetkevõimsuse kontrolli kontrollima kas elektrituulik seisab või töötab.

Kui elektrituulik on mittetöötavas olekus siis edasiseks kontrolliks tuleb kasutada hoolduse infosüsteemi, mis samuti kajastab millises olekus elektrituulik on. Hoolduse infosüsteem peab kajastama elektrituuliku olukorda ajateljel koos oleku põhjuste eristamisega. Hoolduse infosüsteemi andmete alusel on võimalik koostada arvutusmudeli jaoks „lippude“ süsteem, mis määrab kindlaks mudeli tööks vajalikud informatsiooni kategooriad.

Elektrituuliku genereerimisoleku testimiseks saab kasutada loogika alusel lahendatavat ülesannet, mis võtab arvesse elektrituuliku hetkevõimsuse ja sama ajahetke tuulekiiruse.

Kasutades neid andmepunkte saab kindalt öelda kas elektrituulik on vastaval ajahetkel töös või mitte.



Joonis 3.2 Tuuleelektrijaama sisese elektrivõrgu mudel reaalaraja jälgimissüsteemis.

Informatsiooni mudeli mittegenereerivate alamkategoriate määramisel saab peamiselt kasutada elektrituuliku veateateid, kus tavaliselt on kajastatud nii keskkonna tingimused, mille juures elektrituulik seiskus kui ka seiskumist põhjustanud erinevate tehniliste rikete tähised. Elektrivõrgu tingimuste kajastamiseks ja arvestamiseks on tarvilik ühendada peamiste elektrivõrgu elementide oleku ja seisundi andmevood reaalarajajälgimissüsteemiga. Andmevood ühendatakse tavaliselt läbi RTU (*Remote Terminal Unit*), mis kogub endasse võrguelementide informatsiooni, nagu võimsus-, lahk- ja maanduslülide asend ja erinevate rikete tähised, võrguoperaatori käsklused, nagu võimsuspiirangud ning peamised mõõtmisandmed, nagu alajaama latipinge ja fiidrite koormused. Kasutades RTU-dest tulevat infot saab tuuleelektrijaama elektrilise seisundi kontrollimiseks luua automaatse sisevõrgu mudeli, mis elektrilise skeemi alusel hindab kas, kuidas ja millised elektrituulikud on mõjutatud elektrivõrgu tööst. Joonis 3.2 on toodud näide automaatsest sisevõrgu mudelist, mis hindab fiidrite kaupa, millised elektrituulikud on mõjutatud vastavatest seisundit tähistavate lippude oleku muutumisest.

### 3.2. Normaalrežiimi ja osalise töörežiimi määramine

Tuuliku modelleerimise juures on üks raskemaid ülesandeid elektrituulikute töö normaalse töörežiimi defineerimine. Kuna elektrituuliku töörežiimi peamised parameetrid, nagu võimsus ja rootori pöörlemiskiirus on süsteemi sisendi, (s.o. tuule kiiruse), muutumise tõttu pidevas

muutumises, siis on tihti keeruline määrata tuuleelektrijaamas elektrituulikute erinevaid seisundeid selliselt, et saaks teha järeldusi elektrituuliku normaalrežiimis või sellest kõrvale kalduvas režiimis töötamise kohta. Seisundi määramiseks erinevate elektrituulikute puhul on vajalik selline mudel, mis teatud sisendite kombinatsiooni puhul annab sellise väljundi milles selgub süsteemi kõrvalekalle optimaalrežiimist. Elektrituulikute jaoks sellise mudeli tegemisel keerukus seisneb eelkõige elektrituuliku poolsete sisendite kombinatsiooni määramisel.

Elektrituuliku süsteemi kõige olulisemaks jälgitavaks sisendiks on tuule kiirus. Igal modernsel elektrituulikul on valmistaja poolt kasutajatele koos elektrituulikuga kaasa antud sisendi ja väljundi seost kirjeldav võimsuskõver, mis on mõeldud näitama elektrituuliku oodatavat normaalset võimsust igal kindlal tuulekiirusel. See elektrituuliku valmistajatehase antud võimsuskõver on saadud kontrollitavate tuule olude juures. Praktilise kasutuseks on vajalik mõõdetud tuulekiirus normaliseerida tegelikku õhu tihedust ja õhu turbulentsi arvestavaks. Täna kasutatav tuule karakteristikute mõõtmispraktika ei anna aga tuule oludest piisavalt täpset ülevaadet, nii et selliste mõõtmisandmete alusel oleks võimalik normaliseerida valmistajatehase antud võimsuskõver vastavaks tegelikele oludele ja seetõttu on valmistajatehase võimsuskõverate kasutamine elektrituuliku töö hindamiseks raskendatud.

Üle maailma kasutatakse tuuleelektrijaama tuulemõõtmiseks kolme peamist tuule mõõtmismeetodit:

- Tuulemõõte mast
- Gondli anemomeeter
- Ülesvoolu, (enne rootorit), tuule mõõtmine

Eelkirjeldatud tuulemõõtmismeetoditega kaasneb piisavalt suur viga, et raskendada elektrituuliku tuuleolude vajaliku täpsusega määramist. Tuulemõõte mast asetseb tavaliselt tuuleelektrijaamast eemal, kuna sellega soovitakse vähendada tuuleelektrijaamast endast põhjustatud häiringute mõju tuulemõõtmisele. Suurema kaugusega tuuleelektrijaama ja mõõtmismasti vahel kaasneb ka tuuleolude erinevus, mistõttu ei ole mõõtemastis mõõdetav tuulekiirus üks- ühele ülevõetav elektrituuliku sisendiks. Tuulemõõtemastist kogutud info kasutamiseks erinevate elektrituulikutele tuulekiiruse sisendiks tuuleelektrijaamas on vajalik kasutada elektrituulikute topograafia mudelit ja matemaatilist lähenemist, et leida igale elektrituulikule eraldi parandustegur [24].

Gondli anemomeeter mõõdab küll otseselt elektrituulikule mõjuvat tuult aga kuna see asetseb tavaliselt labade taga siis labadest tingitud mõju, sealhulgas eriti labade tekitatav õhu turbulents, suurendab oluliselt mõõteviga. Gondli anemomeetri mõõtevea vähendamiseks on võimalik

kasutada standardis IEC 61400-12-2 toodud meetodit, mis seisneb eksperimentaalse funktsiooni leidmises, millega saab parandada labade põhjustatud moonutuse mõju anemomeetri näidule [25].

Ülesvoolu tuulemõõtmisensorid asuvad samuti gondlil kohe pärast rootorit, kuid need seadmed on võimelised mõõtma tuule kiirust ja suunda turbiini ees. Sellised mõõteseadmed põhinevad tehnoloogiatel nagu LIDAR (*light detection and ranging*), RADAR (*radio detection and ranging*), RASS (*radio acoustic system*), SODAR (*sonic detection and ranging*) jt [4].

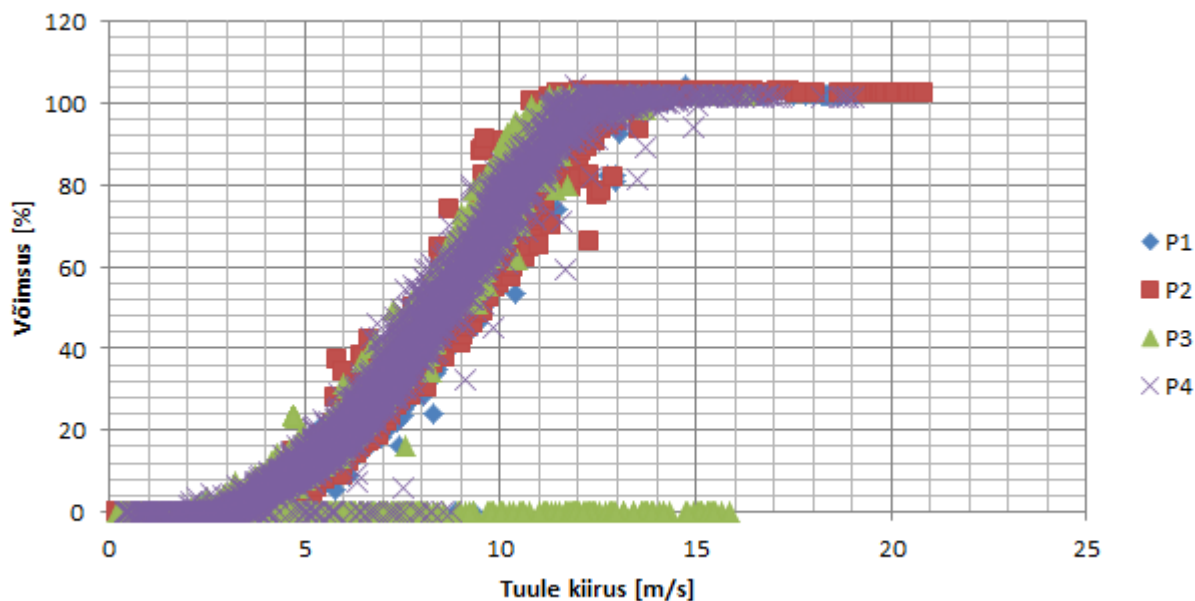
Ülesvoolu tuulemõõtmisensoritega tuule mõõtmisseade mõõdab tuult täpselt tuuliku ees ja selle tõttu annab usaldusväärse tuulemõõtmisväärtuse, kuid need seadmed on veel liiga kallid, mistõttu neid tavaliselt elektrituulikute puhul ei kasutata.

Praktilises kasutuses on vahetult mõõdetavatele andmetele toetuva parandusteguri lahendused siiski raskelt teostatavad, kuna vajavad suure täpsusega mõõtmisi, mis võivad olla tuuleelektrijaamas kulukad ja raskelt teostatavad. Kasutades dispetšjuhtimissüsteemi andmeid on aga võimalik koostada kogutud informatsiooni alusel mudel elektrituuliku normaaltöörežiimi määramiseks. Võrreldes mudeli arvutuste tulemusel saadud väljundeid mõõtmiste väljunditega on võimalik tuuleelektrijaamas välja selgitada osalise töörežiimiga töötavad elektrituulikud.

### **3.3. Elektrituuliku potentsiaalse väljundi modelleerimine**

Mudeli peamine ülesanne on arvutada konkreetse elektrituuliku potentsiaalne toodetava elektrienergia võimsus antud asukoha tingimustel, nii et see oleks võrreldav mõõdetud tulemustega ja selle võrdluse alusel oleks võimalik kindlaks määrata tuuliku töörežiim. Selle arvutuse juures tuleb arvesse võtta, et muutuvate keskkonna tingimuste poolt tekitatud elektrituuliku toodangu normaalne variatsioon toob endaga kaasa olukordi, kus elektrituulik võib toota rohkem või vähem, kui arvatud potentsiaalne toodang, töötades normaalrežiimis. Normaalse režiimi elektrienergia toodangu variatsiooni informatsiooni mudelis ei hinnata [24].

Toodangu variatsiooni põhjus võib peituda paljudes erinevates faktorites kui nende mõju parameetrite omavahelistele suhetele on väike.



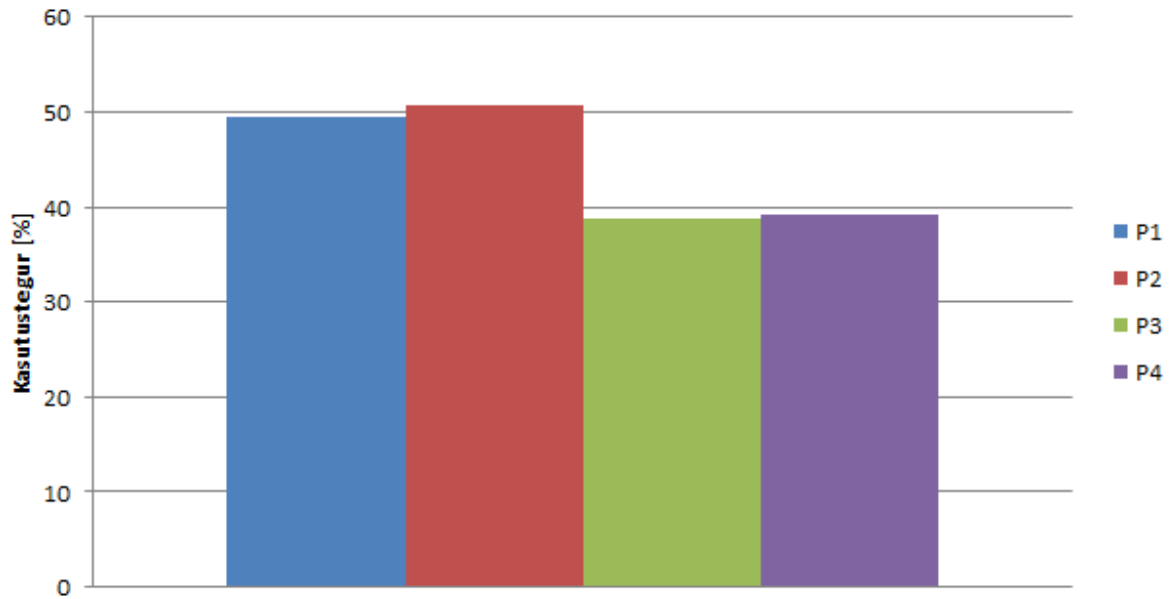
Joonis 3.3 Erinevate elektrituulikute kuu võimsuskõver, mis näitab tuuleelektrijaama sees sarnast efektiivsust.

Selle väite iseloomustamiseks on joonis 3.3 ja joonis 3.4. Joonisel 3.3 on kujutatud ühest tuuleelektrijaamast nelja elektrituuliku võimsuskõveraid ja joonisel 3.4 sama ajaperioodi kasutustegurid. Selgelt on Joonisel 3.4 võimalik eristada, et kaks tuulikut on väiksema toodanguga aga see ei väljendu võimsuskõverates. Madalam toodang kahes tuulikus on põhjustatud tuule varjutusest teiste tuulikute poolt, see varjutuse mõju ei avalda aga mõju elektrituuliku potentsiaalsele võimele energiat muundada.

Elektrituuliku potentsiaalse energia määramiseks ajaperioodis on üldiselt kasutusel kaks meetodit:

- Võimsuskõveral põhinev meetod.
- Võimsusel põhinev meetod.

Konkreetsel võimsuskõveral põhinev grupp koosneb meetoditest, mis kasutavad asukoha põhist võimsuskõverat. Tuule kiirust kasutatakse siis potentsiaalse elektrienergia arvutamiseks. Selle meetodi puhul kasutatakse Gondli anemomeetri, ülesvoolu tuulemõõtmise meetodit ja tuulemõõte masti [26].



Joonis 3.4 Elektrituulikute kuu kasutustegur näitab toodangu erinevust tuuleelektrijaama sees.

Kõikide asukoha põhist võimsuskõverat kasutavad potentsiaalse energia määramise meetodid vajavad võimsuskõvera loomiseks pikema perioodi andmeid, et mõõtetud saaks kogu tuulekiiruse diapsoon ja kuna asukoha põhise võimsuskõvera mõõtmiseks kasutati kindlat seadet, siis funktsiooni viga sõltub mõõteseadme veast. Otsese seose tõttu nende vigade vahel tuleb mõõtetud võimsuskõverat uuendada kuna mõõteseadme viga võib ajast muutuda ning mõõteseadme rike tähendab võimsuskõvera uuesti mõõtmist. Erinevalt gondli anemomeetri ja ülesvoolu tuulemõõtmise meetoditest, tekib tuulemõõde masti kasutamisel lisa viga andmete ebasünkroonsuse tõttu. Tuul, mis mõjub tuulemõõde mastile ei ole veel jõudnud elektrituulikuni.

Võimsusel põhinev mõõtmismeetodite grupp koosneb meetoditest, mis kasutab ajatempleid arvutamaks potentsiaalset energiat, Võimsusel põhinev mõõtmismeetodite grupp kasutab järgmiseid arvutusmeetodeid:

- Tuuleelektrijaama keskmise võimsuse meetod
- Esindava (sarnase) elektrituuliku keskmise võimsuse meetod
- Tuuleelektrijaama keskmise tuulekiiruse meetod

Tuuleelektrijaama keskmise võimsuse meetod põhineb eeldusel, et lähedal olevad tuulikud töötavad normaalrežiimil ja neile mõjub valitud ajaperioodil sama tuule kiirus. Potentsiaalse elektrienergia arvutamiseks kasutatakse määratava elektrituuliku nimivõimsust ja tuuleelektrijaama keskmist võimsustegurit samal ajaperioodil [24,26].

Esimese sammuna arvutatakse võimsustegur:

$$F_{ave} = \frac{1}{n} \sum_1^n F(i) = \frac{1}{n} \sum_n^n \left( \frac{P_{p\_ave(i)}}{P_{N(i)}} \right) \quad (3.1)$$

kus  $F_{ave}$  on keskmine võimsustegur,  $F(i)$  on  $i$ -nda tuuliku võimsustegur,  $P_{N(i)}$  on  $i$ -nda tuuliku nimivõimsus,  $P_{p\_ave(i)}$  on  $i$ -nda tuuliku keskmine võimsus ja  $n$  on elektrituulikute arv normaalrežiimis [24,26].

