



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
ELEKTROENERGEETIKA INSTITUUT

# Praktikumid õppeaines "Elektrijaamad"

Elektroenergeetika õppekava

Energiasüsteemide õppetool

Magistritöö

Õppetooli juhataja

prof. H. Tammoja

Juhendaja

prof. H. Tammoja

Lõpetaja

A. Fomin

Tallinn 2015

## Töö kaitsmine

Lõputöö on kaitsstud ..... 201.... a hindele .....

Kaitsmiskomisjoni esimees (nimi ja allkiri)\_\_\_\_\_

## **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

<i>Autor:</i> Andrei Fomin	<i>Lõputöö liik:</i> Magistritöö
Töö pealkiri: PRAKTIKUMID ÕPPEAINES „ELEKTRIAAMAD“	
<i>Kuupäev:</i> 27.05.2015	<i>69 lk</i>
<i>Ülikool:</i> Tallinna Tehnikaülikool	
<i>Teaduskond:</i> Energeetika	
<i>Instituut:</i> Elektroenergeetika	
<i>Õppetool:</i> Energiasüsteemid	
<i>Töö juhendaja(d):</i> Professor Heiki Tammoja	
<i>Töö konsultant (konsultandid):</i>	
<i>Sisu kirjeldus:</i>	
<p>Käesoleva lõputöö peaesmärgiks on uurida ja pakkuda välja erinevaid võimalusi õppeaine „Elektrijaamad“ uute praktiliste tööde läbiviimiseks. Tööde väljatöötamisel arvestatakse õppeaine sisuga ning õpiväljunditega.</p> <p>Lõputöös kirjeldatakse viit praktilist tööd ning kuuendas osas kirjeldatakse elektrijaama külastust. Praktiliste töödena antakse ülevaade gaasiturbiinelektrijaamadest, elektrijaamade karakteristikute korrigeerimisest, päikeseelektrijaamadest, elektrijaama elektrilisest osast ning sisepõlemismootoriga elektrijaamadest.</p> <p>Teoreetilises osas kirjeldatakse valitud töö valdkonda ning katseseadme, mida kasutatakse tööde läbiviimiseks, ehitust ning tööpõhimõtet. Töö läbiviimise juhend sisaldab juhtnõore katse läbiviimise etappidest ning üliõpilase poolt koostatava aruande sisu kohta. Ekskursiooni kirjelduse osa sisaldab punkte, mis on vajalikud aruande koostamiseks.</p>	
<i>Märksõnad:</i>	
<p>Gaasiturbiinelektrijaam, elektrijaamade põhiseadmete karakteristikud, päikeseelektrijaam, päikesepaneelide volt-amper karakteristik, generaatori kaitse, sisepõlemismootoriga generaator, Auvere elektrijaam</p>	

## Summary of the diploma work

<p><i>Author: Andrei Fomin</i></p> <p><i>Title: PRACTICAL SESSIONS ON THE SUBJECT OF „POWER PLANTS“</i></p> <p><i>Date: 27.05.2015</i></p>	<p><i>Kind of the work: Master's thesis</i></p> <p><i>69 pages</i></p>
<p><i>University: Tallinn University of Technology</i></p> <p><i>Faculty: Power Engineering</i></p> <p><i>Department: Electrical Power Engineering</i></p> <p><i>Chair: Power Systems</i></p>	
<p><i>Tutor(s) of the work: Professor Heiki Tammoja</i></p> <p><i>Consultant(s):</i></p>	
<p><i>Abstract:</i></p> <p>The main purpose of this thesis is to examine and provide a variety of possibilities for conducting practical works in the subject "Power Stations". The new works are developed with consideration of the subject and learning outcomes.</p> <p>The thesis describes five practical works, and the sixth part describes the visit of a power plant.</p> <p>Gas turbine power plants, power characteristics correction, solar power plants, power plant electric components and internal combustion power plants are overviewed in the practical works .The theoretical part describes the chosen field of work and test equipment's construction and operation, which is used for carrying out the work.</p> <p>The manual of carrying out the work contains instructions for conducting the test phases and the content of the report composed by the student.</p> <p>A description of the tour part consists of the points that are necessary to prepare the report.</p>	
<p><i>Key words: gas turbine power plant, power plant equipment, the main characteristics of the solar power station, solar panels, volt-ampere characteristic, generator protection, internal combustion generator, Auvere power plant</i></p>	

# Sisukord

<b>Lõputöö ülesanne.....</b>	<b>7</b>
Teema põhjendus: .....	7
Töö eesmärk:.....	7
Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:.....	7
Lähteandmed:.....	8
<b>Eessõna .....</b>	<b>9</b>
<b>Sissejuhatus.....</b>	<b>10</b>
<b>1. Gaasiturbiinelektrijaamad .....</b>	<b>14</b>
1.1 Gaasiturbiinid.....	14
1.2 Capstone 30 kW mikroturbiin.....	17
1.3 Gaasiturbiinseadmete katsetamise metoodika.....	21
<b>2. Elektrijaamade põhiseadmete karakteristikute korrigeerimine .....</b>	<b>27</b>
2.1 Soojuselektrijaamade tööpõhimõtte ning põhilised karakteristikud .....	27
2.2 Modelleerimistarkvara EnergyPRO .....	30
2.3 Agregaatide töökorra optimeerimine .....	32
<b>3. Päikeseelektrijaam .....</b>	<b>35</b>
3.1 Päikeseelektrijaama ehitus .....	35
3.2 TTÜ päikesepaneel .....	39
3.3 Päikesepaneelide volt-amper karakteristik.....	40
<b>4. Elektrijaamade elektriline osa .....</b>	<b>45</b>
4.1 Põhiprobleemid generaatori kaitsel.....	45
4.2 Treening- ja modelleerimistarkvara .....	47
4.3 Töötamine modelleeritud skeemiga .....	49
<b>5. Sisepõlemismootoriga elektrigeneraator.....</b>	<b>52</b>
4.4.....	52
5.1 Sisepõlemismootoriga elektrigeneraator.....	52
5.2 Katseseadme valmistamine .....	53
5.3 Katsete läbiviimine .....	57
<b>6. Ekskursioon elektrijaama.....</b>	<b>60</b>
6.1 Eesti Energia Narva Elektrijaamad .....	60
6.2 Auvere elektrijaam.....	61
6.3 Ekskursiooni läbiviimine .....	61
<b>Lõputöö kokkuvõtte .....</b>	<b>62</b>
<b>Lisad .....</b>	<b>69</b>

# Lõputöö ülesanne

Lõputöö teema:	<b>Praktikumid õppeaines „Elektrijaamad“</b>
Üliõpilane:	<b>Andrei Fomin, 132149AAVMM</b>
Lõputöö juhendaja:	<b>Heiki Tammoja</b>
Õppetool:	<b>Energiasüsteemide õppetool</b>
Õppetooli juhataja:	<b>Heiki Tammoja</b>
Lõputöö esitamise tähtaeg:	<b>27.05.2015</b>

---

Üliõpilane (allkiri)

---

Juhendaja (allkiri)

---

Õppetooli juhataja (allkiri)

## Teema põhjendus:

Lõputöö on ajendatud elektrijaamade suurest tähtsusest energiasüsteemis ning vajadusest edendada õppimismeetodeid elektrijaamades toimuvate protsesside tundmaõppimiseks. Käesolev uurimistöö annab ülevaate elektrijaamades toimuvatest soojuslikest ja/võielektrilistest protsessidest, seadmetest, simulaatoritest ja mudelitest.

## Töö eesmärk:

Töö eesmärk on pakkuda välja uusi praktikume (näiteks gaasiturbiin, soojusjaamade mudelid arvutil, EnergyPro kasutamine või mõne teise tarkvara kasutamine, generaatori kaitse jne) Töö hõlmab 5-6 uut tööd. Lisaks kirjeldatakse ekskursioone elektrijaamadesse

## Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

Töö eesmärkide saavutamiseks pakutakse välja järgmised praktikumi tööd:

1. Laboratoorne töö mikroturbiini süsteemiga Capstone C30
2. Laboratoorne töö tarkvaraga EnergyPro- elektritootmise optimeerimine
3. Laboratoorne töö TTÜ päikesepaneelide komplektiga
4. Laboratoorne töö simulaator tarkvaraga- generaatori kaitse
5. Laboratoorne töö bensiinigeneraator seadmega
6. Tutvustav ekskursioon elektrijaama.

**Lähteandmed:**

- erialane kirjandus
- laboratoorsete tööde juhendid
- seadmete kasutusjuhendid
- internet
- juhendaja



## Eessõna

Teema püstitus tuli Tallinna Tehnikaülikooli energeetika teaduskonna Energiasüsteemide õppetooli juhatajalt professor Heiki Tammojalt, kes on ka lõputöö juhendaja.

Töö teoreetilise ja praktilise osa enamik materjale on otsitud iseseisvalt *online* andmebaasidest, TTÜ kirjastuse poolt välja antud õpikutest ja TTÜ õppejõudude konspektidest.

Tänan oma abikaasat Jekaterina Fominat ja KH Energia-Konsult juhatuse liiget Heino Harakut toetava suhtumise eest lõputöö koostamisel.