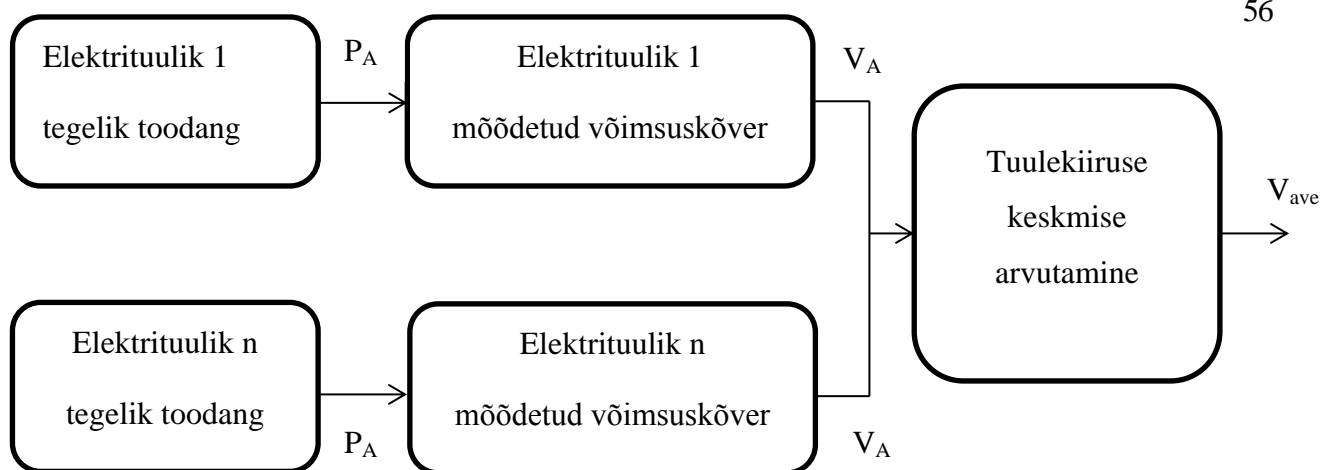
Järgmise sammuna arvutatakse saamata jäänud elektrienergia:

$$P_l = F_{AVE} * P_{ND} - P_A \quad (3.2)$$

kus  $F_{ave}$  on keskmine võimsustegur,  $P_A$  on elektrituuliku tegelik keskmine võimsus valitud perioodil,  $P_L$  on kaotatud toodang ja  $P_{ND}$  on elektrituuliku nimivõimsus [24,26].

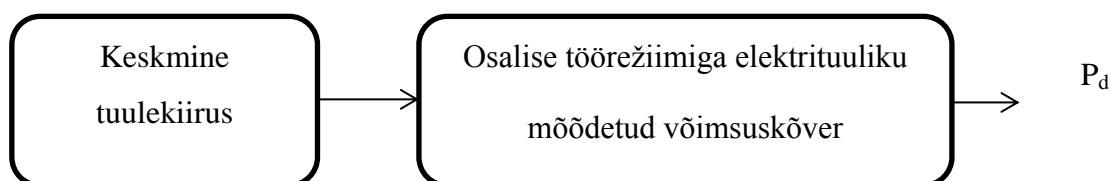
Tulenevalt oma arvutus meetodikast, mis vajab võrdluseks teist elektrituulikut, saab tuuleelektrijaama keskmise meetodid kasutada ainult siis kui leidub koos asuvaid elektrituulikuid. Selle meetodi suureks eeliseks on, et vaja ei ole tuulemõõtmist ja seetõttu ei ole selle meetodi rakendamiseks vaja pikaajalise mõõtmiste korraldamist. Kuna meetodi korral kasutatakse ainult elektrituuliku väljundid siis see tähendab, et vaja ei ole arvestada väliskeskkonna tegureid nagu õhu keerised, temperatuuri muutused ja maastiku mõju, mis teeb meetodi kasutamise lihtsaks. Selle meetodi peamiseks probleemiks on, et seda ei saa täiesti iseseisvalt kasutada. Teiste meetodite kasutamine on vajalik kui kõik tuuleelektrijaama elektrituulikud on tehnilist probleemist mõjutatud. Sellisteks olukordadeks on labadele jää tekkimine ja elektrivõrgu poolne võimsuspiirang. Suurte tuuleelektrijaamade puhul võib kasutada ka esindava elektrituuliku keskmise võimsuse meetodid mille erinevus eelmisest meetodist on kindla elektrituuliku kasutamine, et parandada potentsiaalse energia määramise täpsust.

Tuuleelektrijaama keskmise tuulekiiruse meetodi puhul arvutatakse elektrituuliku potentsiaalne toodang kasutades normaalrežiimil töötavate elektrituulikute keskmist tuulekiirust. Keskmine tuulekiirus määratakse kui normaalrežiimis töötava elektrituuliku võimusele vastav võimsuskõveralt leitav tuule kiirus. Parema täpsuse saamiseks peab tuule kiiruse määramise alusena kasutatav võimsuskõver olema kohaspetsiifiline. Potentsiaalne toodang määratakse saadud tuulekiiruse ja osalisel töörežiimil oleva elektrituuliku kohaspetsiifilise võimsuskõveraga.



Joonis 3.5 Keskmise tuulekiiruse arvutus kasutades tehase võimsuskõverat.

Keskmise tuulekiiruse arvutusmeetodi kirjeldus on toodud joonisel 3.5, kus  $P_n$  on mõõdetud võimsus elektrituuliku „n“ puhul,  $V_n$  on arvutusega leitud tuule kiirus, mis mõjub elektrituulikule „n“ ja  $V_{ave}$  on keskmine tuule kiirus [24,26].



Joonis 3.6 Potentsiaalse toodangu määramine kasutades võimsuskõverat.

Osalise töörežiimiga elektrituuliku potentsiaalse toodangu määramine on toodud joonisel 3.6, kus  $V_{ave}$  keskmine tuule kiirus ja  $P_d$  osalisel töörežiimil töötava elektrituuliku potentsiaalne toodang [24,26].

Eespool toodud meetoditest tuleks võimalusel kasutada nii konkreetset võimsuskõverat ja tuule kiirustel põhinevat meetodit kui ka võimsusel põhinevat meetodit, kuna nii on igas olukorras võimalik arvutada potentsiaalne elektrienergia võimsus, sest nagu eelpool öeldud peab võimsusel põhinevate meetodite kasutamiseks olemas olema elektrituulikuid, mis töötavad normaalrežiimis ning see tingimus ei ole alati täidetud.

### 3.4. Elektrituuliku võimsuskõvera arvutusfunktsiooni koostamine

Elektrituuliku võimsuskõvera normaalrežiimil mõõtmiseks ja sellest arvutuste jaoks funktsiooni koostamiseks on kõige praktilisem kasutada gondli anemomeetri põhise meetodit. Selle meetodi puhul kasutatakse gondlile või gondli ette asetatud anemomeetrit nii, et see asuks võimalikult elektrituuliku rootori keskel. Selline asetus tähendab, et ümbritsev maastik ja takistused mõjutavad mõõdetavat tuult sarnaselt nagu need mõjuvad elektrituuliku rootori labadele.



Sellegipoollest rootori ise mõjutab samuti mõõdetavat tuult ja seega tehase võimsuskõver võib ikkagi mitte sobida piisavalt täpseks töörežiimide määramiseks.

Selleks, et mõõta üles gondli anemomeetri põhine võimsuskõver saab kasutada IEC 61400-12-2 esitatud meetodeid ilma ülekande funktsioonita [25]. Eesmärk on vähendada rootori ja gondli tekitatud viga tuulemõõtmise tulemusele. Selle funktsiooni määramine vajab tuulemõõte masti, mis ei ole tavaoludes praktiline. Kuna mudeli eesmärk on hinnata elektrituulikute režiimide muutust ja rootori mõju tuulemõõtmisel jääb sarnaseks tulevikus siis seda funktsiooni vaja kasutada ei ole.

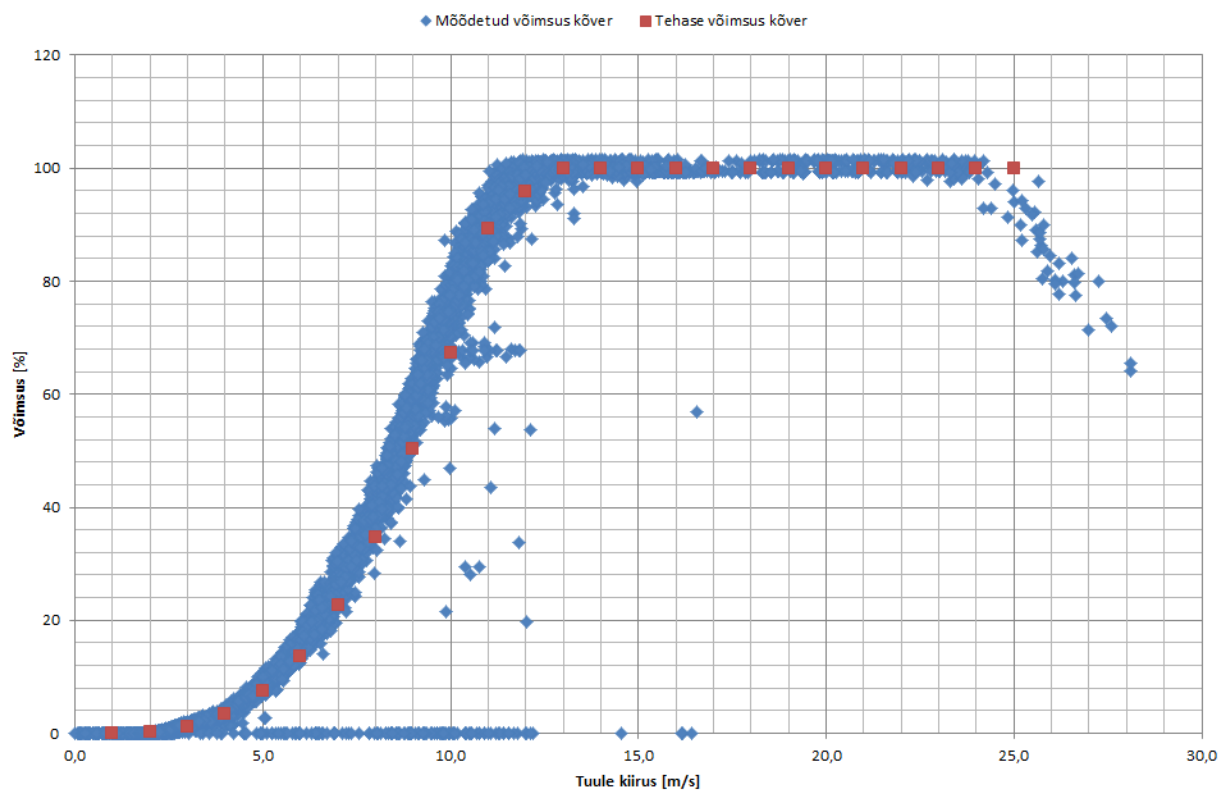
Standardis toodud mõõtmisprotseduuri eesmärk on koguda andmeid, mis vastavad kindlaks määratud kriteeriumitele, et kindlustada andmete piisav kogus ja kvaliteet. Mõõdetud võimsuskõver põhineb tuule kiiruse ja võimsuse 10 minuti keskmistel suurustel ja peale nende suuruste on vajalik koguda järgnevad andmepunktid:

- Välistemperatuur
- Õhurõhk
- Veateated ja nende kestvused
- Võrgujuhtimised ja nende ajad

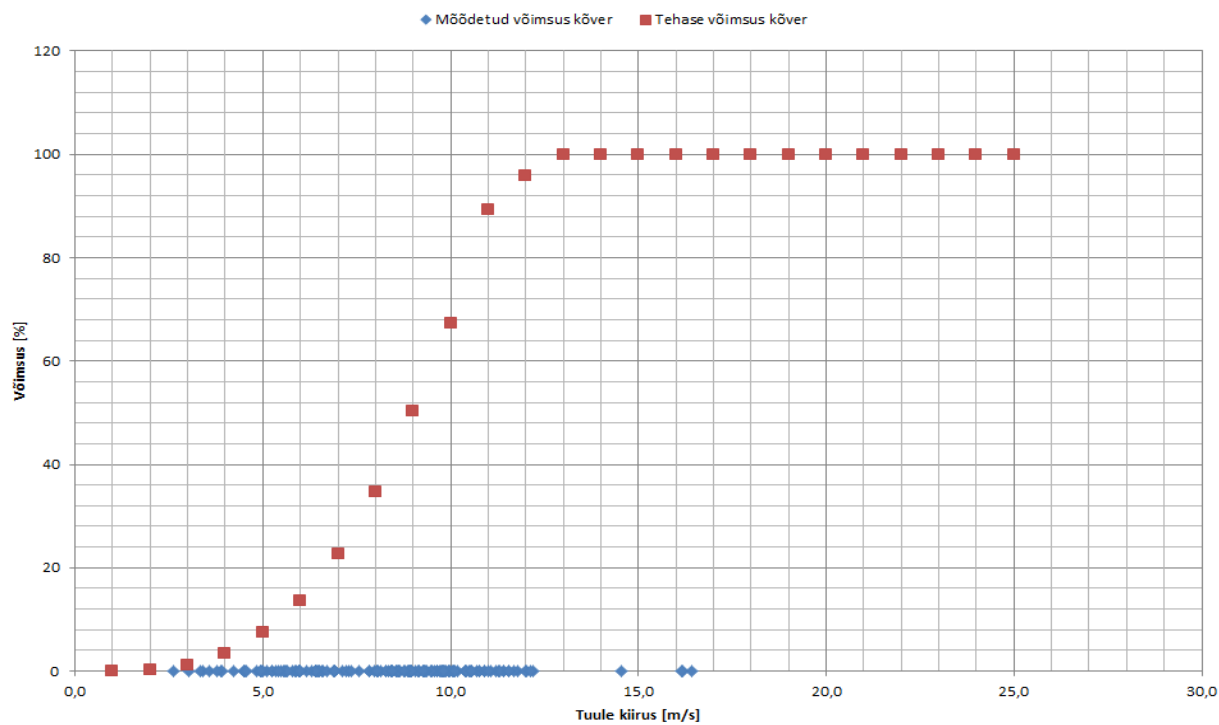
Kogutud andmed peavad läbima andmete kontrolli, kus kontrollitakse andmete täielikust, mis esitatakse protsendina ajaperioodist. Andmete täielikusse kontrolli käigus eemaldatakse füüsikalistest piiridest välja jäävad mõõtmistulemused, plokid, kus andmetel on samad väärtused, mittearvulised suurused ja tühjad väärtused [27].

Elektrituuliku mõõdetud võimsuskõver on esitatud joonisel 3.7. See võimsuskõver on tehtud gondli anemomeetriga ja näitab ilmekalt sisendi ja väljundi suhte varieeruvust. Peale tuulemõõtmisvea on joonisel 3.7 esitatud võimsuskõvera ja tehase võimsuskõvera varieeruvus, mille põhjusteks on võimsuspiirangud, millised tulenevad võrguoperaatori poolsetest käsklusest või on rikkest või veast põhjustatud, sealhulgas põhjusteks võib olla laba jäätumine ja muud avariilised peatumised [28].

Võimsuskõvera funktsiooni tegemiseks peab mõõdetud võimsuskõverast eemaldama andmed mis pärinevad olukordadest, kus elektrituulik on olnud osalise töö režiimis. Selliseks eristamiseks ja valitud andmete välistamiseks saab kasutada erinevaid filtreid.

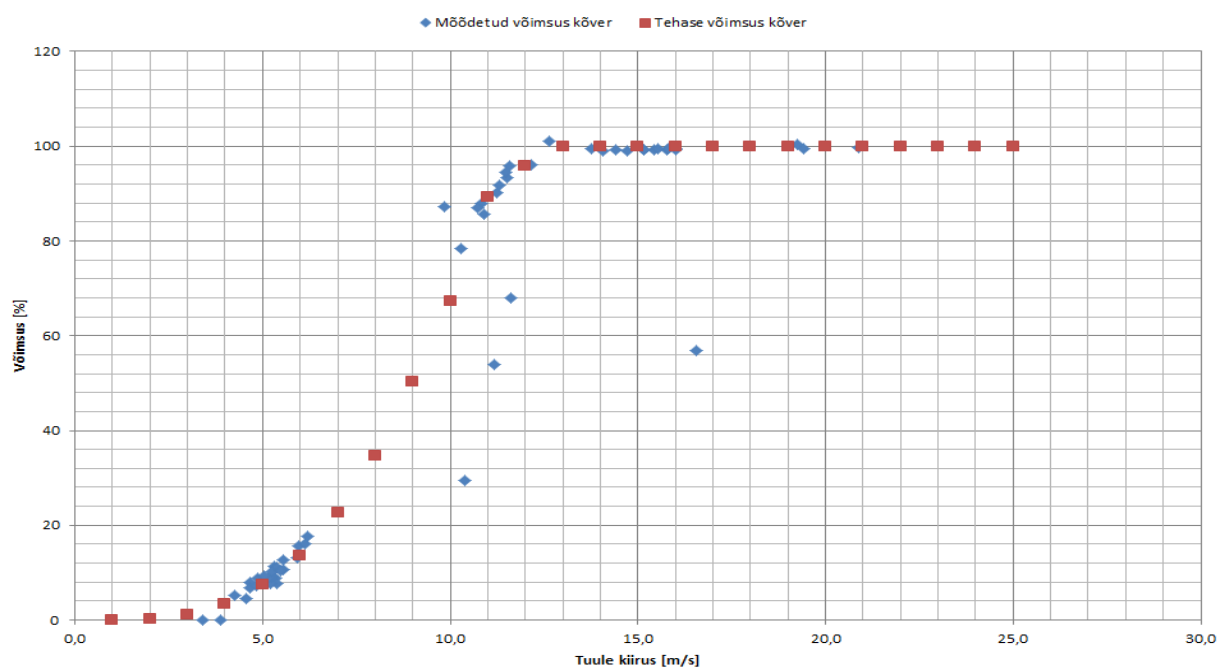


Joonis 3.7 Ajaperioodis ülesmõõdetud töötlemata võimsuskõver.

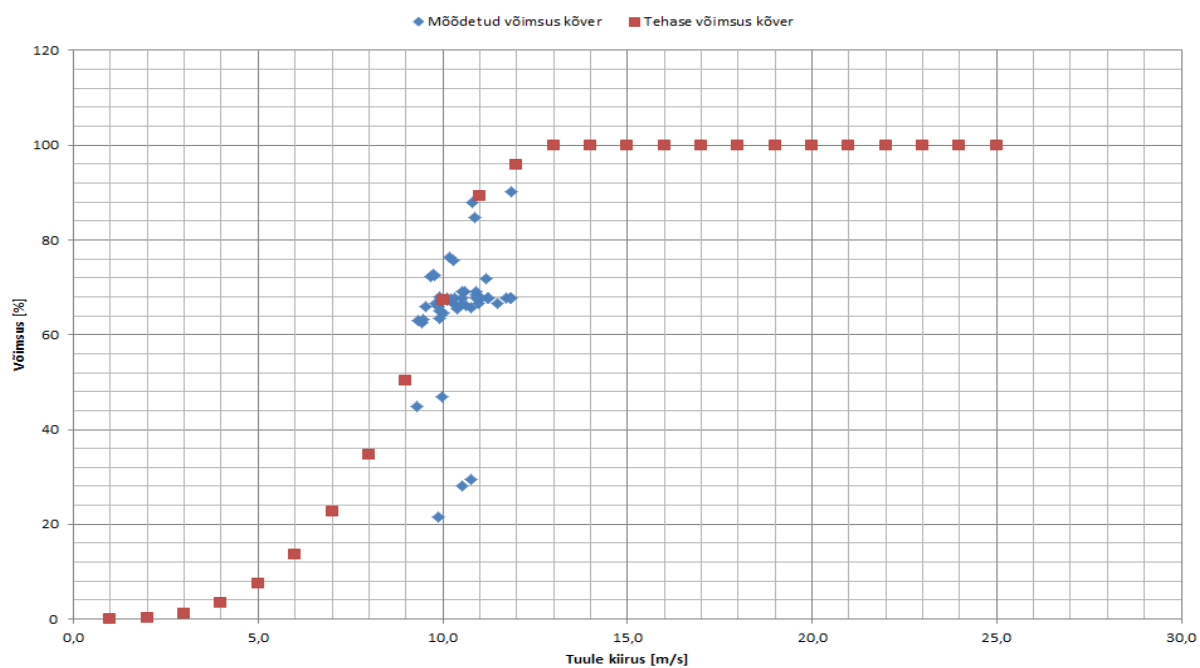


Joonis 3.8 Mitte- operatiivsed seisundid ajaperioodis, filtreerimisel eemaldatud andmed.

Vastavalt standardile IEC 61400-12 tuleb eemaldada andmetest ka olukorrad, kui elektrituulik on hooldus. Informatsiooni mudeli mittegenereriv kategooria eemaldab juhud, kus elektrituulik seisab, milline olukord on kujutatud joonisel 3.8, kuid paljud elektrituulikud võivad töötada osalise võimsusega lihtsamate hoolduste käigus. See filter kasutab elektrituuliku olekukoode. Näidet filtri mõjust kujutab joonis 3.9.



Joonis 3.9 Hooldus seisundi ajaperioodis filtreerimisel eemaldatud andmed.

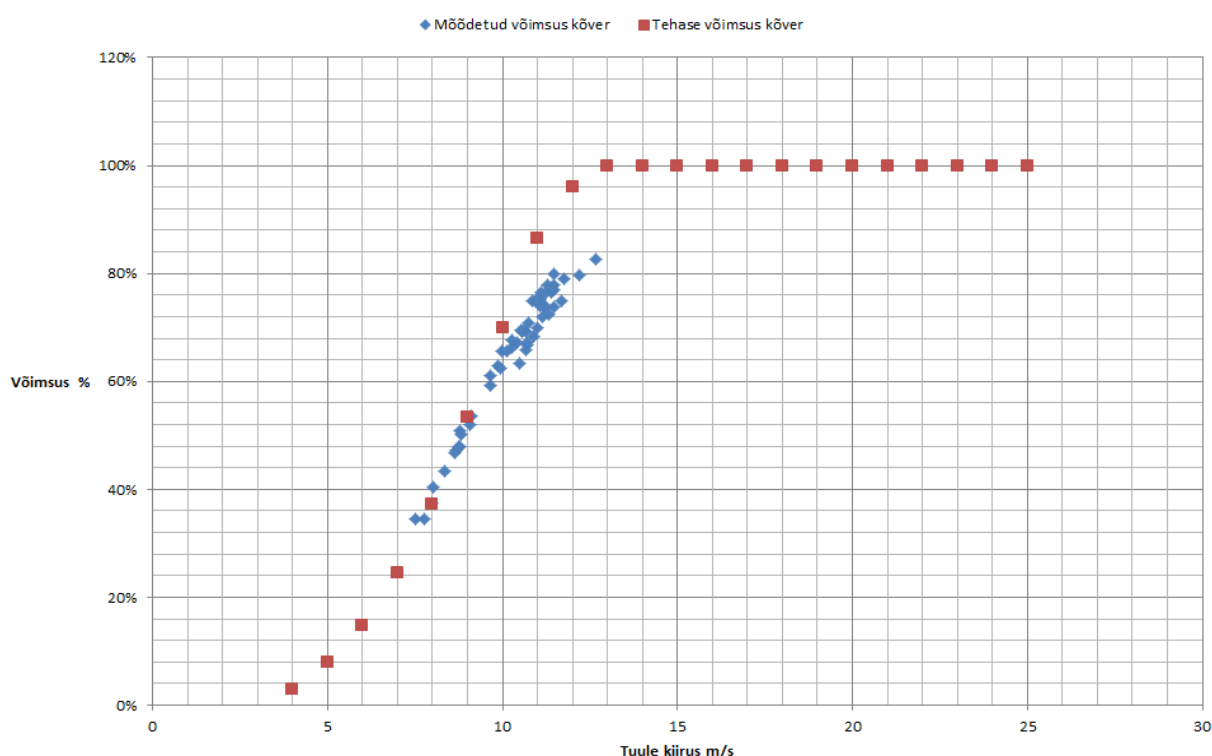


Joonis 3.10 Võimsuspiirangu seisundi ajaperioodis mõõdetud andmete filtreerimisel eemaldatud andmed.

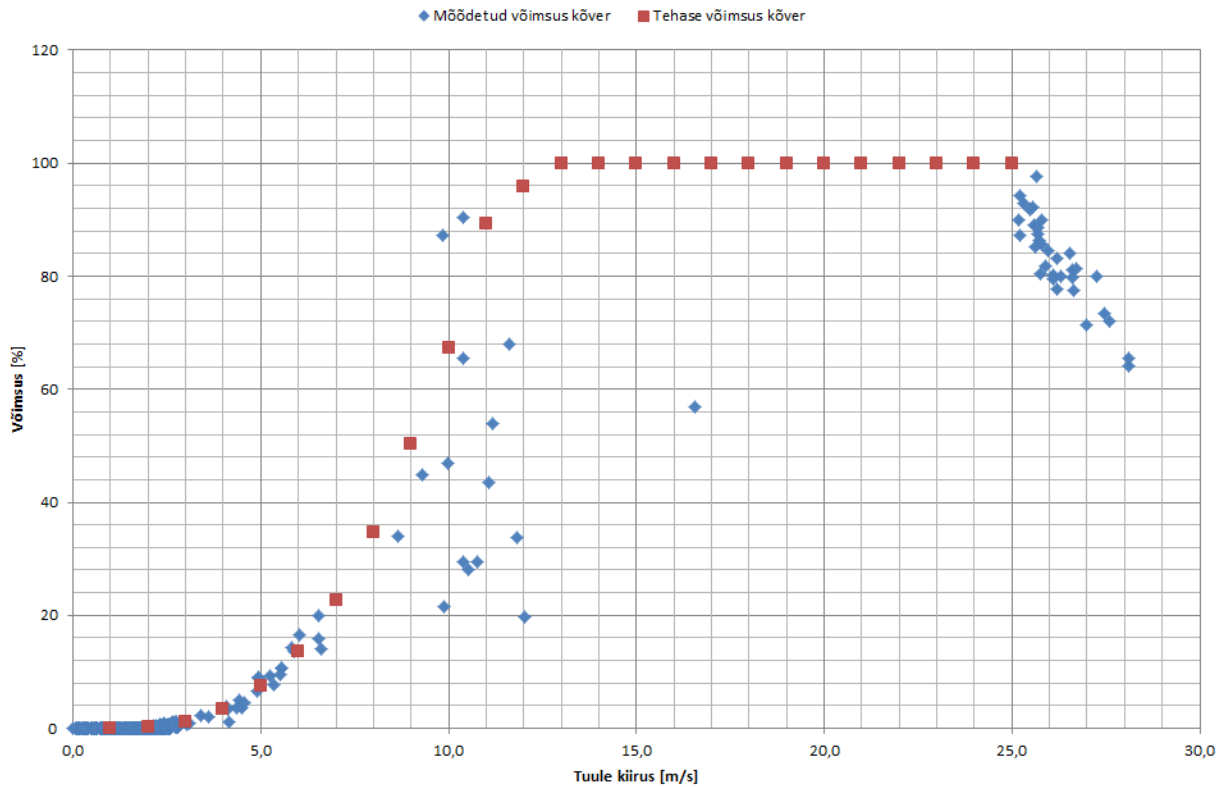
Teine filter eemaldab võimsuspiiranguga ajad võimsuskõverast. Selle saavutamiseks tuleb koos kasutada ja arvestada alajaama ja elektrituuliku olekukoode, kuid peale selle on soovitatav kasutada filtrit, mis kontrollib alatootmist maksimumvõimsuse tuule perioodidel ja eemaldaks need perioodid. Näidet filtri mõjust kujutab joonis 3.10.

Kolmas filter eemaldab potentsiaalsed jäätumisperioodid. Enamus elektrituulikutel, mis on rajatud külma kliimaga piirkondadesse, kontrollitakse jäätumist labadel. Näiteks rootori laba koormuskontrolli ja võimuskõvera kõrvalekallete kaudu. Filter peaks meteoroloogiliste andmete alusel eemaldama kõige tõenäolisemad laba jäätumise olukorrad. Näidet filtri mõjust kujutab joonis 3.11.

Neljas filter eemaldab *min* ja *max* väärtusi kasutades kõik juhud, kus hetkevõimsus on null ja maksimaalne tuulekiirus on üle „cut-off“ tuulekiiruse. Hetke võimsuse nullväärtuseid tekitavad lühiajalised seiskumised nagu resonantsalarmid. Igal elektrituulikul on määratud tuule piirkiirus, mille eesmärk on kaitsta elektrituulikuid liigsete koormuste eest. Elektrituuliku käitumine piirkiiruse juures on erinev, mida illustreerib joonis 3.12.



Joonis 3.11 Labade jäätumisseisundi ajaperioodis mõõdetud andmete filtreerimisel eemaldatud andmed.



Joonis 3.12 Ajaperioodis mõõdetud ekstreemum väärtuse kasutamisel eemaldatud lühiajaliste seisakute ja piirtuulekiiruse piirkonna filtreerimisel eemaldatud andmed.

Peale filtrite kasutamist võimsuskõvera mõõtmiseks kasutatava andmevalimite peal normaliseeritakse andmed kahe õhutiheduse jaoks. Üks neist on ISO standard õhutihedus merepinnal  $1,225 \text{ kg/m}^3$ . Teine on keskmine õhutihedus tuuleelektrijaamas mõõtmiste tegemise ajal. Õhutiheduse võib määrata läbi mõõdetud õhu temperatuuri ja õhurõhu valemiga:

$$\rho_{10min} = \frac{B_{10min}}{R_0 \cdot T_{10min}} \quad (3.3)$$

kus  $\rho_{10min}$  on arvatud 10-min keskmine õhutihedus,  $T_{10min}$  on mõõdetud 10-min keskmine absoluutne õhutemperatuur,  $B_{10min}$  on mõõdetud 10-min keskmine õhurõhk ja  $R_0$  on kuiva õhu gaasikonstant 287,05 [28].

Aktiivse võimsuskontrolliga elektrituulikute puhul tuleb normaliseerida tuulekiirus valemiga:

$$V_n = V_{10min} \left( \frac{\rho_{10min}}{\rho_0} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3.4)$$

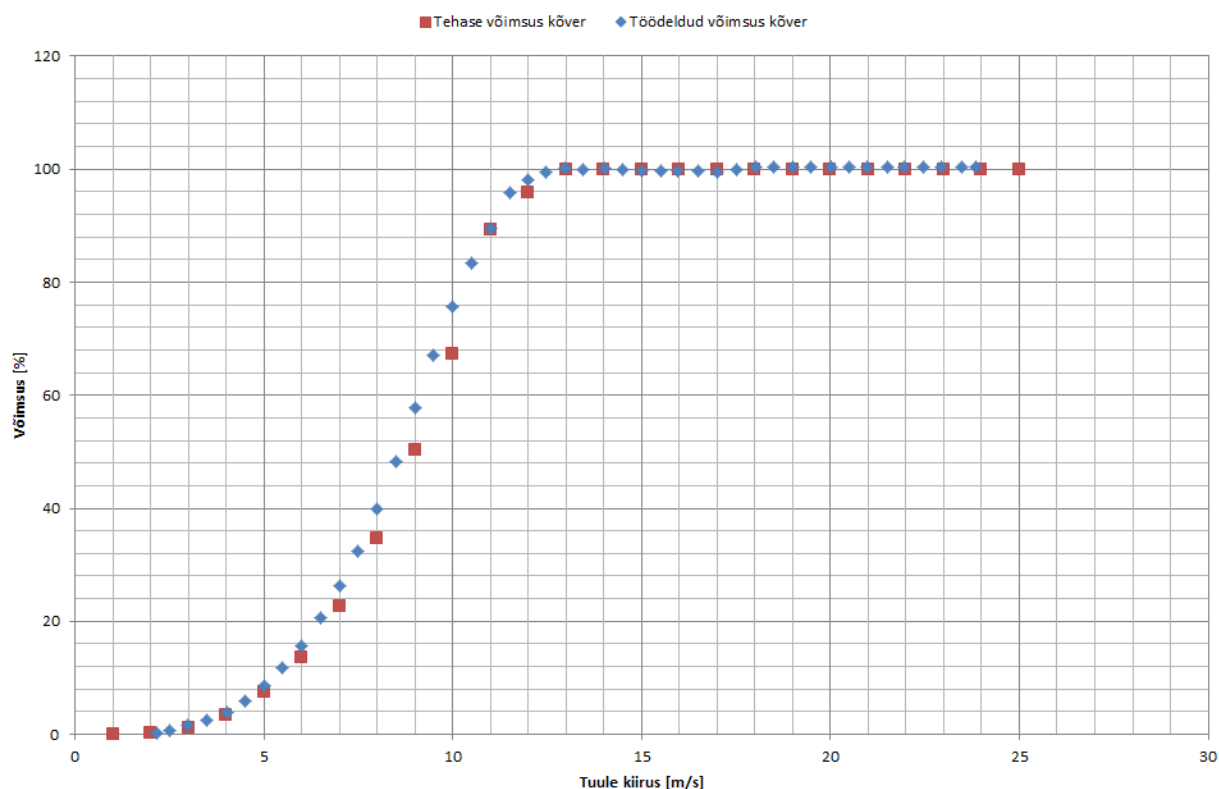
kus  $V_n$  on normaliseeritud tuulekiirus,  $V_{10min}$  on 10-min keskmine tuulekiirus.