Andrei Fomin

Harjumaa Tallinn Astangu 60-64

[Fomin.Andrei91@gmail.com](mailto:Fomin.Andrei91@gmail.com)

+372 53 013 778

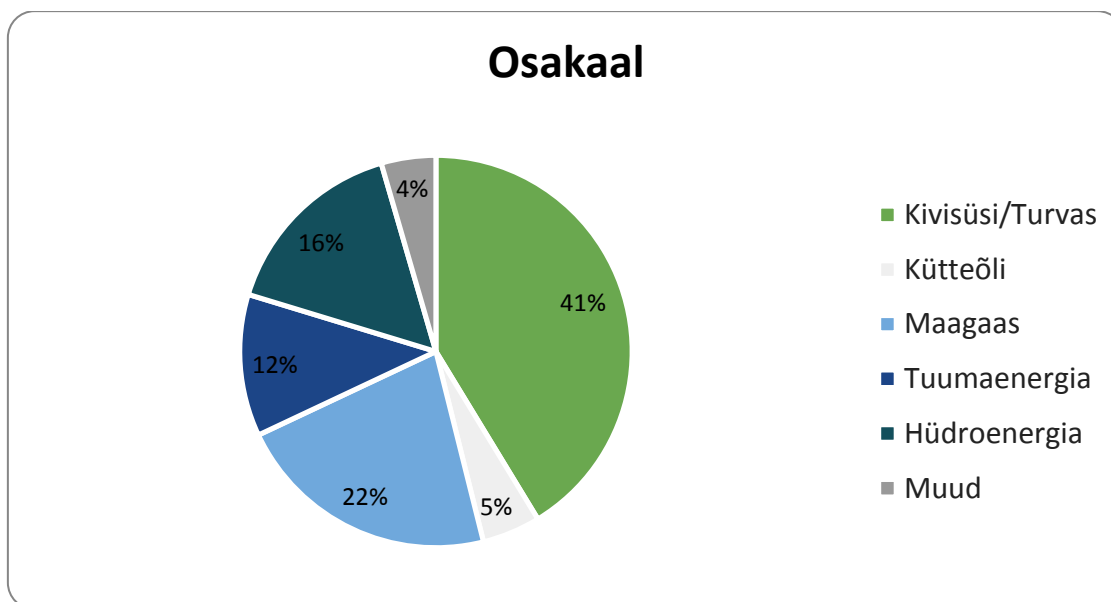
## Sissejuhatus

Elektrienergia tarbimine suureneb maailmas väga kiiresti. Viimase 50-60 aasta jooksul on kasv toimunud põhiliselt tänu elanikkonna kasvule ja majandusarengule. Peamised primaarenergia allikad on fossiilkütused: õli, kivisüsi, maagaas ja põlevkivi, nendest toodetakse umbes 80-90 % [1] elektrienergiat. Eestis toodetakse peaaegu kogu elektrienergia (üle 95%) soojuselektrijaamade abil. Seejuures üle 90% elektrist toodetakse põlevkivist. Tähtsuset teiseks kütuseks on maagaas. [2]

Elektrienergia tootmine toimub elektrijaamades. Elektrijaamu saab liigitada ja eristada primaarenergia liigi alusel järgmiselt:

- Kütustpõletavad elektrijaamad
- Hüdroelektrijaamad
- Tuumaelektrijaamad
- Tuuleelektrijaamad
- Geotermaalelektrijaamad
- Päikeseelektrijaamad

Elektrienergia tootmise osatähtsus energialiikide järgi on esitatud joonisel (Joonis 0.1)



*Joonis 0.1 Elektrienergia tootmise osatähtsus energialiikide järgi [3]*

Maailmas kõige enam levinud elektrijaamad, mis kasutavad kütuseks fossiilkütust, on põhiliselt soojuselektrijaamad ning nende elektrienergia tootmine põhineb Rankine'

ringprotsessil, mille peamiseks energiakandjaks on veeaur. Gaasturbiinjaamad kasutavad gaasilisi fossiilkütuseid ning nende elektrienergia tootmine põhineb Braytoni ringprotsessil. Energia tootmise kasuteguri tõstmiseks on kasutusel ka kombineeritud tsükliga elektriijaamad, mille töötamine põhineb Rankine ja Braytoni ringprotsessidel. Kütuse põlemisest vabaneva energia täielikuks ärakasutamiseks, kasutatakse koostootmisjaamu. Koostootmisjaamades kasutatakse vabanevat energia tarbijate varustamiseks soojusega ning sellest tingituna suureneb kasutegur veelgi. Kolbmootoriga elektriijaamad kasutavad energia tootmiseks sisepõlemismootoris vabanevat mehhaanilist energiat.

Elektriijaam on keerukas rajatis, mis koosneb erineva eesmärgiga süsteemidest. Elektriijaam kui seade sisaldab ülesehituselt järgmisi osasid

- Primaarenergia vastuvõtmis- ja töötlusseadmed
- Seadmed, mis muundavad primaarenergia elektrienergiaks
- Elektrienergia muundus- ja väljastusseadmed
- Juhtimis- ja reguleerimisseadmed
- Mitmesuguse otstarbega abiseadmed
- Hooned ja muud ehitised

Lõputöö eesmärgiks on välja töötada õppeaine „Elektriijaamad“ laboratoorsete tööde juhend ja konkreetsed tööd. Praktiliste tööde väljatöötamisel on lähtunud õppeaine sisust ning tööde komplekt on ülesehituselt selline, et üliõpilane omandaks järgmisi teadmisi ja oleks võimeline:

- kirjeldama elektriijaamade põhiliike ja nimetama elektriijaamadega seotud aktuaalseid probleeme
- kirjeldama elektriijaamade tehnoloogilisi skeeme
- esitama soojuselektriijaama põhiseadmete sisend-väljundkarakteristikud ja arvutama jaama optimaalset talitlust
- analüüsima elektriijaamade elektrilisi skeeme ja nende talitluskindlust
- analüüsima ja hindama soojuselektriijaamade mõju keskkonnale
- analüüsima ja hindama taastuvenergiat talitlevate elektriijaamade talitlust ja nende juhusliku võimsuse balansseerimise võimalusi süsteemis

- analüüsima koostootmisjaamade talitlust energiasüsteemis
- kirjeldama omandatud teadmiste baasil elektriyaamade optimaalset struktuuri ja talitlust energiasüsteemis ning hindama neid. [4]

Seletuskirja esimeses osas kirjeldatakse gaasiturbiinelektriyaama ehitust. Gaasiturbiini kirjeldamisel lähtutakse tema põhilistest parameetritest ning tööpõhimõttest. Tööpõhimõtete kirjeldamisel lähtutakse teadmistest, mis on vajalikud katse läbiviimisel antud õppeaine mahus. Praktikumi läbiviimiseks pakutakse välja ja kirjeldatakse mikroturbiini Capstone C30 ehitust ning põhilisi omadusi. Seletuskirja osas esitatakse valemid, mis on vajalikud katsetulemuste töötlemiseks ning järelduste tegemiseks.

Seletuskirja teises osas on kirjeldatud elektriyaamade põhiseadmete karakteristikute optimeerimist. Optimeerimisülesande lahendamiseks pakutakse välja töö modelleerimistarkvaraga EnergyPRO. Konkreetse töö koostamiseks on välja pakutud modelleerimisülesanne, mis võimaldaks mõista sisend-väljund karakteristikute olemust.

Seletuskirja kolmandas osas on esitatud töö elektriyaamaga, mis kasutab energiaallikana päikeseenergiat. Praktikumi eesmärgiks on rakendada TTÜ Elektrienergeetika instituudis olevaid päikesepaneele ning kasutada neid katsete läbiviimiseks. Konkreetse laboratoorse töö teostamiseks on üles ehitatud näidisülesanne ja selle lahendus.

Seletuskirja eelviimane praktilise osa eesmärgiks on elektriyaamade elektrilise osa ülesande lahendamine. Praktikumi eesmärgiks on generaatori elektrilise kaitse ehitamine ja katsetamine modelleerimistarkvaraga. Näidisülesanne on koostatud tarkvarale „Корвин-3“ kuid ülesande püstitus võimaldab katset läbi viia sarnaste funktsioonidega tarkvaral. Ülesande läbilahendamine annab ettekujutuse elektriyaama releekaitse ja automaatika toimimisest.

Viimane praktiline seletuskirja osa kirjeldab katset kolbmootoriga. Praktikumi läbiviimiseks on pakutud ehitada seade, mis võimaldaks vajalikke katsete sooritamist. Antud osas kirjeldatakse põhjalikult seadme ehitamist ning tema koostisosasid, mis annab võimaluse tutvuda põhjalikult seadme kasutamise ja katsetamisega. Lisaks koostatakse näitlik katsekava ehitatud agregaadile.

Seletuskirjade praktiliste osade ülesehitus annab kõigepealt teoreetilise ülevaate valitud valdkonnast. Enne praktilise ülesande koostamist kirjeldatakse välja pakutud seadme või tarkvara olemust ja tööpõhimõtet. Teoreetiliste teadmiste kinnistamiseks, koostatakse praktiline ülesanne, mis sobib läbiviimiseks valitud seadmel või tarkvaral.

Viimases osas on kirjeldatud ekskursioon elektriijaama. Antud osa eesmärgiga on tutvustada elektriijaama võimaliku külastust ja anda lühikirjeldus objektist, et üliõpilastel oleks võimalik valmistada ette lisaküsimusi külastatava elektriijaama kohta. Elektriijaama iseloomustamiseks kirjeldatakse tema ajalugu ning põhilisi erinevusi võrreldes teiste analoogsete elektriijaamadega.