Pärast andmete filtreerimist ja normaliseerimist määratakse mõõdetud võimsuskõver kasutades „konteinerite meetodit“ (*method of bins*). Kasutades 0,5 m/s tuulekiiruse „konteinereid“, mille jaoks siis arvutatakse keskmised tuulekiirused ja võimsused kasutades valemeid:

$$V_i = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} V_{n,i,j} \quad (3.5)$$

$$P_i = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} P_{n,i,j} \quad (3.6)$$

,kus  $V_i$  on normaliseeritud ja keskmine tuulekiirus konteineris  $i$ ,  $V_{n,i,j}$  normaliseeritud tuulekiiruse valimis  $j$  konteineris  $i$ , kus  $P_i$  on normaliseeritud ja keskmine võimsus konteineris  $i$ ,  $P_{n,i,j}$  normaliseeritud võimsus valimis  $j$  konteineris  $i$  ja  $N_i$  on valimite arv konteineris  $i$ . Võimsuskõvera mõõtmistulemus on toodud joonisel 3.13 [28].



Joonis 3.13 Ajaperioodis ülesmõõdetud võimsuskõver pärast töötlust.

Töödeldud võimsuskõvera abil saab arvutada elektrituuliku potentsiaalse energia kasutades kurvi funktsiooni. Kurvi funktsioon oma üles ehituselt näeb välja järgmine:

$$Y = \text{Curve}(x, (X_1, Y_1) (X_2, Y_2) \dots (X_n, Y_n)) \quad (3.7)$$

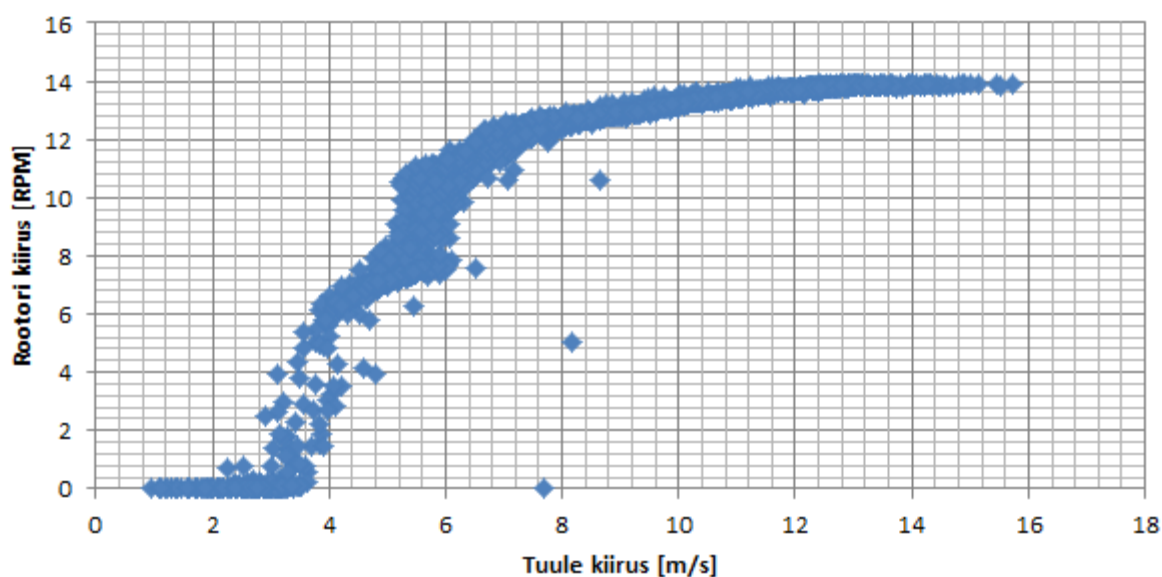
Selline funktsioon annab erineva  $Y$  väärtuse sõltuvalt muutuja  $x$  väärtusest. Selline funktsioon kasutab lineaarset interpoleerimist, et saada väärtused, mis jäävad defineeritud punktide vahele [21].

### 3.5. Teised operatiivset tööd kajastavad kõverad ja mõõdetavate parameetrite võrdlused

Elektrituulik koosneb paljudest erinevatest süsteemidest, millede töö parameetrite jälgimine ja analüüsimine annab efektiivse viisi mitteoptimaalselt töötavate elektrituulikute leidmiseks. Operatiivkarakteristikud sõltuvad parameetritest nagu rootori kiirus, laba kalde- ja gondli pöördenurgad. Eelnimetatud parameetrite pidev jälgimine on vajalik mitteoptimaalse töörežiimi avastamiseks. Rootori kiiruse, laba kalde- ja gondli pöördenurkade parameetrite jälgimiseks ei piisa 10 minuti keskmistest andmetest, et nende alusel leida kõiki kõrvalekaldeid normaalsest töörežiimist. Dispetšjuhtimissüsteemi andmete kasutusega seotud peamine piirang on seotud asjaoluga et ainult 10 minuti keskmiste näitajate kogumise juures võib registreerimata jääda lühiajalise kestusega kõrvalekallete informatsioon. Kuna tuule energia on väga muutuva iseloomuga ja elektrituuliku kontrollseadmed registreerivad näitajaid sagedusega mõnest sekundist kuni mõne minutini siis ka kasutatav SCADA süsteem peaks ideaaljuhul suutma mõne sekundilise ajavahega andmeid koguda ja arvutusi läbi viia [29].

Elektrituuliku parameetrite kontrollimist on kõige praktilisem läbi viia parameetrite vaheliste suhete kõveraid kasutades. Võimsuskõvera kõrval kasutatakse parameetrite kontrolli eesmärgil kõige rohkem rootori kõverat ja laba kalde nurga kõverat.

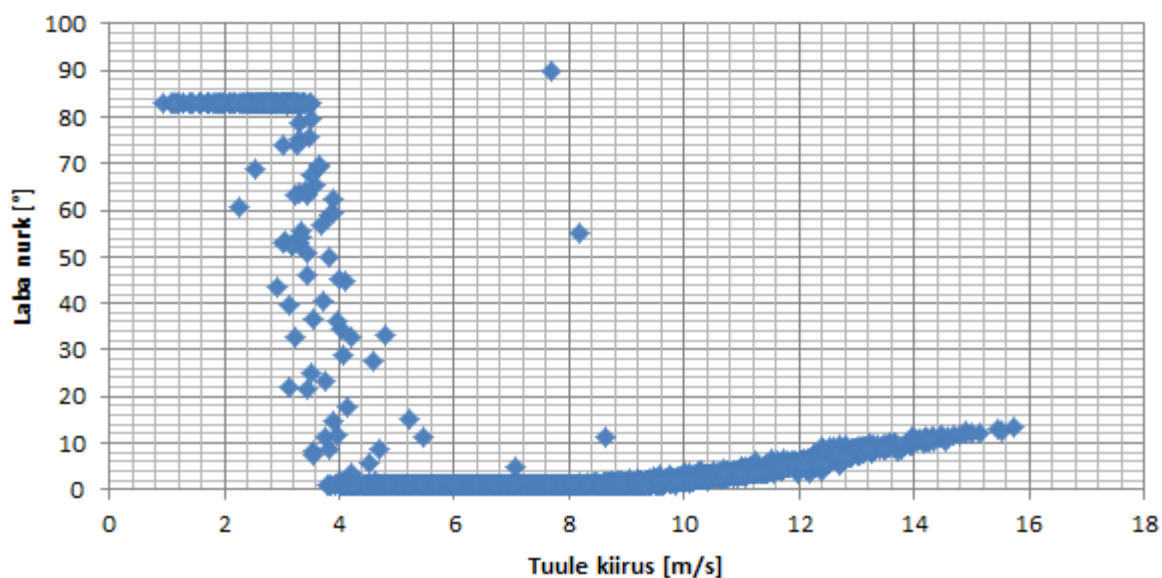
Rootori kõvera puhul vastandatakse teineteisele rootori kiirus ja tuule kiirus. Elektrituulikute komponentide kahjustused mõjutavad rootori kõvera kuju. Tüüpiline rootori kõver on monotoonselt kasvav funktsioon tuule kiirusest. Tüüpiline rootori kõver on toodud joonisel 3.14 .



Joonis 3.14 Rootori kõver, mis näitab rootori kiiruse suhet tuule kiirusega.

Laba kaldenurga kõver näitab tuule kiiruse ja laba nurga suhet. Elektrituuliku aktiivne laba kaldenurga juhtimine muudab laba nurka nii, et elektrituuliku väljundvõimsus oleks antud tuule kiiruse juures maksimaalne. Kontrollsüsteemi rikke või üle lubatava piiri ulatuva tuule kiiruse juures elektrituulik seisatakse, selleks viiakse laba nurk  $90^\circ$  peale. Elektrituuliku normaalrežiimil on laba õiged nurgad teada ja ette määratud ning seega ka võimalikud kõrvalekalded on lihtsalt kontrollitavad [30].

Tüüpiline laba kaldenurga muutuse kõver on toodud joonisel 3.15.



Joonis 3.15 Laba nurga kõver, mis näitab laba nurga muutumist tuule kiiruse muutumisel.

Lisaks eelpool toodud kõveratele annab olulise ülevaade elektrituuliku tööst erinevate temperatuurikõverate võrdlemine. Temperatuurikõverad jagunevad üldiselt kahte gruppi:

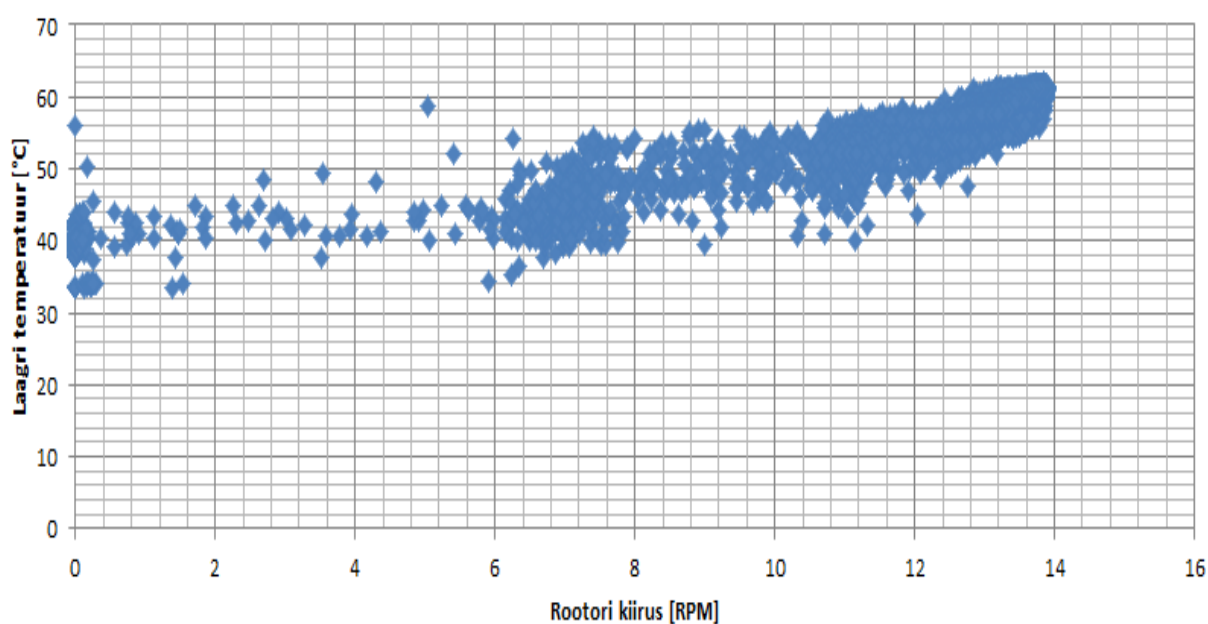
- Rootori mehhaanilisest tööst sõltuvad temperatuurikõverad
- Elektrilisest võimsusest sõltuvad temperatuurikõverad

Rootori mehhaanilisest tööst sõltuvad temperatuurikõverad annavad informatsiooni kõige rohkem elektrituuliku kulumisega seotud komponentide kohta. Suhteliselt intensiivselt kuluvad elektrituuliku komponendid on elektrituuliku pealaager, käigukast, generaatori käigukasti poolne laager ja generaatori mitte käigukasti poolne laager. Komponentide temperatuuri sensorid võivad mõõta nii komponendi enda temperatuuri kui ka nende komponentide jahutussüsteemi soojuskandja temperatuure. Rootori kiiruse ja laagri temperatuuri omavahelist suhet näitab joonis 3.16.

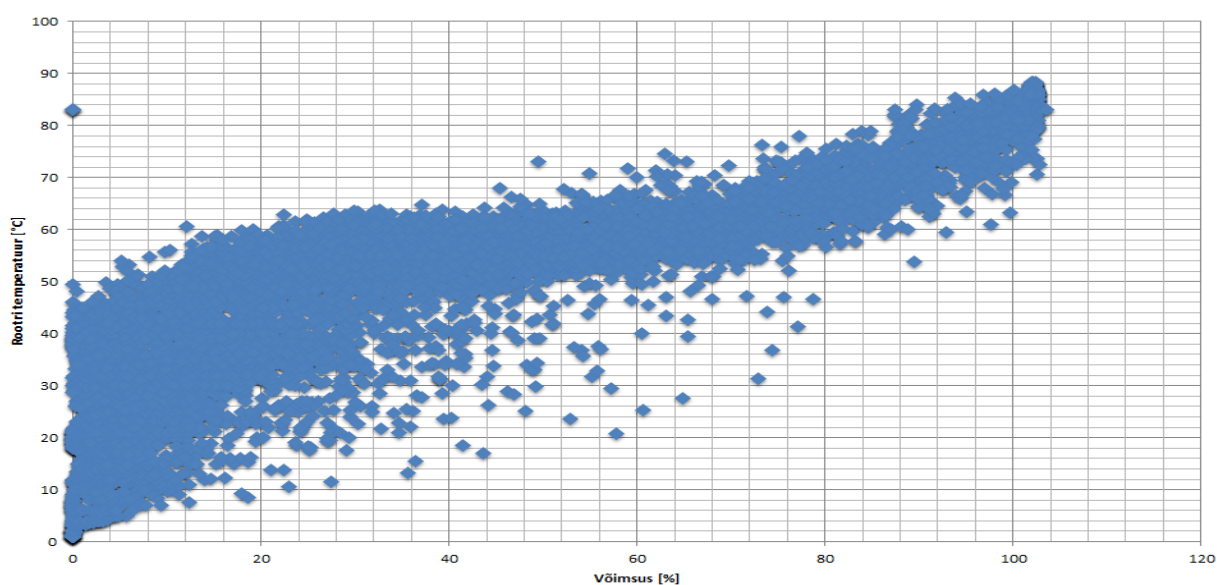


Elektrituuliku võimsusest sõltuvad temperatuurid on võimsuse elektrivõrku ülekande süsteemi temperatuurid. Siia alla kuuluvad generaatori mähiste, muundurite ja trafo temperatuurid. Võimsuse ja rootori temperatuuri vahelist suhet näitab joonis 3.17.

Vastavate kõveratega esitatud suhted annavad ülevaate parameetrite kõrvalekalletest kõigis erinevates parameetrite muutumiste faasides. Näiteks kui laager hakkab kiiremini kuumenema varem kui seda võiks ennustada parameetrite suhete kõverate alusel siis võib see asjaolu juba viidata veale ning see parameeter ei pea ilmtingimata veel ületama viga tähistavat temperatuurinivood.

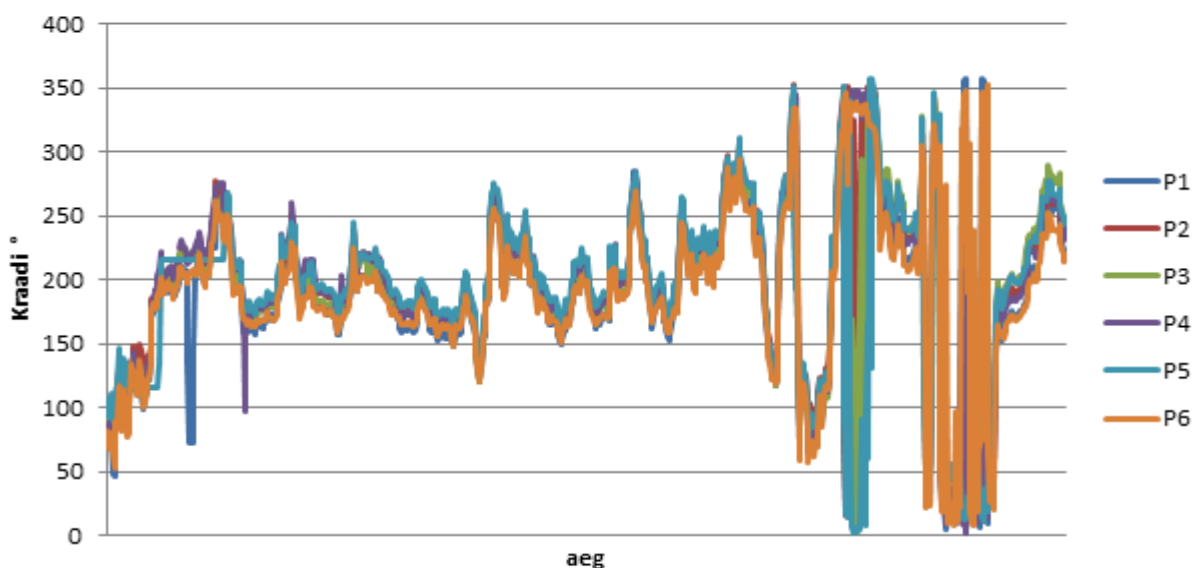


Joonis 3.16 Laagri temperatuuri kõver, mis näitab temperatuuri kasvu rootori kiiruse kasvamisel.