# 1. Gaasiturbiinelektrijaamad

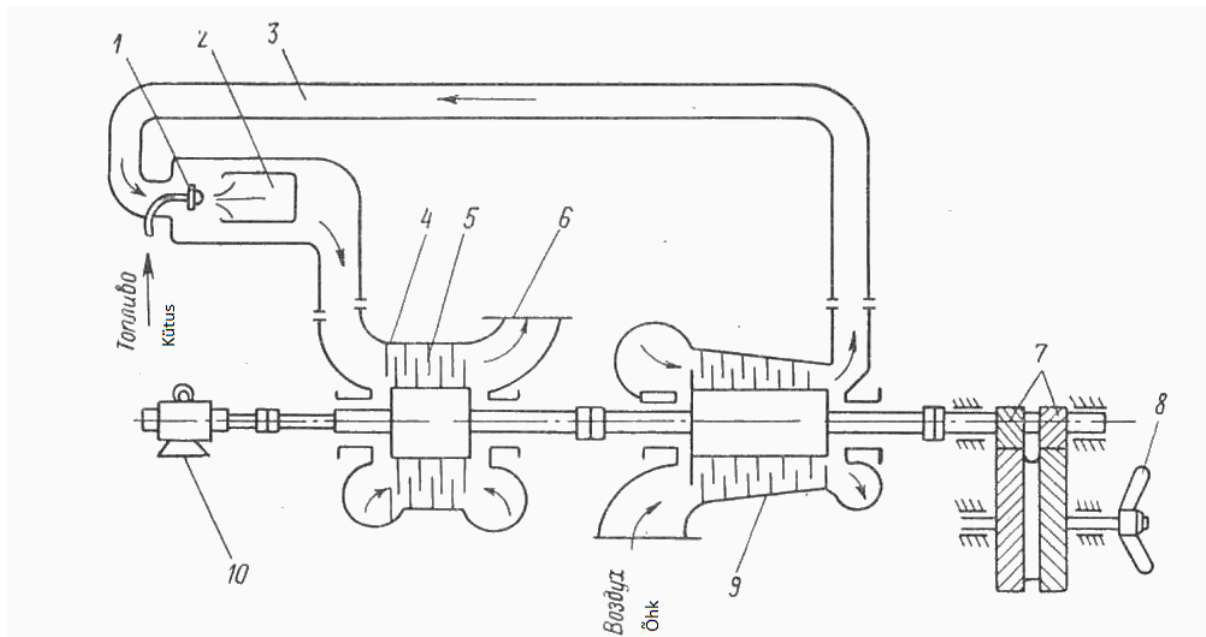
Gaasiturbiinelektrijaamad käivad kütust põletavate elektrijaamade alla. Viimastel aastatel on tunduvalt suurenenud elektrienergia tootmine gaasiturbiinide abil. Populaarsuse suurenemine on tingitud sellest, et gaasiturbiinide tehnoloogiline osa on pidevalt täiustunud ning elektritootmise kasutegur on sellest tingituna kasvanud. [5] Lisaks on populaarsuse kasvu põhjuseks olnud ka kiiresti reguleeritavate elektrijaamade vajadus elektrisüsteemis, milleks väga hästi sobib gaasiturbiiniga elektrijaam. Antud peatükis kirjeldatakse gaasiturbiinelektrijaamade ehitust ning nende põhiliste karakteristikute määramist.

## 1.1 Gaasiturbiinid

Gaasiturbiin on üks sise põlemismootorite alaliike. Gaasiturbiini eelkäiaks loetakse auruturbiini. Auruturbiini paneb tööle kõrgele rõhule kuumutatud aur, mida toodetakse aurukatlas. Gaasiturbiin töötab kõrge temperatuuriga gaasijoa jõul, mida saadakse kütuse põletamisel gaasiturbiini enda kambris. Gaasiturbiin ühendab endas auruturbiini ja sise põlemismootori omadusi, kus kütuse energia vabaneb põlemisel ja muundatakse mehhaaniliseks energiaks. [6]

Gaasiturbiini töötavad osad asuvad otse võllil. Tänu selle saadakse pöörlevat jõudu otse ning kasutusel ei ole muid liikuvaid osi nagu silindrid jne. Kütuse põlemine toimub suletud tsükliks.

Joonisel (Joonis 1.1) on lihtsustatud turbokompressoriga gaasiturbiin, mis töötab pideva rõhuga. Kompressoriga imetakse sisse puhas välisõhk, mis on atmosfääriga samal rõhul, seejärel surutakse see kokku kõrgrõhuni ning suunatakse mööda õhukanalit põlemiskambrisse. Samal ajal suunatakse põlemiskambrisse kütust läbi pihusti. Kütus ja õhk segunevad ning moodustavad töötava segu, mis süüdatakse ja põletatakse konstantse rõhuga. Põlemisel tekkinud toodang jahutatakse õhuga ning suunatakse turbiini labadele. Põlemisgaasid paisuvad düüside juures ning seejärel suunduvad suurel kiirusel töötavatele labadele, kus toimub liikuvate gaaside kineetilise energia muundumine pöörleva võlli mehhaaniliseks energiaks. Töötanud gaasid väljuvad läbi väljalasketoru. Pöörlev võll paneb tööle kompressori, mis imeb sisse värsket õhku ning võlliga kantakse mehhaaniline energia edasi läbi siduri generaatorile. Kogu süsteemi käivitamiseks kasutatakse mootorit, mis paneb kompressorit pöörlema tema jaoks minimaalse sageduseni. [7]



**Joonis 1.1 Gaasiturbiini lihtsustatud skeem [7]**  
**1- kütuse pihusti, 2- põlemiskamber, 3- õhukanal, 4- düüs, 5- töötavad labad, 6- väljalasketoru, 7- sidur, 8- võll, 9- kompressor, 10- käivitusmootor**

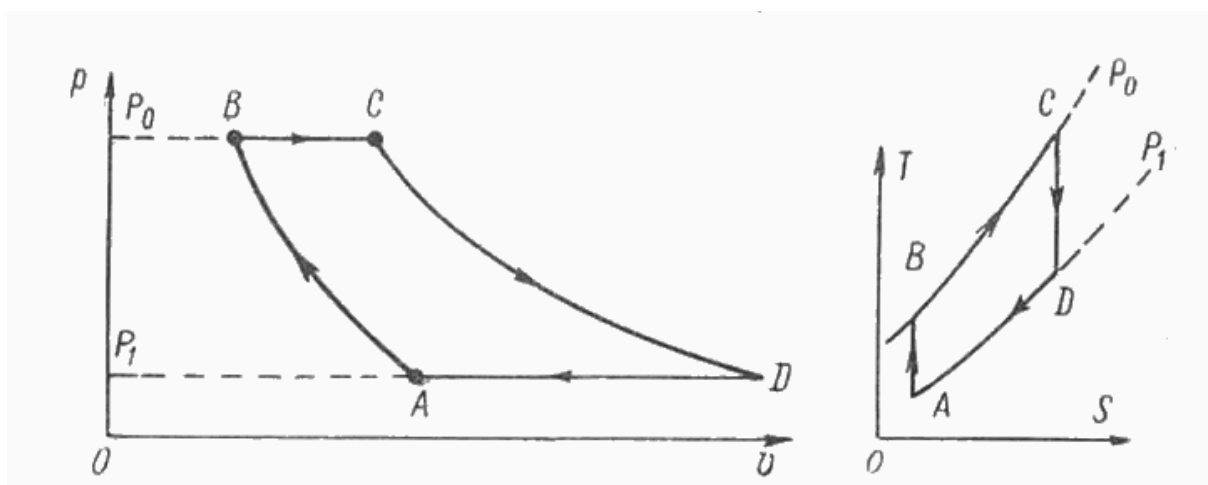
Turbiini mehaanilisest tööst 2/3 kulub kompressorile ja 1/3 generaatorile [5]. Kasuteguri tõstmiseks kasutatakse gaasiturbiini sisenevate gaaside temperatuuri tõstmist. Gaasiturbiini düüside ja töölabade õhkjahutuse kasutamisel võib gaasiturbiini siseneva gaasi temperatuur olla isegi 1400-1430°C [8]. Peale labade õhkjahutust lisatakse skeemi ka mitmeastmelist õhurõhutõstmist, mis vähendab kõrgrõhu kompressori võimsustarvet. Lisaks kasutatakse ka astmelist kütuse põletamist mitmes järjestikulises põlemiskambris, mida teenindavad eraldiseisvad turbiinid. Kuid kuna selline meetod eeldab keerulist konstruktsiooni, siis seda kasutatakse harva. [7]

Gaasiturbiini tööd kirjeldab Braytoni ringprotsess (Joonis 1.2).

Ringprotsess koosneb järgmistest tsüklitest:

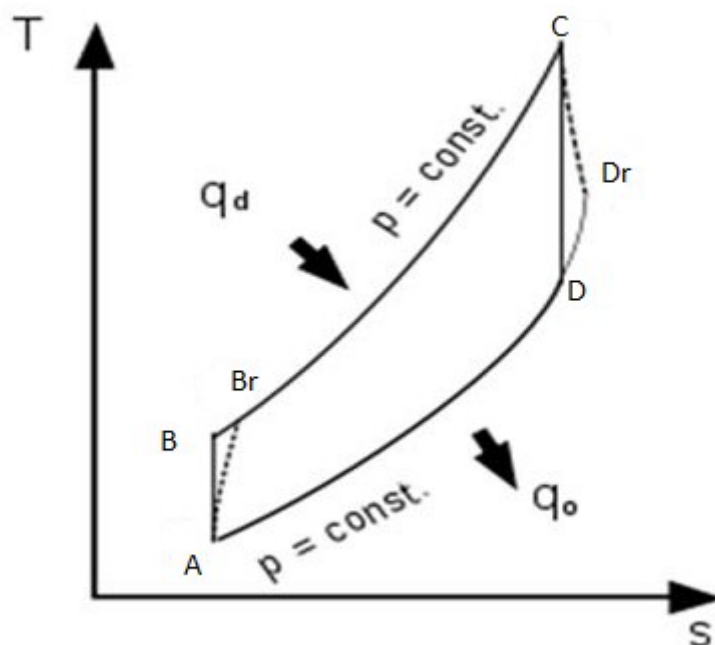
- A-B pöörduv adiabaatiline protsess, milles kompressoriga tõstetakse õhurõhku  $P_1-P_0$
- B-C isobaariline protsess, milles lisatakse õhule soojushulk, mille tulemusena saavutatakse maksimaalne temperatuur
- C-D pöördumatu adiabaatiline protsess, milles gaasi ruumala muutub ja rõhk väheneb turbiini labadel

- D-A tinglik isobaariline protsess, milles juhitakse ära üleliigne soojus jahutusagregaadiga



*Joonis 1.2 Braytoni ringprotsessi pv- ja TS diagramm,  $p = \text{const}$  [9]*

Tegelikult tuleb aga arvestada, et kogu Braytoni ringprotsess pole gaasiturbiinis ideaalne. Arvestades reaalseid kulgevaid protsess turbiinis rajatakse reaalse ringprotsessi Braytoni protsessi TS diagramm (Joonis 1.3).



*Joonis 1.3 Reaalse Braytoni ringprotsessi TS diagramm [10]*

*Idealne A-B-C-D  
Reaalne A-B<sub>r</sub>-C-D<sub>r</sub>*



Termodünaamiline kasutegur Braytoni ringprotsessi puhul leitakse kasutades valemit (1.1). [7]

$$\eta = 1 - \frac{1}{\pi^{\frac{k-1}{k}}} \quad (1.1)$$

Kus

$\pi$ -  $p_0/p_1$ , rõhu tõstmise aste tsükli A-C

k- adiabaatilise kordaja näitaja, õhu puhul 1,4

Selline kasuteguri leidmise viis ei näita ära protsessi olemust ning selle pärast kasutatakse termodünaamilise protsessi kasuteguri leidmiseks temperatuuride sõltuvust valem (1.2). [7]

$$\pi = 1 - \frac{T_1}{T_2} \quad (1.2)$$

Kus

$T_1$ - jahuti temperatuur

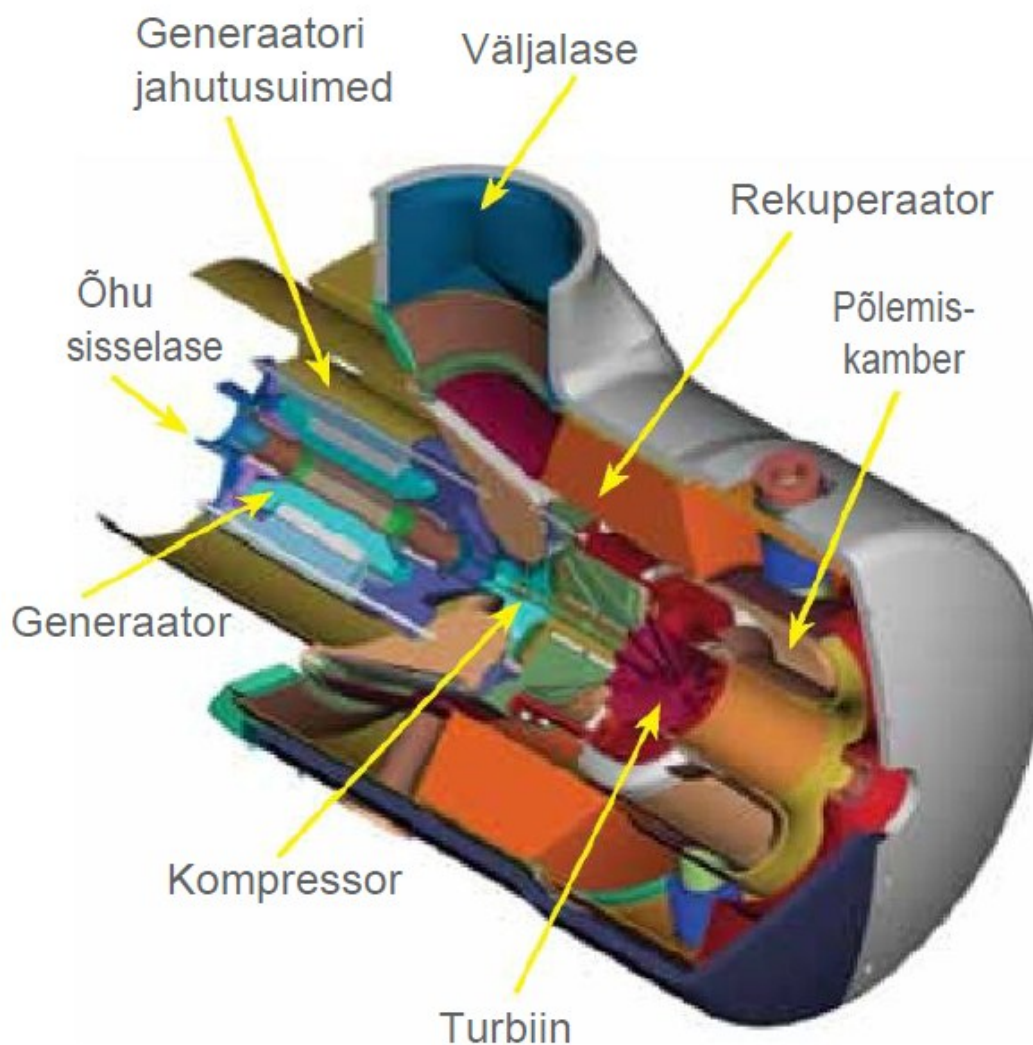
$T_2$ - küttekeha temperatuur

Lähtudes valemist (1.2), saab protsessi iseloomustada valemiga (1.3). [7]

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{p_1^{\frac{k-1}{k}}}{p_2} \quad (1.3)$$

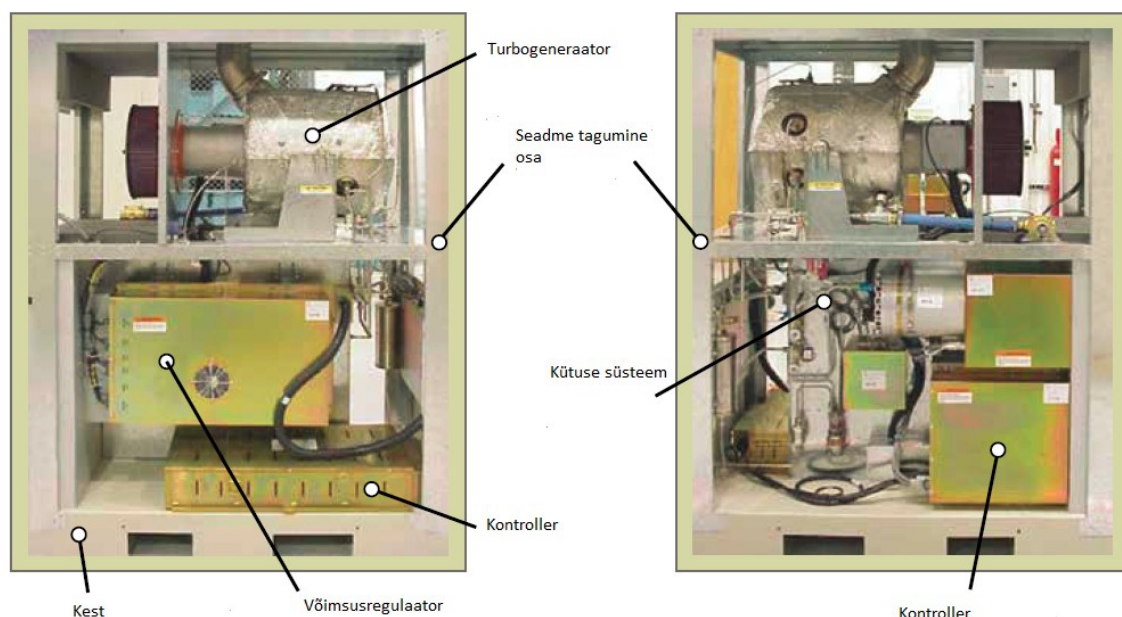
## 1.2 Capstone 30 kW mikroturbiin

Capstone mikroturbiine kasutatakse elektri- ja soojusenergia tootmisel mitmetes valdkondades, näiteks, koostootmine, ressursside taaskasutuses, varuenergia ja hübriidsõidukites. Mikroturbiinid on madala emissiooniga keskkonnasõbralikud energia tootmisjaamad. Seade ise on kompakne ja mahub komplekselt ISO-tüüpi konteinerisse mõõtudega 0,76 x 1,5 x 1,8 m. Capston tüüpi mikroturbiini ehitud on näidatud joonisel (Joonis 1.4). Capstone C30 tootelehe andmed on toodud lisa (LISA1). [11]



***Joonis 1.4 Capstone mikroturbiini ehitus [11]***

Capstone C30 mikroturbiini väljundvõimsus on 30 kW elektrilise kasuteguriga 26 % ning soojusliku kasuteguriga ca 60 %. Elektri tootmine toimub otse ning väljundpinge on 400-480 V, maksimaalse vooluga 48 A. Seade on kompaktne ja eraldi invertereid ei vaja, mis võimaldab teda ühendada otse võrku. Mikroturbiini ehitus on toodud joonisel (Joonis 1.5) [12]