Joonis 3.17 Laagri temperatuuri kõver, mis näitab temperatuuri kasvu rootori kiiruse kasvamisel.

Elektrituulikutel on ka selliseid süsteemi parameetreid, mille kohta ei ole mõistlik teha kõverate võrdlust. Sarnaselt elektrituulikute võimsuste võrdlusele saab neid parameetreid võrrelda teiste sarnaste elektrituulikute parameetritega. Kui selline analüüs näitab, et elektrituuliku parameetrid on liiga suure kõrvalekalletega võrreldes teiste elektrituulikutega siis on vaja edasi uurida kas süsteemis võib olla viga. Joonisel 3.18 on välja toodud gondli suuna nurkade võrdlus ajas.



Joonis 3.18 Elektrituulikute gondli suundade muutumine ajas, mis on põhjustatud tuule suuna muutumisest ajas.

Teine meetod selliste parameetrite võrdluseks, mida ei saa defineerida vastavalt kõveratele on maksimaalse ja minimaalse väärtuse määramine erinevate astmetena. Maksimaalse ja minimaalse väärtuse määramist erinevate astmetena on vaja kasutada ka temperatuuride puhul ning enamasti on selline määramine juba elektrituuliku tehase SCADA poolt defineeritud kuid võib osutuda vajalikuks, et selline määramise meetod tuleks lisada.

Kolmas meetod, mida parameetrite kontrolliks saab kasutada on parameetrite muutumise kiiruse kontroll. Parameetrid, mis sellise kontrolli alla peaks käima on tsüklilised parameetrid nagu süsteemi rõhk.

### 3.6. Informatsiooni mudelit kasutades vea leidmise näited

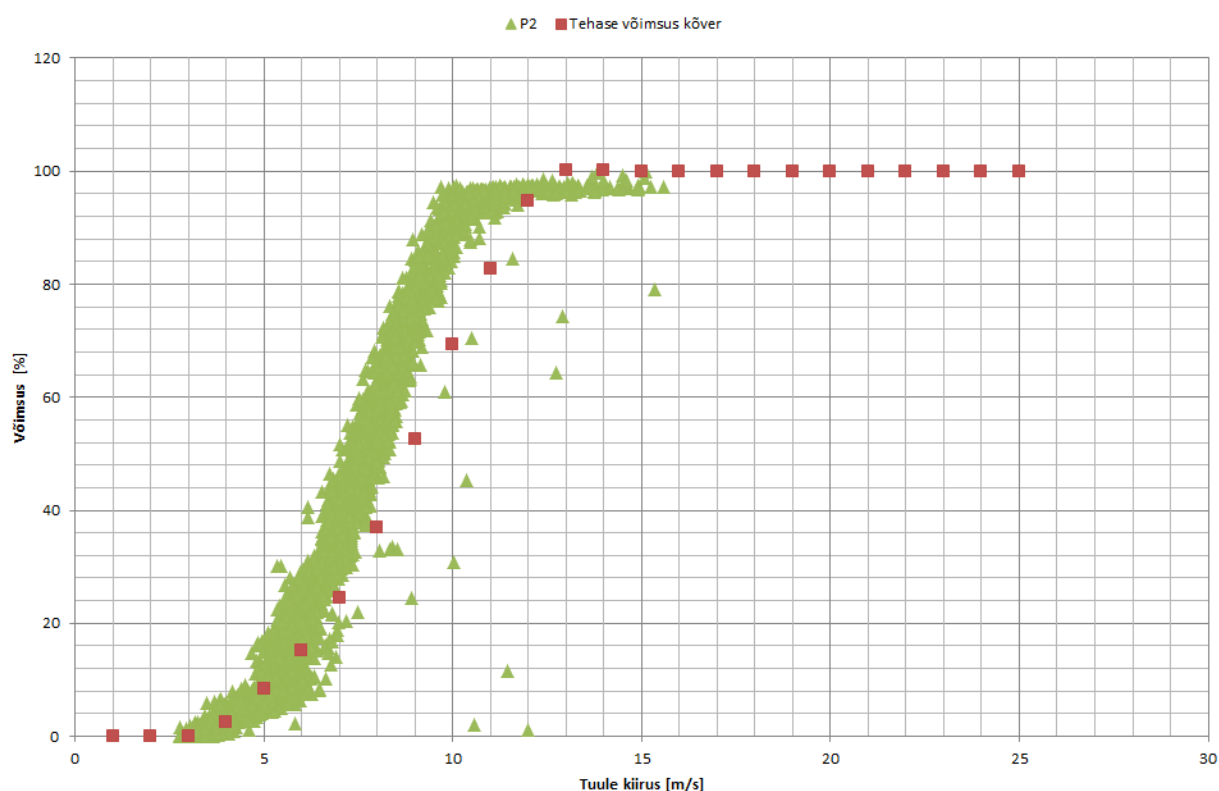
Eelmises peatükis kirjeldatud vea otsimise meetodeid saab kasutada järgmiste vigade leidmiseks:

- Anemomeetrite vigade leidmine
- Erinevad laba nurga muutmise seaded
- Jahutussüsteemi rikkest tekitatud võimsuspiirang

- Laagri temperatuuri tõus
- Sensori vigade leidmine ja parameetri muutumiskiirus
- Gondli suuna vigade leidmine

### 3.6.1. Anemomeetrite vigade leidmine

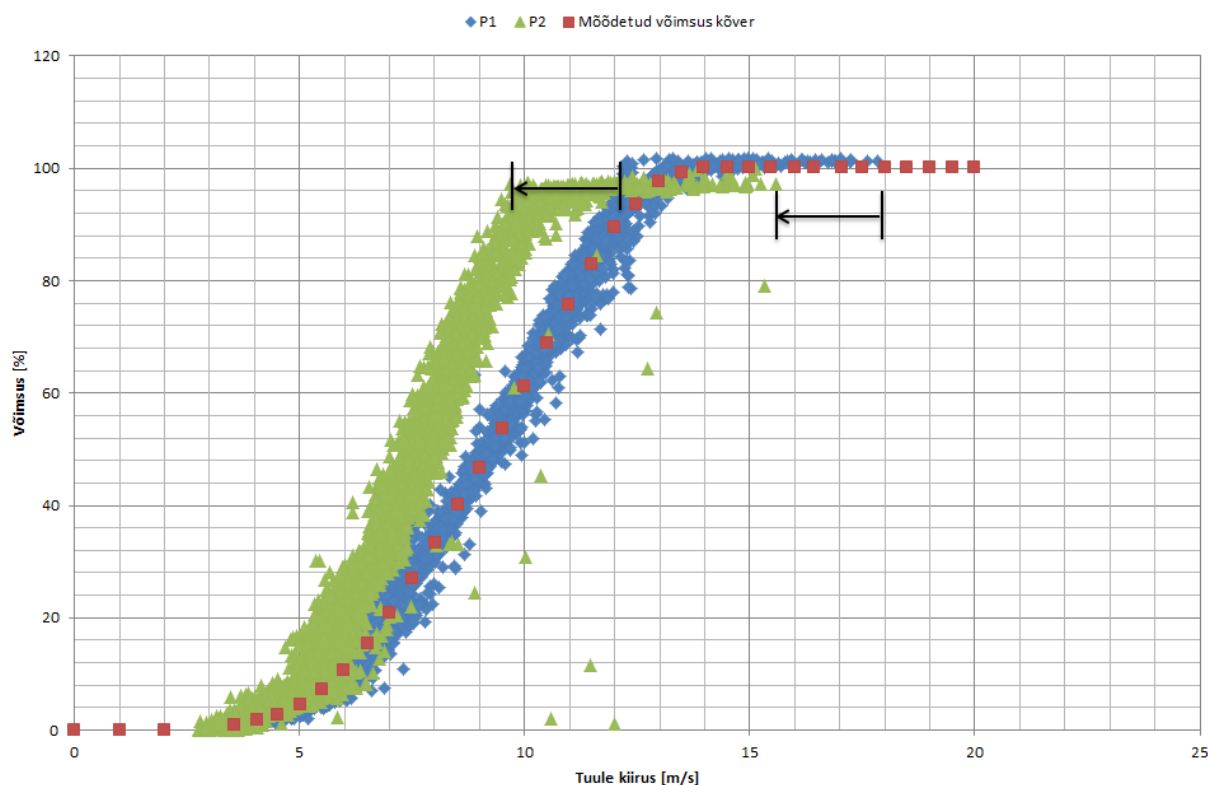
Elektrituuliku anemomeetrid annavad operaatoritele vajalikku sisendinformatsiooni hindamiseks elektrituulikute süsteemi korrektset töötamist kuid lisaks sellele kasutavad elektrituuliku kontrollisüsteemid anemomeetrite sensoritest kogutavat informatsiooni ka laba kalde süsteemi juhtimiseks ja gondli pöörde suuna määramiseks. Seega on eriti oluline operatiivselt avastada anemomeetri sensorite viga. Võimsuskõvera kontroll on esimene suhe mille kaudu on võimalik anemomeetri sensori viga avastada. Joonisel 3.19 on võimsuskõvera kontrolli kasutamisel näha leitud juhtum, kus võrreldes tehase võimsuskõveraga on selgelt näha kõrvalekalle vasakule, mis enamasti tähendab, et tegemist võib olla tuule mõõtmise veaga. Nagu eelpool kirjeldatud ei ole tehase võimsuskõver alati parim viis hindamiseks tuule mõõtmisviga ja selle elektrituuliku tüübi jaoks ei ole olemas piisavalt teadaolevalt mõõtmisveast vabu ajalooliseid andmeid.



Joonis 3.19 Elektrituuliku võimsuskõvera anomaalia esinemine võrreldes normaalse kõveraga.

Sellisel juhul on parim viis vea kindlaksmääramiseks kasutada lähedal asuva elektrituuliku mõõdetud võimsuskõverat ja vastavate andmete, mille seadmete ajaloolised mõõtmistäpsus on teada, võrdlust. Joonisel 3.20 on välja toodud lähedal asuva elektrituuliku mõõdetud

võimsuskõver ja töötlemata andmed sama perioodi kohta. Jooniselt on näha, et elektrituulik P1 on ajalooliselt täpse mõõtmistulemusega valitud ajaperioodis. Võrreldes P1 ja P2 andmeid on süstemaatiline tuulemõõtmise viga, mis ei sarnane labade ja gondli tekitatud mõõteveaga. Selgelt on näha nihe ka maksimaalse tuule nihkes. Tõenäoline põhjus on programmiline viga.



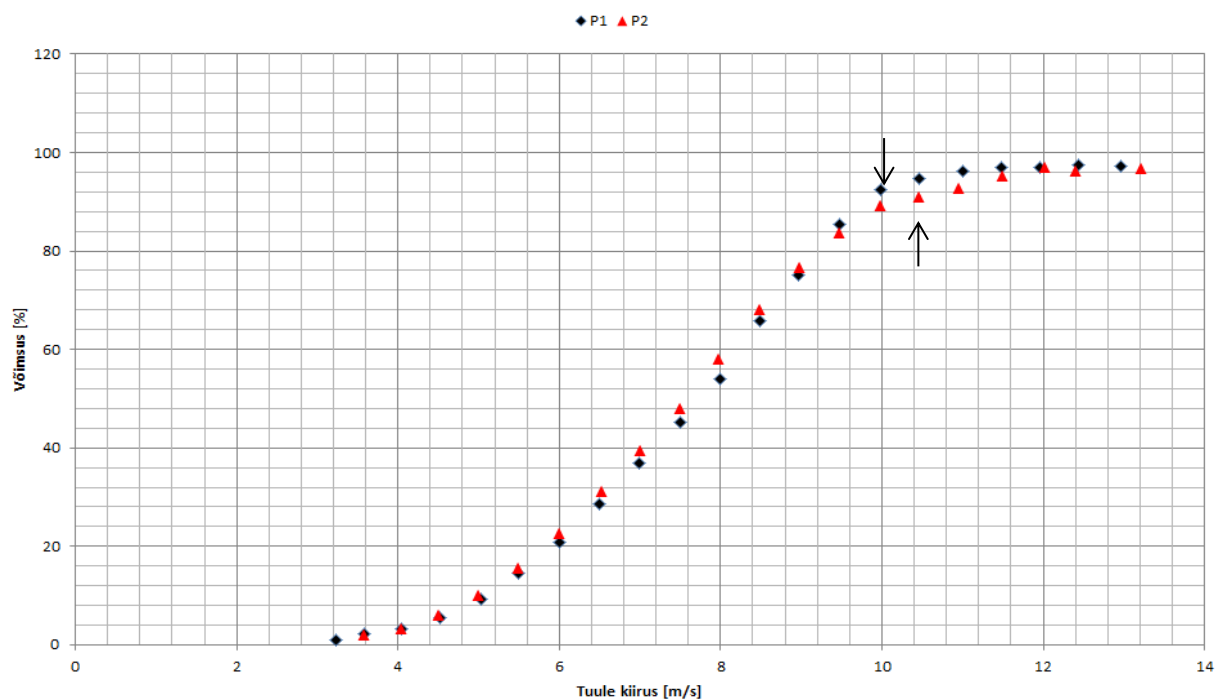
Joonis 3.20 Elektrituuliku võimsuskõvera anomaalia põhjuse otsimine teise elektrituuliku võimsuskõvera võrdluse abil.

### 3.6.2. Erinevad laba nurga muutmise seaded

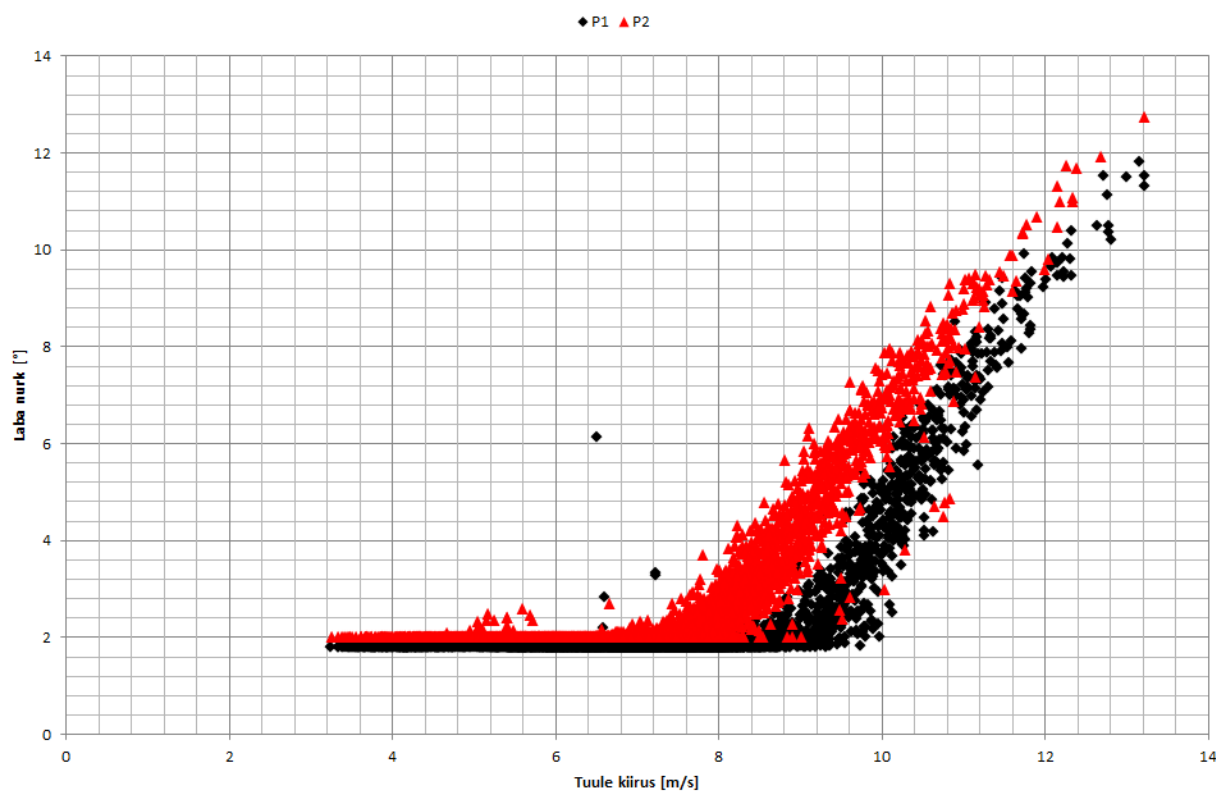
Modernsed elektrituulikud omavad laba kalde reguleerimise süsteeme. Iga laba on juhitud eraldi iga pöörlemise tsükli käigus, et arvestada tuule kiiruse muutusi. Adaptiivne laba kalde muutmise on tähtis efektiivsuse suurendamiseks ja ebasoovitavate mehaaniliste koormuste vähendamiseks. Tulenevalt laba kalde nurga suurest mõjust elektrituuliku efektiivsusele on laba kalde nurkade muutmise kontroll oluline osa võimsuskõvera efektiivsuse langemise põhjuse leidmisel.