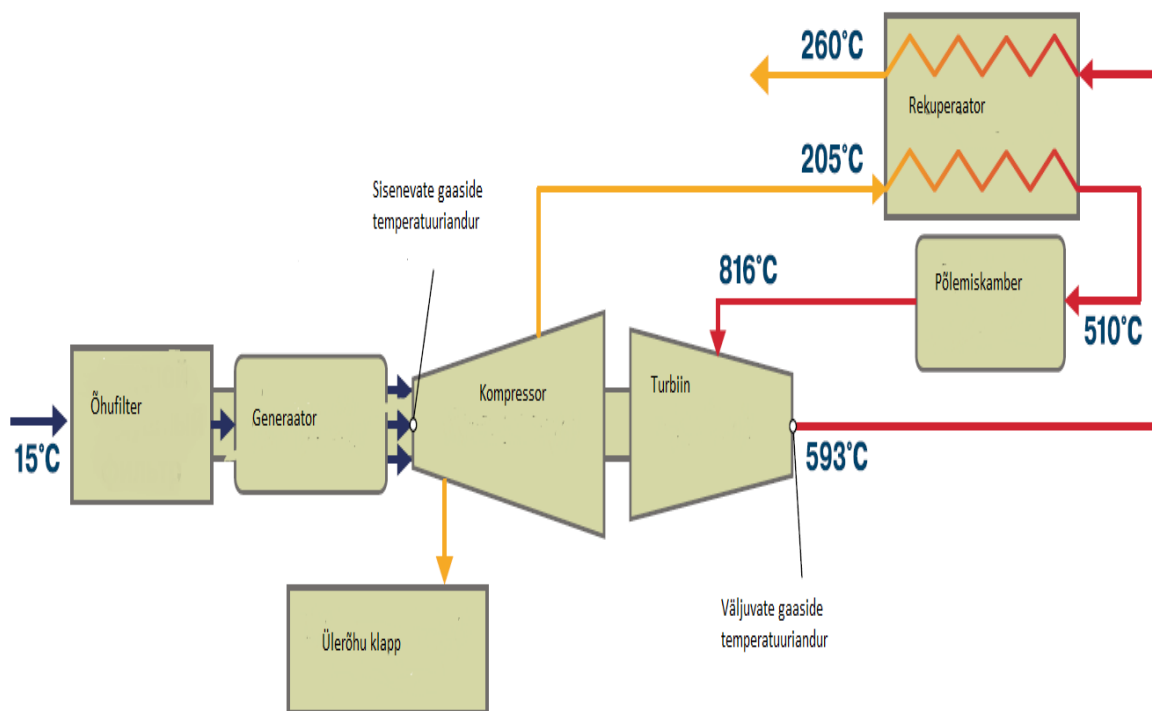
**Joonis 1.5 Capstone C30 ehitus [12]**

Mikroturbiini töösükkel on näidatud joonisel (Joonis 1.6). Enne õhu sisseandmist turbiini puhastatakse see õhufiltri abil. Puhastatud välisõhk lastakse generaatorisse ning see jahutab staatori mähist, mis võimaldab loobuda lisaseadmetes, mida oleks vaja kasutada elektriseadmete jahutamiseks. Ehitusosade vähene arv viib seadme lihtsustamiseni ning rikete arv on sellisel juhul minimaalne. Generaatorist liigub õhk kompressori, kus tõstetakse selle rõhku ning suunatakse see edasi rekuperaatorisse. Rekuperaatori kasutamine tõstab seadme kasutegurit ja võimaldab vähendada kütuse hulka umbes kaks korda tänu väljuvate gaasideüleliigse temperatuuri kasutamisele. [12]

Soojendatud suurel rõhul õhk suunatakse põlemiskambresse, kus see seguneb kütusega. Kütuse põlemine toimub konstantse rõhuga ning madalatel töötemperatuuridel (510- 954 °C), mis vähendab kahjulike gaaside emissioone. Väljuvate gaaside temperatuur (260-309 °C) ei soodusta kondensaadi teket, mis suurendab seadme tööressursi. Soojusenergia muundamine mehaaniliseks energiaks toimub turbiini labade abil. Kõrgel temperatuuril gaasi ruumala suureneb ning soojusenergia läheb üle kineetiliseks energiaks, mis läheb üle mehaaniliseks energiaks ning see kantakse edasi turbogeneraatorile. [12]

Rootor teeb kuni 96 000 pööret minutis, mis võimaldab vähendada kogu turbiine mõõde ning massi. Generaatori pöörded võivad kõikuda vahemikus 45 000- 96 000 pööret minutis ning

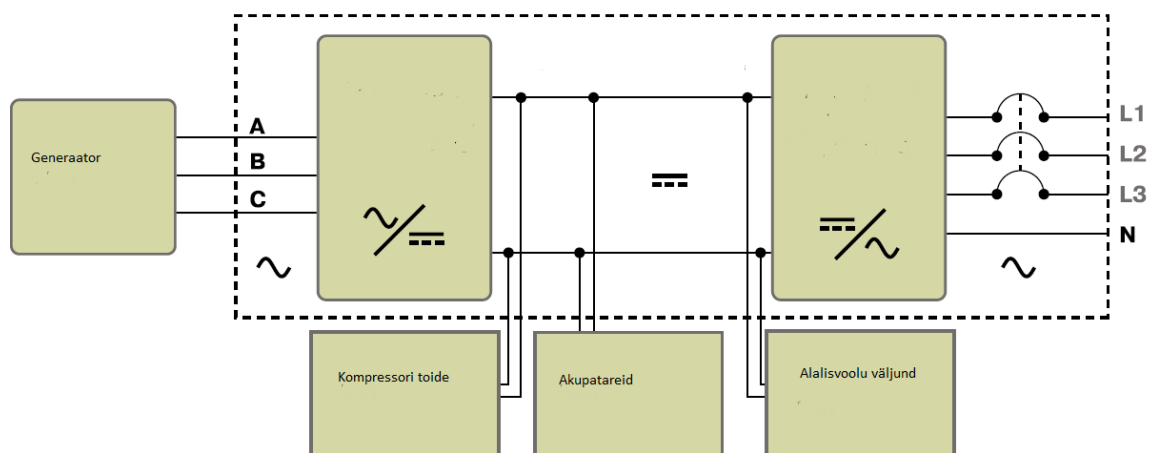
see ei mõjuta väljupinget. Väljundpinge sõltumatus pöörete arvust võimaldab turbiini tööd sujuvalt optimeerida ning sellega vähendada kütuse tarbimist. [12]



**Joonis 1.6 Mikroturbiini Capstone töösükli lihtsustatud skeem [12]**

Turbiini käivitamiseks kasutatakse akupatareide plokki, mis kompenseerib koormusvoolu ajal, millal turbiin võtab üles vajaliku pöörete arvu. Selline ehitus võimaldab tagada turbiini tööd ka 80 % koormuse tõusul. Selline töö võimaldab seadme kasutamist kohtades, kus elektritarbimine on küll pidev kuid muutuv. [12]

Mikroturbiini lihtsustatud elektriline skeem on toodud joonisel (Joonis 1.7). Mikroturbiini ja kõikide tema osade tööd juhitakse mikrokontrolleritega. Kõigepealt muundatakse generaatori vahelduvvool alalisvooluks ning seejärel muundatakse alalisvool tagasi vahelduvvooluks sagedusega 50 Hz ning pingega 400-480 V. Selline skeem võimaldab reageerida tarbitava võimsuse muutumisele ning välja anda nõutavat võimsust. [12]



*Joonis 1.7 Mikroturbiini Capstone elektriline skeem [12]*

### 1.3 Gaasiturbiinseadmete katsetamise meetodika

Seadme mõõdistustööd viiakse läbi normaaltingimustel või seadme töötingimustel.

Normaaltingimused peavad vastama järgmistele tingimustele: [13]

- Kompressorisse sisenev õhk: rõhk –  $1,033 \text{ kg/cm}^2$ ; temperatuur-  $15^\circ\text{C}$ ; suhteline õhuniiskus- 60 %
- Väljalasketoru või ava ümbruse õhurõhk –  $1,033 \text{ kg/cm}^2$
- Jahutuskontuuri kasutamisel siseneva jahutusvee temperatuur –  $15^\circ\text{C}$

Väliskeskkonna katsetingimused peavad olema võimalikud lähedased normaaltingimustele, et parandustegurid, mis on vajalikud tingimuste lähendamiseks normaaltingimustele, oleksid minimaalsed. Katsetamisel kasutatakse kütust, millega seade töötab. Katsetulemuste mõõtemääramused peavad vastama Eestis kehtivale mõõteseadusel ning standardile (EVS 758:1998 „Metroloogia. Terminid ja määratlused“). [14] [13]

Katsetamine peab toimuma stabiilsel töörežiimil. Soojuskatsetuste läbiviimisel tuleb registreerida vähemalt viis näitu iga katse kohta vastavalt määratud katsekavale. Summaarne katsekestus peab jääma vahemikku 15-60 min. Kui katsetamise jooksul toimub mõõtenäitude ebanormaalne kõrvalekalle, tuleb näitude hulka suurendada. Erinevate summeritavate näitude, nagu elektriarvesti ja kütusekulu fikseerimine, peab toimuma samaaegselt. [13]

### **Mehaanilise võimsuse mõõtmine**

Väändemomendi mõõtmiseks kasutatakse pidurdatavat dünamomeetrit. Mõõteseade mõõteviga ei tohi ületada 0,1 % maksimaalsest mõõteväärtusest, mis võib olla saavutatud katsetamisel. [13]

Mõõtekatsete teostamisel varustatakse igat seadme võlli pöördesageduse mõõteseadmega. Summaarne mõõteviga pöördesageduse määramisel ei tohi ületada 0,25 %. [13]