Jooniselt 3.21 on näha, et kasutades võimsuskõvera võrdlusmeetodit on leitud elektrituuliku P2 tuuleenergia püüdmise efektiivsuse erinevus. Tegemist ei ole võimsuspiiranguga elektrituuliku enda või võrguoperaatori poolt, kuna tuule kiiruse korral kus elektrituulik annab maksimaalset toodangut seda võimsuse langust näha ei ole. Põhjuse leidmiseks tuleb uurida informatsiooni mudeli teiste parameetrite erinevust. Kasutades tuule kiiruse ja laba nurga kõverat, mis on

kujutatud joonisel 3.22 on näha nurga erinevust kogu tuule kiiruste diapasooni ulatuses. Seega laba nurga erinevus on selles näites tuuleenergia püüdmise ebaefektiivsuse põhjus.



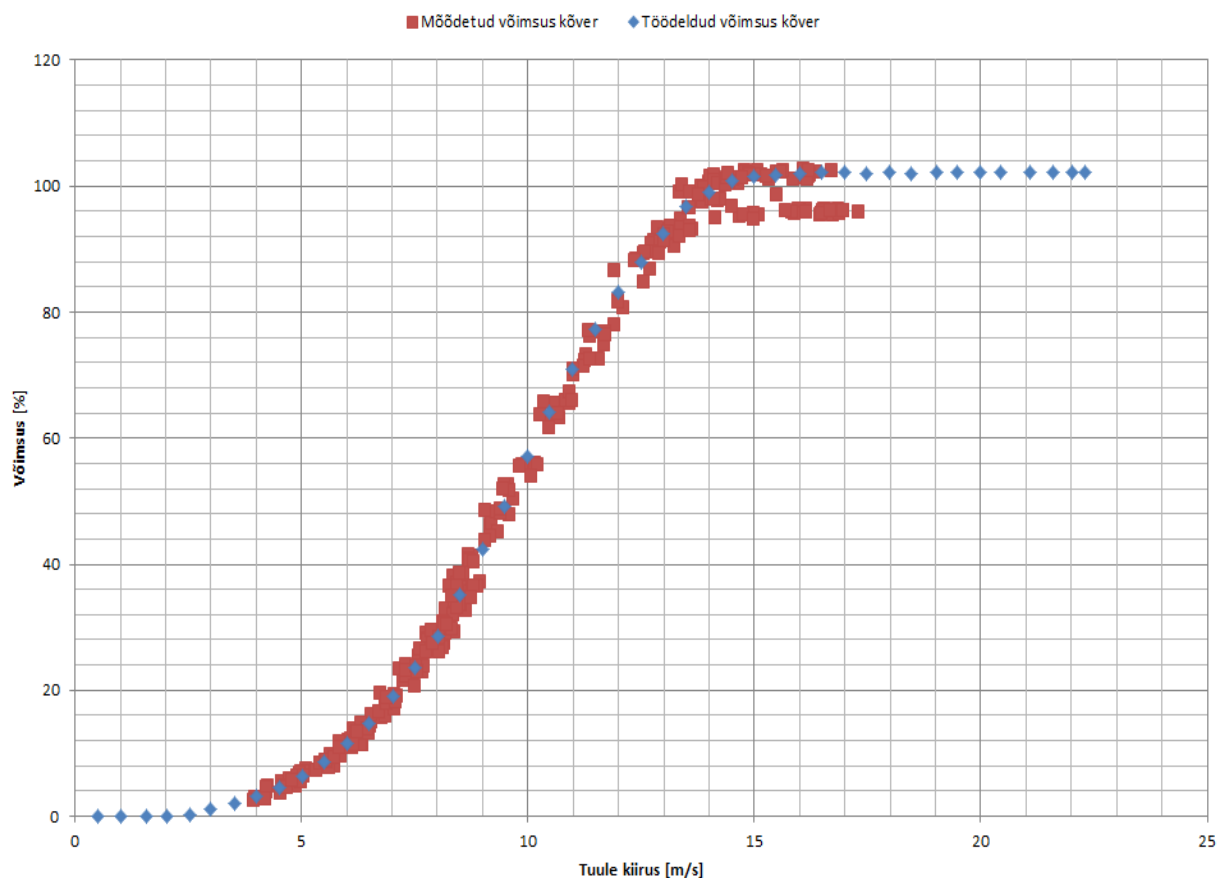
Joonis 3.21 Elekrituuliku võimsuskõver efektiivsuse vähenemine võrreldes normaalse kõveraga.



Joonis 3.22 Laba nurga muutuste võrdlemine erinevatel tuule kiirustel võimsuskõvera ebaefektiivsuse põhjuse leidmiseks.

### 3.6.3. Jahutussüsteemi rikkest tekitatud võimsuspiirang

Elektrituuliku töö juures on olukordi, kus on vajalik elektrituuliku võimsus piirata alla nimivõimsuse. Sellise juhtimise eesmärgiks on kaitsta erinevaid elektrituuliku komponente kahjustuste eest. Elektrituulikute juhtimissüsteem on arendatud töötama võimalikult autonoomselt, mis tähendab, et elektrituuliku juhtimissüsteemi on tihti sisse kirjutatud olukordi kus elektrituuliku automaatne võimsuspiirang aktiveeritakse. Sellistel olukordadel on oluline kontrollida automaatse võimsuspiirangu põhjust.

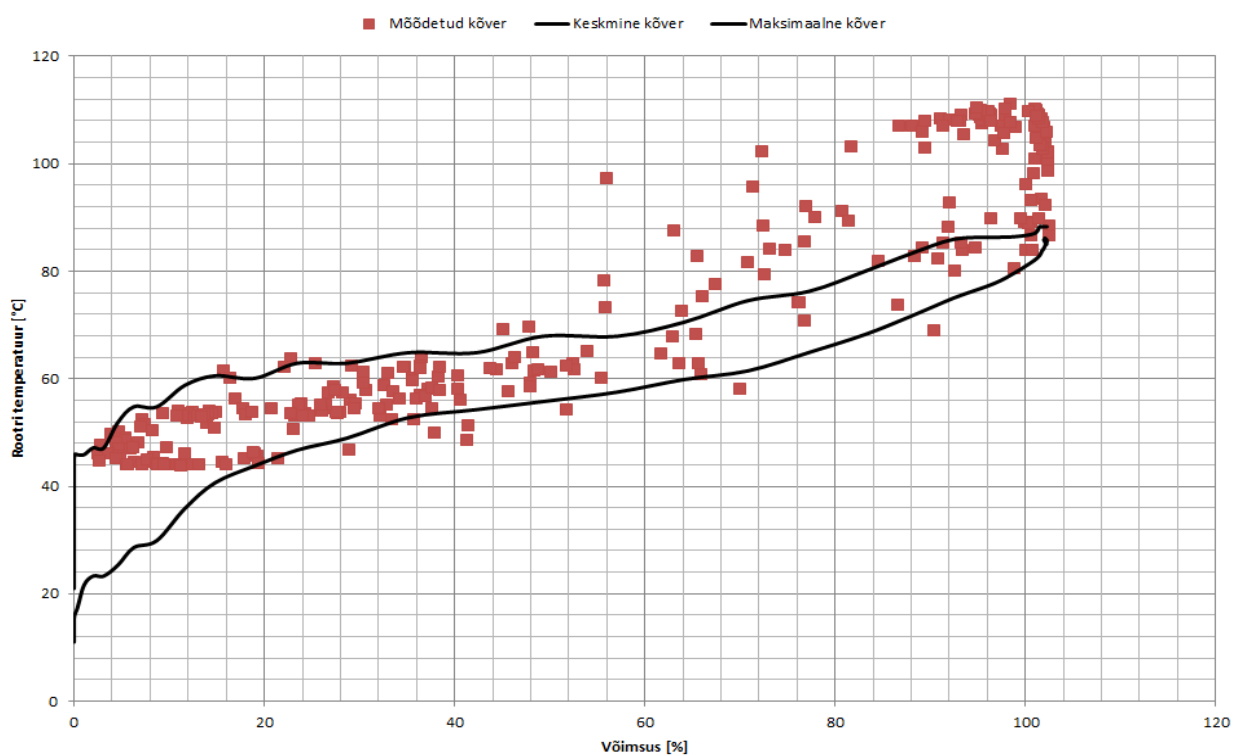


Joonis 3.23 Võimsuspiirangu esinemine võrreldes normaalse võimsuskõveraga

Joonisel 3.23 on kujutatud olukorda, kus on kasutatud võimsuskõvera analüüsi ja on selle kaudu avastatud võimsuspiirang ehk elektrituuliku väljundvõimsus on madalam nimivõimsusest kogu tuulekiiruste diapasoni ulatuses. Võimsuspiirang sellisel kujul on tingitud kas võrguoperaatori poolsest sekkumisest või siis elektrituuliku enda seadetest. Selles olukorras ei näidanud tagasiside võrgu poolt ega ka elektrituuliku veateade, mis oli elektrituuliku võimsuspiirangu põhjuseks. Põhjuse leidmiseks kasutatakse teiste parameetrite kõverate kontrolli.



Joonis 3.24 Staatori temperatuuri muutumise võrdlemine erineval väljundvõimsusel näitab normaalsetest piiridest väljumist.



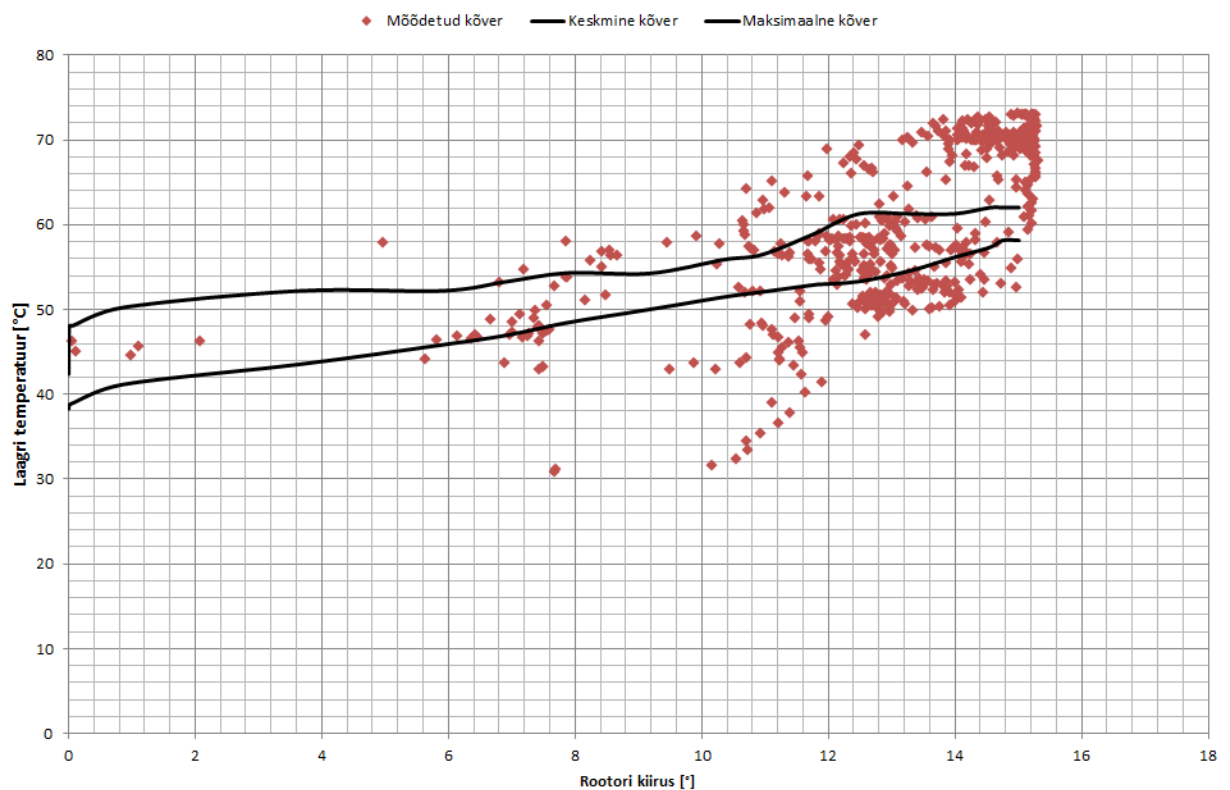
Joonis 3.25 Rootori temperatuuri muutumise võrdlemine erineval väljundvõimsusel näitab normaalsetest piiridest väljumist.

Joonisel 3.24 ja 3.25 on kujutatud temperatuuri kõverate kontrolli ja nende kaudu on leitud, et nii staatori kui ka rootori temperatuurid on kõrgemad kui normaalrežiimil lubatud ja staatori ning rootori kõrgemad temperatuurid on aktiveerinud automaatse võimsuspiirangu. Temperatuuri kõverate kontrollimisel tuleb töödeldud kõvera kontrollil kasutada suurema ala kontrolli, sest temperatuuri väärtus sõltub paljudest parameetritest sealhulgas programmist, mis kontrollib jahutussüsteemi toimimist.

### 3.6.4. Laagri temperatuuri tõus

Elektrituuliku juhtimisprogrammides on temperatuuri, rõhu ja teiste parameetrite veateated seadistatud kui maksimaalsed või minimaalsed väärtused, mis tähendab aga, et on olukordi kui probleem komponenti töös on võimalik leida enne kui elektrituulik saadab välja veateate. Selleks tuleb jälgida väärtuste muutumist elektrituuliku töö käigus.

Joonisel 3.26 on näha laagri temperatuuri kõvera kontrolliga avastanud kõrgemad kui tavalised temperatuurid generaatori laagril. Teisi temperatuuri tõusule reageerivaid alarme lähedal olevast süsteemist ei esinenud. Kuna tegemist on kuluva süsteemiga on alust kontrollida laagri määrdesüsteemi kuid põhjus võib selles olukorras olla tingitud ka laba kahjustusest.

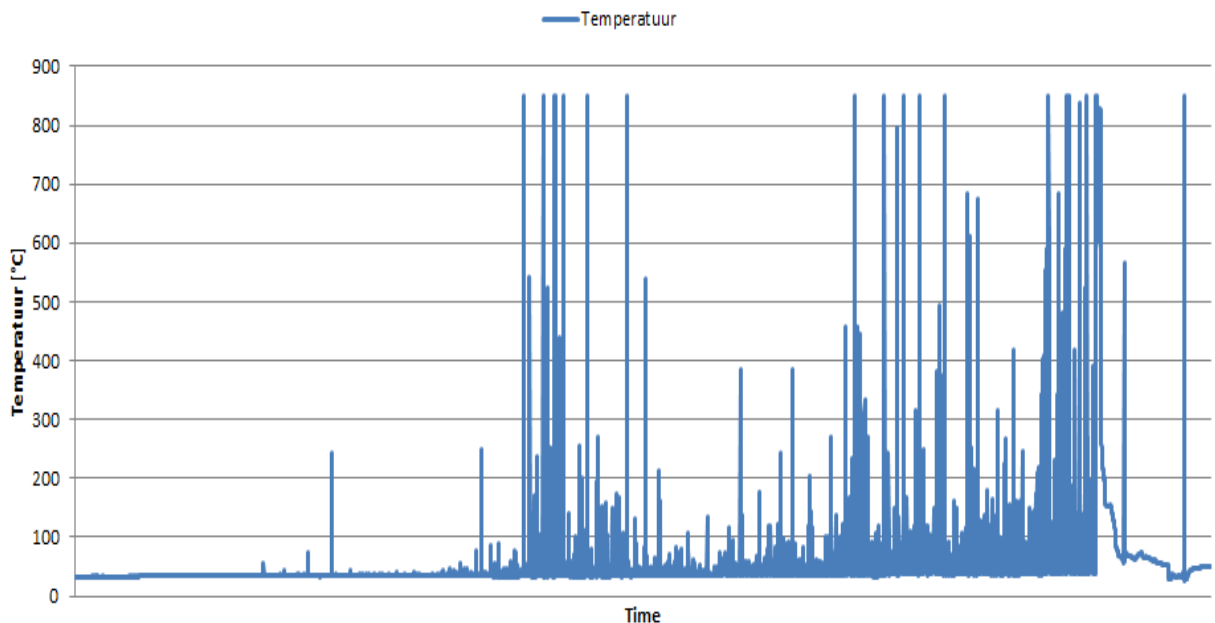


Joonis 3.26 Laagri temperatuuri muutumise võrdlemine erineval väljundvõimsusel näitab normaalsetest piiridest väljumist.