### **Elektrilise võimsuse mõõtmine**

Elektrigeneraatorite kolmefaasilise voolu mõõtmisel maandatud neutraaliga, kasutatakse kolme vattmeetri meetodit. Kui elektrigeneraatori neutraal on isoleeritud, kasutatakse kahe vattmeetri meetodit. Mõõtmiseks kasutatakse vattmeetri täpsusklassiga 0,2. Voolu- ja pingetrafoode kasutamisel on nende täpsusklass 0,5. Võimsuse mõõtmiseks võib kasutada kaasaskantavat elektriarvestit kõrgema täpsusklassiga. [13]

### **Kütuselukulu ja- parameetrite mõõtmine**

Gaasilise kütuse parameetrite mõõtmisel tuleb määrata järgmised suurused:

- Tihedus
- Kütteväärtus
- Temperatuur
- Rõhk

Gaasilise kütusekulu mõõtmiseks kasutatakse sertifitseeritud mõõteseadmed. Mõõteseadmete täpsus on mitte väiksem kui 1 %. [13]

### **Temperatuuri mõõtmine**

Temperatuuri mõõtmine kanalites viikase läbi termopaaride, kasutades takistust. Seadme mõõtetäpsus peab olema 0,35. Katsetamiseks peab olema paigaldatud vähemalt kaks andurit, mille alusel leitakse nende andmete keskmine. [13]

### **Kulu mõõtmine**

Kui gaasiturbiini võimsus määratakse kaudse meetodiga, leitakse töötava keha kulu kasutades drosseltüüpi mõõteriistu. Mõõteseadmete täpsus peab olema vähemalt 0,5 %. [13] Töötava

keha kulumõõtmine kõikides kanalites võib olla läbi viidud kasutades tasakaalu meetodit. Jahutusaine kulumõõtmiseks kasutatakse drosseltüüpi mõõteriistu. [13]

### Katsetulemuste töötlemine

Gaasiturbiini elektrilise võimsuse leidmiseks määratakse võimsus generaatori klemmidel (bruto) ning võimsus ühendusklemmidel (neto). Leitud võimsuste vahe on gaasiturbiini omatarve võimsus, mis kulutatakse erinevatele seadmete sees: [13]

- Pumbad
- Kompressor ja ventilaator
- Rõhutõste pumbad kütusele
- Lisaventilaatorid
- Kütuse soojendusseadmed.

Gaasiturbiini võimsuse leidmiseks mõõdetakse võimsus völlil ning lahutatakse sellest omatarbeseadmetele kuluv võimsus. Mehaanilise võimsuse leidmisel arvestatakse ülekandesüsteemide kasutegureid.

Soojusvõimsuse leidmiseks kasutatakse valemit (1.4)

$$Q = G_T(Q_a^t + i_t) \quad [15] \quad (1.4)$$

Kus

$G_T$ - kütusekulu, kg/s

$Q_a^t$ - kütuse tarbimisaine alumine kütteväärtus, kJ/kg

$i_t$ - kütuse entalpia erikulu, kJ/kg

Kasuteguri leidmisel kasutatakse valemit (1.5)

$$\eta = \frac{N}{Q} = \frac{N}{G_T(Q_a^t + i_t)} \quad [15] \quad (1.5)$$

Kus

$N$ - leitud võimsuse väärtus

Kütuse erikulu leidmiseks kasutatakse valemit (1.6)

$$q_{eri} = \frac{Q}{N} = \frac{860}{\eta} kcal / kWh = \frac{3600}{\eta} kJ / kWh \quad [15] \quad (1.6)$$

Kõik tulemused tuleb taandada normaaltingimustele järgmiselt:

Võlli pöörlemiskiirus, valem (1.7)

$$n = n_0 \sqrt{\frac{T_{1k}}{T_{1k0}}} \quad [13] \quad (1.7)$$

Kus

$n_0$  – võlli pöörlemiskiirus normaaltingimustel (töörežiim), 1/min

$T_{1k}$ - õhu temperatuur sisenemisel kompressorisse, K

$T_{1k0}$ - õhu temperatuur sisenemisel kompressorisse normaaltingimustel, K

Turbiini siseneva gaasi temperatuur, valem (1.8)

$$T_{1T} = T_{1T0} \cdot \frac{T_{1k}}{T_{1k0}} \quad [13] \quad (1.8)$$

Kus

$T_{1T0}$ - siseneva gaasi temperatuur normaaltingimustel, K

Gaasiturbiinseadme võimsus, valem (1.9)

$$N = N_0 \sqrt{\frac{T_{1k}}{T_{1k0}} \frac{P_{1k}}{P_{1k0}}} \quad [13] \quad (1.9)$$

Kus

$P_{1k}$ - staatiline õhurõhk kompressorise sisenemisel,  $kg/cm^2$

$P_{1k0}$ - staatiline õhurõhk sisenemisel kompressorisse normaaltingimustel,  $kg/cm^2$

### Võimsuse määramine lähtuvalt kompressorist

Gaasiturbiini võimsuse leidmisel kompressori võimsusest kasutatakse valemit (1.10)

$$N = G_K \times Di_K + DN_{meh.K} + DH_{SK} \quad [15] \quad (1.10)$$

Kus

$G_K$ - termodünaamilise keha kulu kompressoris, kg/s



$Di_K$ - entalpia erikulu erinevus kompressorisse sisenemisel ja väljumisel, kJ/kg

$DN_{meh}$ - mehaanilised kaod kompressoris, kW

$DN_{sK}$ - soojuskaod ümbritsevasse keskkonda, kW

Entalpia määramiseks kasutatakse tabelleid ja diagramme. Väärtuse saamiseks võrreldakse temperatuuri, rõhku ning termodünaamilise keha olekut.

### Võimsuse määramine bilansi meetodil

Gaasiturbiini võimsust saab määrata soojusbilansi tasakaalu põhimõttel. Võimsuse määramisel kasutatakse valemit (1.11)

$$N = G_{1k}i_{1k} + G_T \times (Q'_a + i_t)h_{kc} - G_{2T}i_{2T} - G_{yT}i_{yT} - DN_{meh} - DN_s \quad [13] \quad (1.11)$$

Kus

$G_{1k}$ - termodünaamilise keha kulu kompressoris, kg/s

$i_{1k}$ - entalpia erikulu kompressoris, kJ/kg

$h_{kc}$ - põlemiskambri soojuslik kasutegur

$G_{2T}$ - termodünaamilise keha kulu turbiinist väljumisel, kg/s

$G_{yT}$ - termodünaamilise keha lekkekaod, kg/s

$DN_s$ - soojuskaod ümbritsevasse keskkonda, kW

Mehhaaniliste kadude määramiseks kasutatakse valemit (1.12)

$$DN_{meh} = G_a C_{pa} Dt_a \quad [13] \quad (1.12)$$

Kus

$G_a$ - jahutusaine kulu, kg/s

$C_{pa}$ - jahutusaine soojuslik erimahtuvus püsiva rõhu korral, kJ/s °C

$Dt_a$ - jahutusaine temperatuurierinevus seadmesse sisenemisel ja väljumisel, °C

Gaaside kulu turbiinis väljumisel leitakse valemiga (1.13)

$$G_{2T} = G_{1k} + G_T - G_{yT} \quad [13] \quad (1.13)$$

Soojuskadude leidmisel ümbritsevasse keskkonda arvestatakse turbiini pinnatemperatuuri ja väliskeskkonna temperatuuri erinevust.

### **Aruanne**

Gaasiturbiiniseadme katsetulemuste aruanne peab sisaldama järgmist:

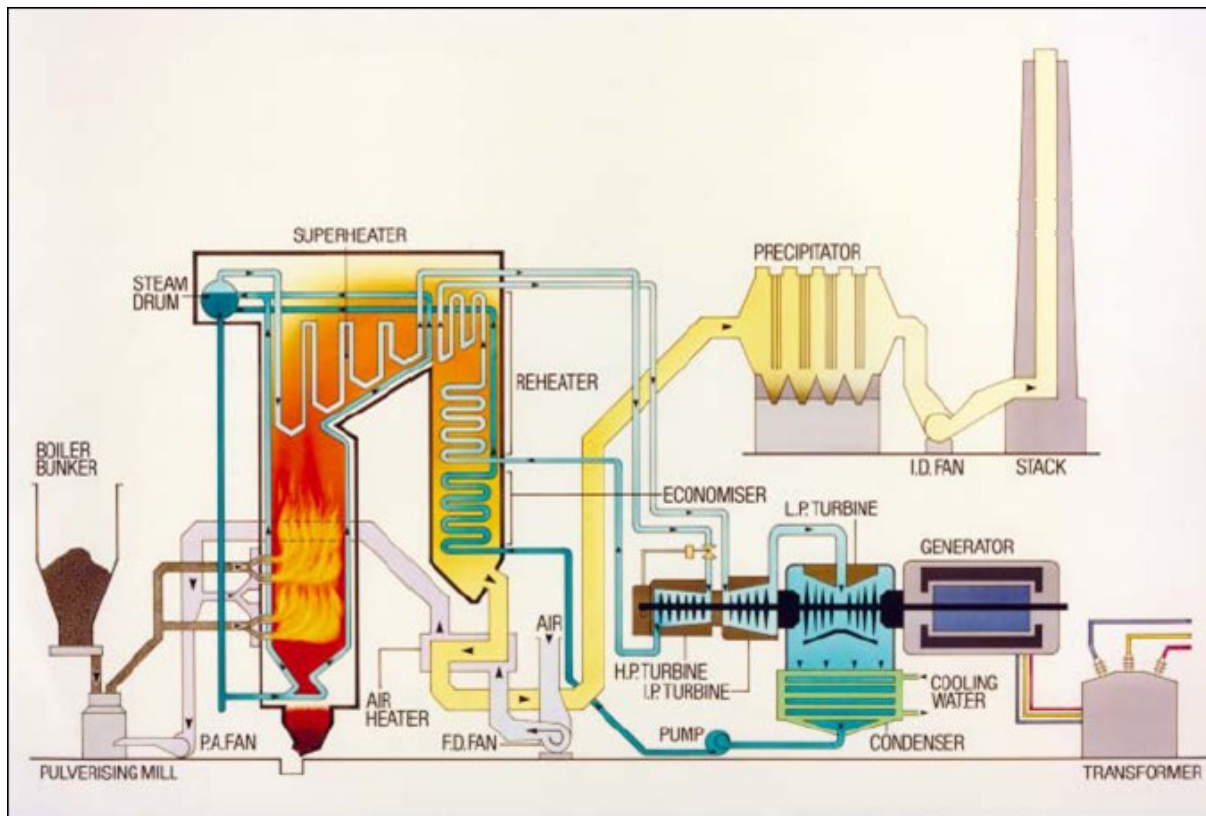
- Katsetamise eesmärk
- Gaasiturbiini skeem
- Gaasiturbiini lihtsustatud tööpõhimõte
- Katseseadmete kirjeldus ning nende paiknemine töö ajal
- Mõõtmistulemused
- Mõõtemääramatused
- Normaalingimustele taandatud mõõtetulemused
- Töödeldud mõõte- ja arvutustulemuste andmed, tabelid, graafikud
- Katsetulemuste analüüs ja järeldused