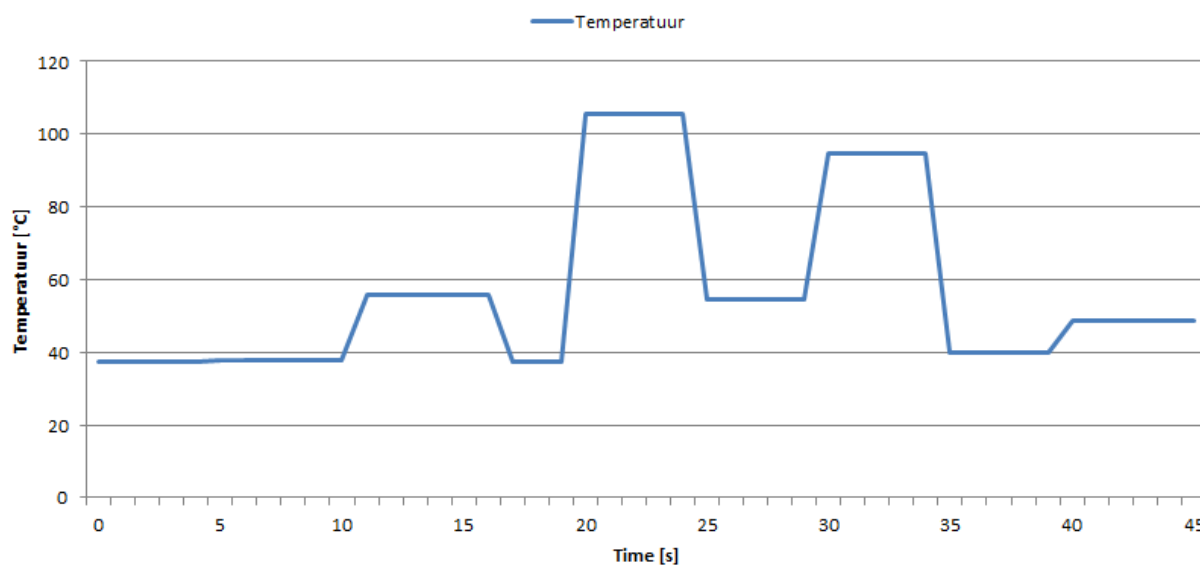
### 3.6.5. Sensori vigade leidmine ja parameetri muutumiskiirus

Elektrituuliku sensorite vigade kiire leidmine on tähtis parandamaks tuuliku *availability*'it ja selle kaudu toodangut, kuna sensori vead põhjustavad vale alarme ja nende kaudu tuuliku mittevajalikku seiskamist või alanormaalsele režiimile ümberlülitamist. Informatsiooni mudeli abil on võimalik leida sensori andmete vigu läbi mõõtmis- ja ajakihi. Joonisel 3.27 on kujutatud vigasest sensorist kogutud andmed. Jooniselt on näha olukorrad, mida on suhteliselt lihtne määrata kui sensori viga, sest sensori väärtused on väljaspool füüsilisi piire, kuid see ei ole alati nii seega on vajalik lisakontroll kasutades muutumiskiiruse kontrolli. Joonisel 3.28 on näha sensori viga, kus väärtus muutub kiiresti jäädes siiski füüsiliselt normaalsesse piiridesse, (kuni 100 kraadini). See, et tegemist on sensori veaga on lihtsalt kindlaks määratav, kuna see tipp kestab alla 10 sekundi.

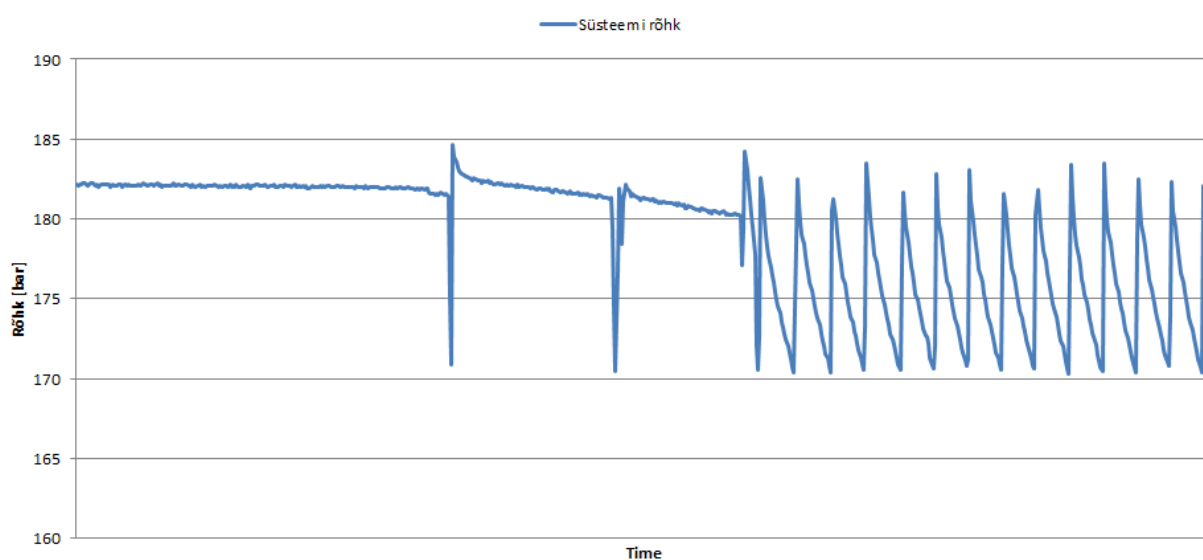


Joonis 3.27 Sensori mõõtmistulemused ajas näitavad väärtuste kiiret muutumist.

Joonisel 3.29 on kujutatud veel üks aja ja mõõtmise õigsuse kontrolli vajalikusse näide. Joonisel on kujutatud süsteemi rõhu muutumine ja joonisel on näha, et ühest hetkest hakkavad toimuma kiired ja süstemaatilised näidu muutused. Põhjus on leke süsteemis ja automaatne pumba kontroll suudab hoida süsteemi ettenähtud väärtuse vahemikus, seega väärtuse enda kontrollimine annab vähe, kuid parameetri muutumiskiiruse kontrollimine aitab probleemi leida.



Joonis 3.28 Mõõtmistulemuse muutumine ajas näitab, et väärtuse tõus ja langus on liiga kiired, et need füüsikaliselt võimalikud oleks.



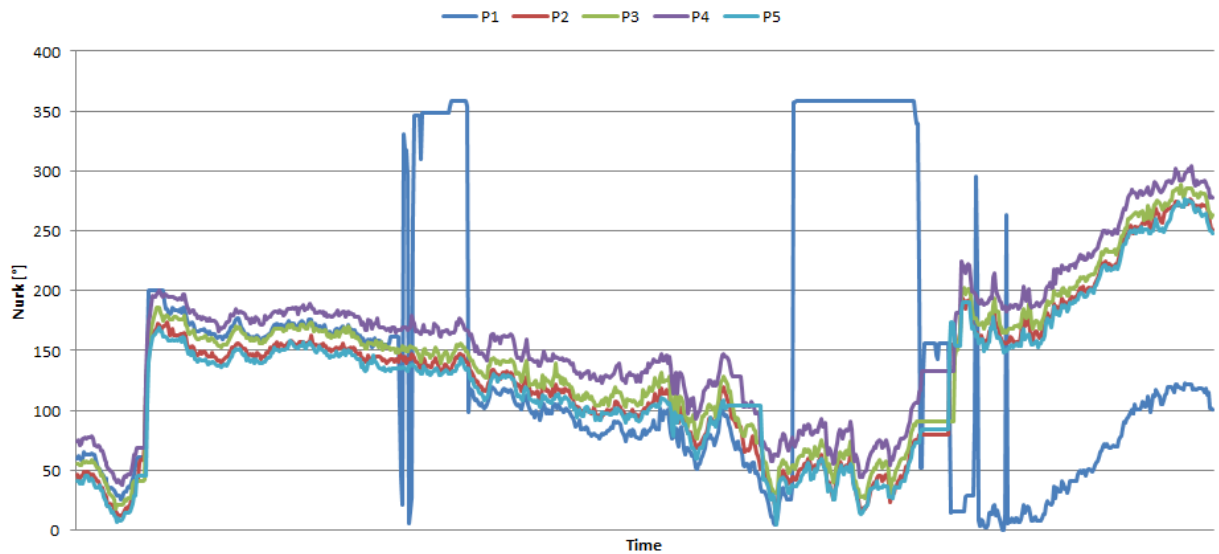
Joonis 3.29 Süsteemi rõhu muutumine ajas kiireneb lekke tõttu ja pumba töötükkel kiireneb olulisel määral.

### 3.6.6. Gondli suuna vigade leidmine

Viimastel aastatel on hakatud rohkem tähelepanu pöörama gondli valele joondumisele, mis on tingitud tuule suuna mõõtevigadest. Tuule suuna valesti mõõtmine võib olla tingitud:

- Gondli pööramiseadme ja anemomeetri väärtuste vales seadistamisest
- Anemomeetri vales joondumisest
- Õhuvoolu moonutustest
- Labadele mõjuva ja anemomeetrile mõjuva tuule suuna erinevusest

Joonisel 3.30 on kujutatud süsteemi gondli suunad ajas ja jooniselt on näha pärast elektrituuliku kontrolli, et süsteemis esineb viga mida kujutavad vertikaalsed sirged graafikul ja süsteemi seadetes on tekkinud kestev viga ja elektrituuliku gondli suund on paigast ära võrreldes teiste elektrituulikute suunaga. Selline viga ei avalduks võimsuskõveral, sest elektrituuliku tuuleenergia püüdmise efektiivsus ei ole mõjutatud kuid elektrituuliku energia tootlikus võib olla. Mõistlik on kasutada tuuleelektrijaama sisest gondli suuna ja tuule suuna keskmist ja võrrelda kõiki elektrituulikuid selle suuruse vastu.



Joonis 3.30 Elektrituuliku Gondli suuna muutus ajas näitab nurga suurt kõrvalekallet normaaltöö režiimil võrreldes teiste elektrituulikutega.

### 3.7. Informatsiooni mudeli kasutamine

Tuuleelektrijaama operaator saab koostatud informatsioonimudelit kasutada selleks, et hinnata elektrituuliku tööd läbi erinevate tulemuslikkuse indikaatorite, (*key performance indicator*), arvutamise ja elektrituuliku parameetrite suhete võrdluse.

Informatsiooni mudelisse kogutud andmetega saab arvutada erinevaid tulemuslikkuse indikaatoreid, mis annavad kokkuvõtlikult ülevaate erinevate elektrituulikute tööst ühes tuuleelektrijaamas ja erinevates tuuleelektrijaamades ja võimaldades elektrituulikuid ning tuuleelektrijaamu tulemuslikkuse indikaatorite alusel võrrelda.

Elektrituulikute juures kasutatakse kõige rohkem tuulikute kasutatavuse tegurit ehk elektrituuliku töös oleku indikaatorit. Elektrituuliku kasutatavuse teguri arvutamiseks on palju erinevaid meetodeid, kuid enamasti kuuluvad nad järgmistesse kategooriatesse [31]:

- Aja põhine kasutatavustegur
- Toodangu põhine kasutatavustegur

Aja põhine kasutatavustegur arvutatakse informatsiooni mudeli aja kihti kogutud kestvuste andmeridade põhjal. Näiteks on defineeritud ühe tuuliku tootja Vestas poolt kasutatavustegur kui protsent ajaperiодist, mille kestel tuulik on võimeline tööks. Üldine kasutatavusteguri valem on järgmine:

$$T_{Ta}(\%) = \frac{T_{h1}}{T_{h2}} \quad (3.8)$$

kus  $T_{Ta}$  on ajapõhine kasutatavustegur,  $T_{h1}$  on töös oleku aeg,  $T_{h2}$  on kogu vaadeldav ajaperiод. kasutatavusteguri ajaperiодi vähendavad plaanilised ja mitteplaanilised hooldused, katkestused elektrivõrgu töös ja kontrollsüsteemi vead. Kasutatavusteguri arvutusest jäetakse tavaliselt välja plaanitud hooldused, ebasoodsad keskkonna tingimused ja väärmatu jõu tagajärjed. Kui aga kasutatavustegur arvutus võtab arvesse kõik elektrituuliku seiskumised, kus see ei ole sõltumata põhjusest võimeline töötama siis seda kasutatavustegurit nimetatakse tehniliseks kasutatavusteguriks.

Toodangu põhine kasutatavustegur arvutatakse kasutades informatsioonimudeli mõõtmiste ja arvutuste kihti. Igas arvutuses on toodangu põhine kasutatavustegur defineeritud kolme informatsiooni kategooria järgi elektrituuliku tegelik toodang, kaotatud toodang ja informatsiooni kategooriad, mida arvesse ei võeta, näiteks plaanilised hooldused. Defineeritakse toodangupõhine kasutatavustegur järgmiselt:

$$T_{Pa}(\%) = 1 - \frac{P_{LP}(Wh)}{P_{AP}(Wh) + P_{LP}(Wh)} \quad (3.9)$$

kus  $T_{Pa}$  on toodangu põhine kasutatavustegur,  $P_{LP}$  on kaotatud toodang,  $P_{AP}$  on tegelik toodang.

Toodangupõhist kasutatavustegurit saab jagada vastavalt informatsiooni kategooriatele, milliseid arvutuses arvesse võetakse - süsteemi täielikuks või süsteemi tehnilise kasutatavusteguri arvutuseks. Süsteemi täielik toodangu põhine kasutatavustegur võtab arvesse tegelikku toodangut ja kogu võimalikku toodangut selles ajaperiодis. Selles arvutuses võetakse arvesse kõik võimalikud toodangu kaod, sõltumata nende tekkepõhjusest [31].

Tehniline toodangu põhine kasutatavustegur võtab arvesse tegelikku toodangut ja toodangut, mida elektrituulik on võimeline tootma vastavalt tehnilistele spetsifikatsioonidele. Nende kahe eelnimetatud kasutatavuse teguri näitaja peamiseks erinevuseks on plaanitud hoolduste, elektrivõrgu poolt põhjustatud seisakute ja väärmatu jõu poolt põhjustatud seisakute arvestamine või mitteamarvestamine [32].

Kasutustegur, (*capacity factor*), on protsendiline väärtus, mis näitab kui palju elektrienergiat tuulik tootis võrreldes sellega kui palju elektrienergiat elektrituulik oleks võinud toota kui ta oleks kogu perioodil nimivõimsusel töötanud. Kasutustegur võib olla arvutatud nii tegeliku toodangu kohta kui ka potentsiaalse energia kohta.

$$\text{Tegelik kasutustegur} = \frac{\text{Tegelik toodang}}{\text{Maksimaalne toodang}} \quad (3.10)$$

$$\text{Potentsiaalne kasutustegur} = \frac{\text{Potentsiaalne toodang}}{\text{Maksimaalne toodang}} \quad (3.11)$$

Kasutustegur näitab kui palju elektrituulik oma asukohal elektrienergiat toodab. Nagu joonis 3.4 näitab võib see tuuleelektrijaama siseselt palju erineda.

Toodangu suhte indikaator on tegeliku toodangu normaaltöörežiimil ja potentsiaalse toodangu suhe, mis arvutatakse järgmiselt:

$$\text{Toodangu suhe} = \frac{\text{Tegelik toodang}}{\text{Potentsiaalne toodang}} \quad (3.12)$$

Toodangu suhte näitaja alusel määratakse kas elektrituulik toodab vastavalt ettenähtule. Normaalse režiimil alatoodangut võib põhjustada laba vigastus, vale joendus, laba kalde süsteemi viga, temperatuuri ja turbulentsi mõjud. Toodangu suhte tulemuslikkuse indikaator võimaldab lihtsalt leida eelnimetatud vead, kuna sellistel juhtudel on vastava elektrituuliku indikaator alla ühe [24].

Teised tulemuslikkuse indikaatorid võivad veel arvesse võtta toodangu kadu, tulupõhist kasutatavusteguri arvutust ja prognoosi täpsust määravaid indikaatoreid (MAPE, MSE jne).

## Lõputöö kokkuvõte

Uurimistöös esitatud erinevate elektrituuliku tootjate seadmeid haldava operaatori vajadusi arvestava elektrituulikute reaalaajajälgimissüsteemi arendus põhineb elektrituulikute kommunikatsiooni ja juhtimise standardil, et kindlustada erinevate elektrituulikute ühendamise ja võimalikult edukas modelleeritavus andmete analüüsimise lisaväärtuse tõstmiseks. Elektrituulikute kommunikatsiooni ja juhtimise standard elektrituuliku sensorite poolt väljastatava informatsiooni osas näeb ette ja võimaldab objektorienteeritud modelleerimist, võimaldades seeläbi kommunikatsiooni erinevate seadmete vahel. Objektorienteeritud mudeli puhul kirjeldatakse igat reaalselt komponenti kui objekti millel on mõõdetavad väärtused, binaarsed olekud, käsud ja seadeväärtused. Komponentide modelleerimiseks objektide tegemiseks on vajalik kindlaks teha reaalse komponendi kogu informatsioon ja funktsionaalsus.