## **2. Elektriyaamade põhiseadmete karakteristikute korrigeerimine**

Elektriyaamade sisend-väljund karakteristikute optimeerimise eesmärk on tagada tootmine, mis on võimalikult kõrge kvaliteediga, kuid samas peab see toimuma minimaalse kütusekuluga. Lisaks kütusekulu kokkuhoiule võimaldab optimeerimine efektiivselt kasutada veeressursse ning minimeerida elektri tootmisega seotud keskkonnamõjusid. Kogu elektrisüsteemi optimaaljuhtimine võimaldab muuta tarbijate elektrivarustus 10-20 % ökonoomsemaks [16].

### **2.1 Soojuselektriyaamade tööpõhimõtte ning põhilised karakteristikud**

Elektrienergia tootmine elektriyaamades toimub kasutades salvestatud energia vabanemist erinevatest looduslikest energiaallikates, nagu süsi, gaas, põlevkivi, uraan jne. Soojuselektriyaama skeem (Joonis 2.1) näitab ilmekalt sellise protsessi toimumist, kus üht liiki energia muundatakse teist liiki energiaks, kasutades termodünaamilist keha soojuselektriyaama töösükli. Katlas põletatakse kütust, mille tulemusel tekib kõrgel rõhul olev aur, mis suunatakse turbiini, kus see muundatakse mehhaaniliseks energiaks. Turbiini energia kantakse võlli abil generaatorisse, kus see muundatakse elektrienergiaks.



*Joonis 2.1 Soojuselektrijaama lihtsustatud skeem [17]*

Tänapäeva elektrijaamad on keerulise ehitusega ja sisaldavad erinevaid agregate. Põhilised elektrijaama seadmed on järgmised:

- Katel
- Turbiin
- Generaator
- Jahutusseade

Nende seadmete iseloomustamiseks kasutatakse standardseid suurusid milleks on võimsus, termodünaamilise keha parameetrid, tootlikus, pinge, vool jne. Seadmete tüüp ja kogus elektrijaamas sõltub jaama koormusest ning töörežiimidest.

Aurukatla tüüp elektrijaamas sõltub ennekõike kütusest, mida selles elektrijaamas kasutatakse. Levinumad katlatüübid on T ja  $\pi$  kujulise torniga, kus põlemiskamber on välja tõotatud kindla kütuseliigi jaoks. Soojuselektrijaamades kasutatakse tavaliselt trummelkatlaid.

Turbiin ja elektrogenaatorid sõltuvad võimsusest. Igale turbiinile vastab kindel generaatori tüüp. Kondensatsioon plokk tüüpi elektrijaamades, turbiini võimsus vastab terve plokki

võimsusele ning plokkide kogus vastab elektri jaama etteantud võimsusele. Turbiini üldine valik sõltub soojusvõimsusest ning elektri- ja soojus tootmise vahekorrast.

Elektri jaamade töö teeb eriliseks see, et tarbitud ja toodetud elektrienergia hulk peab olema igal ajahetkel võrdne. Elektri jaamad töötavad paralleelselt ühtses elektrisüsteemis, kattes seejuures üldise elektritarbimise.

Põhiliseks alginformatsiooniks soojuselektri jaama töö juhtimisel on agregaatide sisend-väljundkarakteristikud. Lisaks on oluline jälgida seadmete omatarbe ja keskkonnamõjude sõltuvusi. Elektri jaama saab kirjeldada süsteemina (Joonis 2.2), mida kirjeldatakse funktsioonidena.

Sisend-väljundkarakteristikud valem (2.1)

$$X = X[Y, U, V(Y)] = G_{U, V(Y)}(Y) \quad [2] \quad (2.1)$$

Keskkonnamõjude karakteristikud valem (3.2)

$$W = W[Y, U, V(Y)] = W_{U, V(Y)}(Y) \quad [2] \quad (2.2)$$

Omatarbe karakteristikud valem (3.3)

$$P^{OT} = P^{OT}[Y, U, V(Y)] = P_{U, V(Y)}^{OT}(Y) \quad [2] \quad (2.4)$$

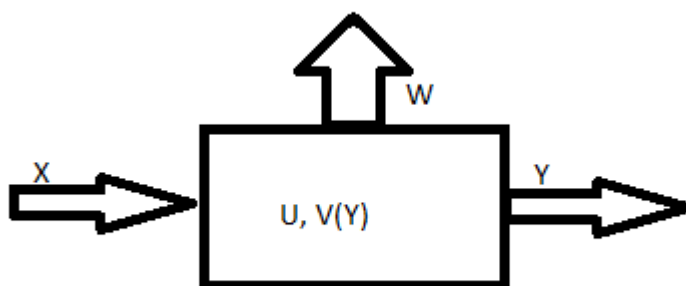
Kus

X- Sisendi vektor

Y-Väljundi vektor

U- olekuparameetri vektor

V(Y)- väljundist sõltuvate olekuparameetrite vektor



*Joonis 2.2 Agregaadi põhimõtteline süsteemne mudel [2]*

Põhilised sisend-väljundkarakteristikud, mida on vaja agregaaadi töö analüüsimiseks on kirjeldatud valemitega.

Sisendi kulukarakteristiku valem (2.5)

$$X = G(Y) \quad [2] \quad (2.5)$$

Sisendi suhtelise juurdekasvu ehk marginaalkulu karakteristiku valem (2.6)

$$X(Y) = \frac{\delta X}{\delta Y} = \frac{\delta G(Y)}{\delta Y} \quad [2] \quad (2.6)$$

Sisendi erikulu karakteristiku valem (2.7)

$$\delta(Y) = \frac{G(Y)}{Y} \quad [2] \quad (2.7)$$

Kasuteguri karakteristiku valem (2.8)

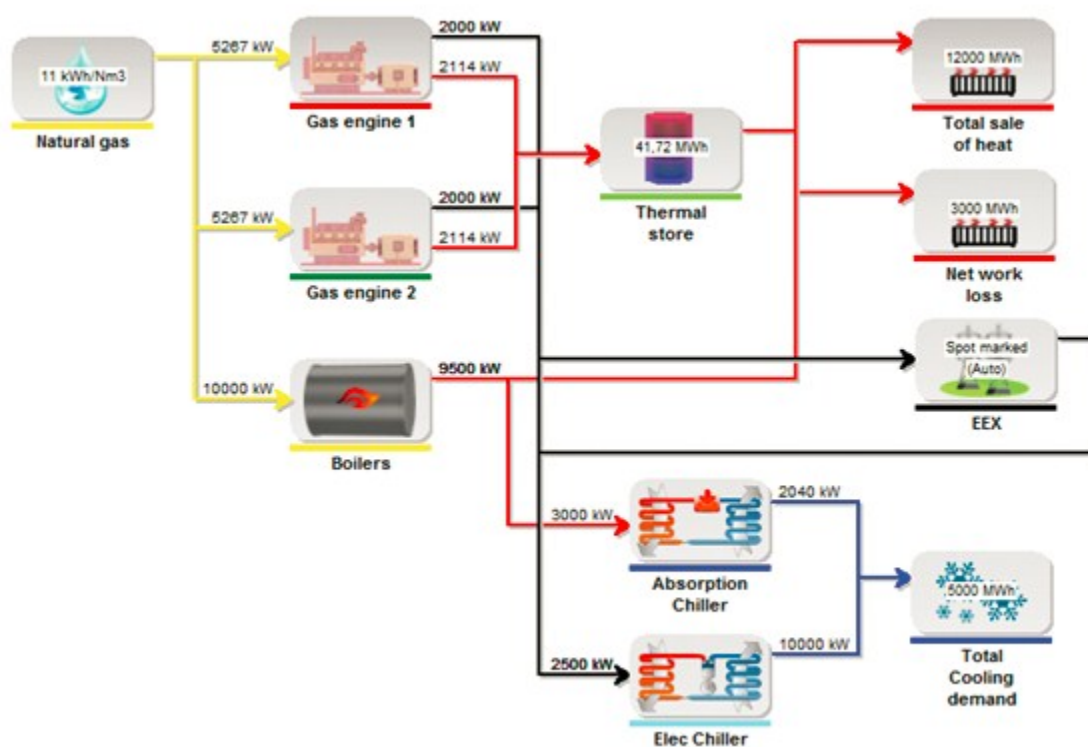
$$\eta(Y) = \frac{Y}{G(Y)} \quad [2] \quad (2.8)$$

## 2.2 Modelleerimistarkvara EnergyPRO

EnergyPRO on kõige arenenum ja paindlikum tarkvarapakett energia tootmisüksuste tehnoloogilise kui ka majandusliku analüüsi teostamiseks. Antud tarkvara kasutatakse elektri- ja soojusenergia tootmise optimeerimiseks ja analüüsimiseks. Sagedamini kasutatakse tarkvara koostootmiste optimeerimiseks ning analüüsiks. Modelleerimisel on võimalik lisada palju erinevaid üksusi alustades tootmiseseadmetest lõpetades akumuleerimisjaamadest.