Elektrituuliku objektorienteeritud informatsioon kaardistatakse ja edastatakse kasutades sideprotokolle. Elektrituulikute side tarvis kasutatakse peamiselt veebipõhiseid protokolle. Kõigi peamistes dispetšjuhtimissüsteemides kasutatavate protokollide juures on välja arendatud TCP/IP põhised lisad. Sellisteks lisadeks on DNP 4.0 TCP/IP, IEC 60870-5-104 ja Modbus TCP/IP. Kuigi andmeside üle veebiühenduse on suhteliselt aeglane ja vahel ka ebakindel võrreldes dispetšjuhtimissüsteemide tavalise talitlusega on elektrituulik enamasti juhtimis- ja kontrollikeskusest geograafiliselt kaugel ja veebitehnoloogiate kasutamine on seetõttu lihtsaim või sageli ka ainus võimalus andmeside korraldamiseks.

Käesoleva töö raames välja töötatud tuuleelektrijaama gruppide reaalaajajälgimissüsteem on mõeldud kasutamiseks juhul kui tuuleelektrijaama operaatori järelevalve ja juhtimise all on erinevate elektrituulikute tootjate seadmed, eesmärgiks oli leida lahendus erinevate elektrituuliku tootjate poolt arendatud süsteemide vähestest koostöö võimalustest tekitatud informatsiooni vahetuse piirangutele. Peale elektrituuliku tootja spetsiifilise dispetšsüsteemi on tuuleelektrijaama operaatori efektiivseks tööks vaja veel täiendavaid süsteeme hoolduse planeerimiseks, toodangu planeerimiseks ja teavituste haldamiseks. Lisaks eelpool toodud süsteemidele, millede peamine eesmärk on elektrituulikute igapäevase töö juhtimine on reaalaajajälgimissüsteemi juures välja pakutud lahendus raporteerimissüsteemi ja andmete analüüsi automatiseerimiseks.

Reaalaajajälgimissüsteemi arendamise juures on vaja integreerida informatsiooni paljudest erinevatest allikatest: sealhulgas tuuleelektrijaamadest, võrgu alajaamadest ja elektrivõrgust ning lisada meteoroloogilised ja finantsandmed teenustepakkujatelt. Kuna kogutav informatsioon võib tulla väga erinevate sideprotokollide kaudu siis on mõistlik kasutada suurte võimalustega

ühendusliidest, mille näiteks on esitatud lahenduses OPC serveri tehnoloogia. OPC server ja OPC kliendid saavad kasutada andmete täielikkuse säilitamiseks nii puhverdamise kui ka liiasuse meetodit, mis tagab kõrge andmete täielikkuse süsteemis. Kasutades OPC serveri liidest on võimalik vabastada kõik andmed elektrituulikute tootjate suletud süsteemidest ja teisendada kogutud andmed standardsele, mugavat edasist kasutamist võimaldavale kujule. See tähendab, et OPC serverist reaalaajajälgimissüsteemi andmekogumisserverisse jõuavad andmed kindlate ajavahemike järgi, kindlate ühikutena ning lihtsalt töödeldaval kujul. Eelkirjeldatud lahendus täidab reaalaajajälgimissüsteemi peamise eesmärgi, milleks on erinevate elektrituulikute informatsiooni edastamine teistesse operatiivjuhtimiseks vaja minevatesse süsteemidesse.

Käesoleva töö osana välja töötatud reaalaajajälgimissüsteemi lahendus võimaldab ületada mitmeid töös kirjeldatud elektrituulikute opereerimisega seotud probleeme muutes sealhulgas efektiivsemaks andmekogumis- arhiveerimis- ja töötlusserveri kasutamise. Esitatud lahenduse juures kasutatakse kolmanda osapoole välja arendatud serverit, mis sünkroniseerib kõik sisse tulevad andmed ning kasutab efektiivset andmepakkimise algoritmi. Andmete sünkroniseerimine võimaldab kiirendada kõiki raporteerimisprotsesse, kuna serverist võib päringuid teha erinevatest süsteemidest pärinevatele andmetele ning vastuseks saab üksteisega juba sünkroniseeritud andmed. Andmete efektiivne pakkimine on vajalik pikaajaliste ajalooliste andmete säilitamiseks, efektiivse pakkimise võimekuse puudumine on probleem kui kasutada OPC serverist kõige kiirema uuenduskiirusega andmeid, mis on tavaliselt 1 kuni 10 sekundit. Andmete efektiivne pakkimine lahendab olulise probleemi, mis tuleneb sellest et elektrituulikute enda salvestusseadmete mälumahud ei võimalda kogutud andmeid piisava perioodi säilitada. Valitud serveril on arvutusmootor, mis on võimeline vastavalt plaanile ja vastavalt kas etteantud funktsioonide või kasutaja poolt lisatud funktsioonide abil arvutama kõik vajalikud tootlikkuse indikaatorid ja analüüsiks vaja minevad modelleerimisandmed. Eelkirjeldatud funktsionaalsusega serveri valik võimaldab lahendada ka probleemi, et elektrituuliku tootja süsteemi toimimine on sel määral varjatud, et selles leiduda võivaid analüüsi või andmetöötluse vigu on raske avastada. Elektrituuliku operaatori efektiivseks tööks peab reaalaajajälgimissüsteemi kasutajaliides võimaldama kiiret ülevaadet kogu tuuleelektrijaamade grupi tööst. Selleks on uurimistöös soovitatud kasutada reaalaajajälgimissüsteemi hierarhilist ülesehitust, mis võimaldab kasutajal näha tervikpilti ning vajadusel liikuda aina detailsema üksuse vaate juurde. Kasutajaliideses puhul on uurimistöös soovitatud võimalikult palju funktsioone automatiseerida, et kogu oluline info jõuaks kiiresti eelnevalt kindlaksmääratud kasutajateni. Näitena on uurimistöös toodud lihtne viis töö optimeerimiseks, mille puhul kogu

vajalik info antakse kasutajale ühest süsteemist nii et hoolduse planeerija teaks hinnanguid nii prognoositud elektritoodangust, tegelikust elektritoodangust kui ka finantsinfo sisendist.

Reaalajajälgimissüsteemi kasutajaliidese peamine eesmärk on teha elektrituulikute reaalajajälgimissüsteem efektiivselt kasutatavaks ja käesolevas töös esitatud lahendus sisaldab selleks hooldusplaneerimise ja teavituse ning toodangu planeerimise süsteemi. Valitud kasutajaliides saab süsteemi andmed andmekogumisserverist ja kasutajaliidese sees liiguvad andmed toodangu planeerimis-, hooldusplaneerimis- ning teavitussüsteemi vahel. Seega toodangu planeerijal on teada nii järgmise ööpäeva hooldusplaani, meteoroloogiline info kui ka elektrituulikute hetke veateated ning estimateeritud hinnang, millal probleemne elektrituulik uuesti töökorda saab. Kasutades toodangu planeerimissüsteemi võib toodangu planeerija teha toodangu plaani esitamise kaudu ettepaneku hoolduse edasi lükkamiseks ning see info liigub läbi teavitussüsteemi vastutavate isikuteni ja vastupidi hoolduse planeerija võib sama süsteemi kaudu taotleda toodangu plaani muutust. Seega kasutades ühtset kasutajaliidest on lahendatud operatiivjuhtimises kasutatavate süsteemide ühendamine.

Elektrituulikute väljundparameetrite analüüsi juures on operaatore seisukohalt oluline analüüsi regulaarsus. Regulaarse analüüsiga saab hinnata tuulegeneraatori suhtelist tulemuslikkust ja leida selle abil probleemseid elektrituulikuid. Tuulikute toimimise pidev analüüs ja kiire reageerimine probleemidele viib tuuliku mitteplaaniiliste seisakute aja vähenemiseni ja seekaudu suurema toodanguni. Kuna elektrituuliku juhtimisprotsess on suhteliselt keerukas ja paludest kiiresti muutuivatest sisenditest sõltuv siis informatsiooni kogus, mida elektrituulikust kogutakse võib olla suur. Kogutud informatsiooni analüüsimine kogu tuuleelektrijaamade grupis on mahukas ettevõtmine, seda tööd saab lihtsustada kasutades elektrituulikute modelleerimist. Elektrituuliku töö suure varieeruvuse tõttu muutuvad paljud väljundparameetrid suurel määral ja efektiivseks analüüsiks on vaja kasutada üheaegselt mitmeid erinevaid eelnevalt leitud funktsioonide kõveraid, mille kaudu on võimalik hinnata kas elektrituuliku töö sarnastel tingimustel on olnud modelleeritud normist erinev ning vajadusel leida kõrvalekalde põhjuseid ja anda soovitusi kõrvalekalde likvideerimiseks või selle mõju vähendamiseks.

Autor toetudes käesoleva töö raames tehtud uuringutele ja enda praktilistele kogemusele uuritava alal on seisukohal, et esitatud reaalaja jälgimissüsteem on esialgne lahendus mida on võimalik oluliselt edasi arendada lisades muuhulgas täiustatud analüüsi rakendusi, et parandada süsteemi võimekust kiiresti avastada vähem efektiivseid elektrituulikuid ning lisades süsteemi iseõppivaid ennustumudeleid toodangu jooksvaks prognoosimiseks ja elektrituulikute kõige otstarbekama hooldusaja prognoosimiseks ehk ennustuspõhiseks hooldamiseks. Uurimis- ja arendustööd on vaja jätkata ka statistiliste analüüsi meetodite ja nende alusel loodavate mudelite



täiustamiseks eesmärgiga suurendada kaugjälgimissüsteemi integreeritud diagnostikaliidese võimekust kiiresti ja täpsemalt elektrituuliku olekut ja süsteemide vigu diagnoosida.

## Kasutatud kirjandus

- [1] Wind turbines – part 25-1: Communications for monitoring and control of wind power plants –Overall description of principles and models. Eesti standard EVS-EN 61400-25-1:2007. Tallinn: Standardikeskus.
- [2] Wind turbines – Part 25-2: Communications for monitoring and control of wind power plants –Information models“. Eesti standard EVS-EN 61400-25-2:2007. Tallinn: Standardikeskus.
- [3] M. Seo, T. Kim, H. Lee .Implementation of Web Services Based on IEC 61400-25 for Wind Power Plants. – ICCAS-SICE 2009, 2082-2086. [Online] IEEE (01.05.2015).
- [4] J. F. Manwell, J. G. MacGowan, A. L. Rogers. Wind Energy Explained: Theory, Design and Application. 2nd Edition John Wiley and Sons 2009.
- [5] G. R. Clarke, D. Reynders. Practical Modern SCADA Protocols: DNP2,60870.5 and Related Systems. Oxford: Elsevier Science & Technology 2004.
- [6]Wind turbine picture [WWW] <http://www.power-technology.com/projects/crystal-rig/crystal-rig4.html>. (10.05.2015).
- [7] Wind turbines – Part 25-3: Communications for monitoring and control of wind power plants – Information exchange models. Eesti standard EVS-EN 61400-25-3:2007. Tallinn: Standardikeskus
- [8] Wind turbines – Part 25-4: Communications for monitoring and control of wind power plants –Mapping to communication profile. Eesti standard EVS-EN 61400-25-4:2007. Tallinn: Standardikeskus
- [9] M. Meldorf, T. Tikk, J. Kilter. Elektrivõrgu operatiivjuhtimissüsteem. TTÜ kirjastus 2010.
- [10] K. Curtis. A DNP3 Protocol Primer [WWW] <http://www.dnp.org/aboutus/dnp3%20primer%20rev%20a.pdf> (24.04.2015).
- [11] C. Strauss. Practical Electrical Network Automation and Communication Systems. Oxford: Newnes 2003.
- [12] M. Son, M. Yi. A Study on OPC Specifications: Perspective and Challenges. International Forum on Strategic Technology 2010, 193-197. [Online] IEEE (14.04.2015).
- [13] W. Mahnke, S. Leitner, M. Damm. OPC Unified Architecture. Berlin: Springer-Verlag 2009.

- [14] P.Tavner .Offshore Wind Turbines – Reliability, Availability and Maintenance. London: Institution of Engineering and Technology 2012.
- [15] Nordex Control 2: Intelligent Management for an Optimised „Wind Harvest“. [WWW] [http://www.nordex-online.com/fileadmin/MEDIA/Sonstiges/Nordex\\_Control\\_2\\_EN.pdf](http://www.nordex-online.com/fileadmin/MEDIA/Sonstiges/Nordex_Control_2_EN.pdf). (20.04.2015)
- [16] Enercon wind energy converters: Technology and service [WWW] [http://www.enercon.de/p/downloads/ENERCON\\_TuS\\_en\\_web\\_072013.pdf](http://www.enercon.de/p/downloads/ENERCON_TuS_en_web_072013.pdf). (19.04.2015)
- [17] R. Mackiewicz. Overview and Benefits of the IEC 6180 Standard. Power Engineering Society General Meeting, 2006 [Online] IEEE.
- [18] PI Interface for OPC DA [WWW] [cdn.osisoft.com/interfaces/3252/PI\\_OPCInt\\_2.4.4.105.pdf](cdn.osisoft.com/interfaces/3252/PI_OPCInt_2.4.4.105.pdf) . (20.05.2015)
- [19] OPC Interface Failover Manual [WWW] [cdn.osisoft.com/interfaces/3424/PI\\_OPCInt\\_2.5.0.9a.pdf](cdn.osisoft.com/interfaces/3424/PI_OPCInt_2.5.0.9a.pdf) . (24.05.2015)
- [20] Historian SE 2.0 PI Server Application User's Guide [WWW] <https://rockwellautomation.custhelp.com/ci/fattach/get/104911/> (24.05.2015).
- [21] PI Live Library [WWW] <https://livelibrary.osisoft.com/LiveLibrary/content/en/PIserver2014-v1>.(02.05.2015).
- [22] C.S.Gray, F.Langmayr,N.Haselgruber, S.J.Watson. A Practical Approach to the Use of SCADA Data for Optimized Wind Turbine Condition Based Maintenance. [WWW] [http://www.uptime-engineering.com/downloads/Practical\\_Approach\\_SCADA\\_Wind\\_Maintenance\\_GRAY\\_etal.pdf](http://www.uptime-engineering.com/downloads/Practical_Approach_SCADA_Wind_Maintenance_GRAY_etal.pdf). (24.05.2015)
- [23] Wind turbines – Part 26-1: Time-based availability for wind turbines. IEC tehnikaline spifikatsioon IEC-TS-61400-26-1:2014. Tallinn: Standardikeskus
- [24] Wind turbines – Part 26-2: Production-based availability for wind turbines. IEC tehnikaline spifikatsioon IEC-TS-61400-26-2:2014. Tallinn: Standardikeskus
- [25] Wind turbines – Part 12-2: Power performance of electricity-producing wind turbines based on nacelle anemometry. IEC standard IEC-61400-12-2:2013. Tallinn: Standardikeskus
- [26] P. Chaves-Schintek, K. Mönnich. Temporal and Energetic Downtime losses and its Influence on Wind Farm Economics. [WWW] [http://www.dewi.de/dewi\\_res/fileadmin/pdf/publications/Magazin\\_42/08.pdf](http://www.dewi.de/dewi_res/fileadmin/pdf/publications/Magazin_42/08.pdf). (24.05.2015)

- [27] Y. Wan, E. Ela, K. Orwig. Development of Equivalent Wind Plant Power-Curve. WindPower conference 2010, Dallas, Texas 23-26. [WWW] <http://www.nrel.gov/docs/fy10osti/48146.pdf>. (24.05.2015)
- [28] Wind turbines – Part 12-1: Power performance of electricity-producing wind turbines. IEC standard IEC-61400-12-1:2014. Tallinn: Standardikeskus
- [29] M. Wilkinson, B. Darnell, T. v. Delft, K. Harman. Comparison of methods for wind turbine condition monitoring with SCADA data. IET Renewable Power Generation 2013,8(4), 390-397 [Online] IEEE.
- [30] A. Kusiak, A. Verma. Monitoring Wind Farms With Performance Curves. IEEE Transactions on Sustainable Energy 2013, 4 (1) ,192-199 [Online] IEEE.
- [31] S. Faulstich, P. Lyding, P. Tavner. Effects of Wind Speed on Wind Turbine Availability. EWEA 2011, 14.-17.03.2011, Belgia, Brüssel [WWW] [http://www.energiesystemtechnik.iwes.fraunhofer.de/en/presse-infothek/publications/list\\_of\\_publication/2011/effects\\_of\\_wind\\_speedonwindturbineavailability.html](http://www.energiesystemtechnik.iwes.fraunhofer.de/en/presse-infothek/publications/list_of_publication/2011/effects_of_wind_speedonwindturbineavailability.html). (24.05.2015)
- [32] N. Conroy, J. P. Deane, B. P. O Gallachoir .Wind turbine availability: Should it be time or energy based? - A case study in Ireland. Renewable Energy 2011,36 (12), 2967-2971, [Online] ScienceDirect.