Projekte on võimalik koostada arvestades nende geograafilisi asukohti. Kasutajal on võimalus majandusarvestuste teostamiseks sisestada elektrienergia hinna ja elektriseadmete amortisatsiooni maksumust. Täpsemate modelleerimistulemuste saavutamiseks on võimalik lisada väliskeskkonna tegurite nagu temperatuuri, päikesekiirguse, tuule jne parameetreid. Tarkvara võimaldab kasutajal arvutada emissioone nagu CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> ja SO<sub>2</sub>.

Andmete sisestamine toimub läbi eraldi modelleerimis mooduli (Joonis 2.3), kuhu on võimalik piiramatul hulgal sisestada erinevat liiki toomis- ja tarbimisüksusi. Kuna kõik ühendused on visuaalselt lihtsalt jälgitavad, siis analüüsimise on lihtne. Programm võimaldab teostada arvutusi olukordades, kus kütuste kogused on piiratud. Toodetud energia hinna määramiseks saab kasutada börsi hindu ning jagada need sobivateks perioodideks. Arvutused on võimalik teostada ükskõik millistes etteantud tingimustes. Tarkvaral on ligipääs veebile, mille kaudu saab ta andmeid näiteks ilma kohta.



*Joonis 2.3 Modelleerimistarkvara EnergyPRO moodul [18]*

Finantsmoodulit kasutatakse koos modelleerimismooduliga, millega on võimalik laiendada majanduslikke arvutusi ning koostada prognoose. Lisaks on seal ära toodud investeeringute mahud ja tasuvusajad. Finantsmoodulit kasutatakse ennekõike investeeringuanalüüsi teostamiseks.

Raamatupidamismoodulit kasutatakse koos finantsmooduliga ning see võimaldab jälgida kasutaja rahavoogusid ning koostada raamatupidamisaruandeid igaaastaselt vastavalt määratud perioodile. Ühendades raamatupidamise- finants- ja moduleerimismoodulit, on võimalik koostada täisväärtuslik äriplaan, kus on dokumenteeritud kõik tehnilised ja rahalised aspektid. EnergyPRO tarkvara majandusarvutused põhinevad Maailmapanga juhisteel, mis võimaldab koostada sobivat aruannet pankadele ja investoritele.

Ajamoodul võimaldab kasutajal optimaalselt määrata koos modelleerimismooduliga kindlad ajavahemikud, millal energia tootmine ja kasutamine toimub. Kasutajamoodul annab üksikasjalikult ette tootmiskavad kindla ajavahemiku kohta. Sisendites on võimalik määrata ning järgida energia hinda.

Piirkonna moodulis on võimalik määrata rajatiste geograafiline asukoht. Lähtudes lähtekohtades on võimalik määrata üksikasjalikult tootmisüksuste geograafilist mõju. Näiteks sõltuvalt asukohast on võimalik modelleerida soojuse ülekande mõju. Piirkonnamoodul on hea vahend, kui on vaja määrata ja analüüsida erinevate elektrisüsteemide kokkuühendamiste mõju.

Turgude moodul võimaldab analüüsida ja optimeerida erinevate elektriturgude koosmõju. Turu moodulis saab näiteks jälgida koostootmisjaamade reservi ja tasakaalustamise võimalusi. Turu moodul on väga paindlik ning võimaldab modelleerida erinevaid situatsioone energiaturgudel.

### 2.3 Agregaatide töökorra optimeerimine

Agregaatide töökorra optimeerimiseks tuleb kõigepealt luua elektriijaama lihtsustatud skeem (Joonis 2.1), kus oleksid märgitud põhiseadmed ning energiavood. Peale skeemi loomist tuleb määrata erinevat energialiikide tarbimised ning tootmised. Skeemi seadmetele tuleb määrata nende parameetrid ning kanda need arvutustarkvarasse. Energiavood peavad moodustama tasakaalu ning toodetud energia peab igal ajahetkel võrduma kasutatava energiaga.

Soojusenergia tasakaal on kirjeldatud valemitega (2.9) ja (2.10)

$$Q = Q_1 + \Delta Q \quad [19] \quad (2.9)$$

$$\Delta Q = \Delta Q_2 + \Delta Q_3 + \Delta Q_4 + \Delta Q_5 + \Delta Q_6 \quad [19] \quad (2.10)$$



Kus

$Q_1$ -kasulik soojus

$Q_2$ - soojuskadu lahkuvate gaasidega

$Q_3$ - soojuskadu keemilise mittetäieliku põlemise tõttu

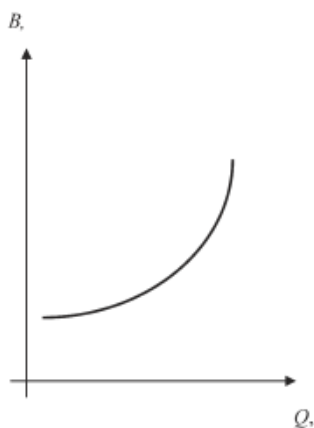
$Q_4$ - soojuskadu mehhaanilise mittetäieliku põlemise tõttu

$Q_5$ - soojuskaod ümbritsevasse keskkonda

$Q_6$ - soojuskaod kütusejääkidega

Skeemile tuleb kanda soojusenergia kasutajad ning elektrienergia kasutajad. Lisaks elektrienergia tootmisele moodustab elektrijaamas olulise osa ka soojustootmine ning nõutud soojuskoormuse tagamise jälgimine on oluline. Optimeerimisel tuleb jälgida, et elektrijaama tagaks vajaliku kogust soojus- ja elektrienergiat.

Optimeerimisel tuleb lähtuda iga agregaadid kulukarakteristiku graafikust (Joonis 2.4), mida tuleb koostada sõltuvalt kütusekulust ühe ajaühiku kohta lähtudes toodetud võimsusest. Lisaks tuleb määrata ka marginaalkulu karakteristik, mille alusel toimub modelleeritava skeemi parameetrite reguleerimine.



**Joonis 2.4 Kulukarakteristiku näitlik graafik [19]**

Põhilised lähteandmed, mida tuleb koguda optimeerimisülesande lähendamisel on järgmised:  
[2]

- Elektriijaama neto-koormusgraafik,  $P_t$   $t=1...T$
- Katelde ja turbiinide sisend-väljundkarakteristikud

- Katelde ja turbiinide omatarbe karakteristikud
- Töösolevate agregaatide algkoosseis
- Minimaalselt lubatava pöörleva reservi graafik,  $R_t^{\text{Min}} \quad t=1 \dots T$
- Katelde käivituskulude karakteristikud,  $B_i^{\text{käivitus}} T_i^{\text{seisuaeg}} \quad i=1 \dots N$
- Agregaatide seisu- ja seiskamiskulud
- Agregaatide käivitamise ja seiskamise ajalised piirangud

Optimeerimisülesande lahendamisel saab kasutada mitmesugused meetodeid. Põhiliseks meetodiks on prioriteetide meetod, mille alusel pannakse paika agregaatide käivitamise ja seiskamise järjekord. Põhiliseks agregaaadi käivitamise ja seiskamise kriteeriumiks on erikulu suurus. Esimesena käivitatakse väiksema erikuluga agregaat ning esimesena seisatakse suurima erikuluga agregaat. [2]

Agregaatide optimaalse töökorra leidmisel on lisaks kasutusel ka dünaamilise programmeerimise meetod. Antud meetod kujutab endast elektriijaama sammammulist liikumist algseisundist mingisse etteantud lõppseisundisse. Dünaamilise programmeerimise algoritm seisneb sammammulises agregaatide koosseisu muutmises. Kogu optimeerimine jagatakse intervallideks, mis koosnevad erinevatest kombinatsioonidest ja lõpuks võimaldavad leida kõige optimaalsema koosseisu. [2]

Elektriijaama optimeerimisülesande lahendamiseks on ülesande püstituses antud järgmised andmed:

- Elektriijaama skeem
- Maksimaalse koormuse väärtus
- Elektriijaama elektrilised karakteristikud
- Kasutatava kütuse andmed

Optimeerimisülesande modelleerimisel leitakse lahendus järgmistele küsimustele:

- Maksimaalse ja minimaalse koormuse jagunemine jaamas
- Elektriijaama koormamise plaan ilma kadusid arvestamata
- Elektriijaama koormamise plaan arvestades kadusid
- Elektriijaama koormamise plaan arvestades, et kriteeriumiks on minimaalne kütusekulu
- Optimeerimise mõju hindamine lähtuvalt majanduslikust seisukohast

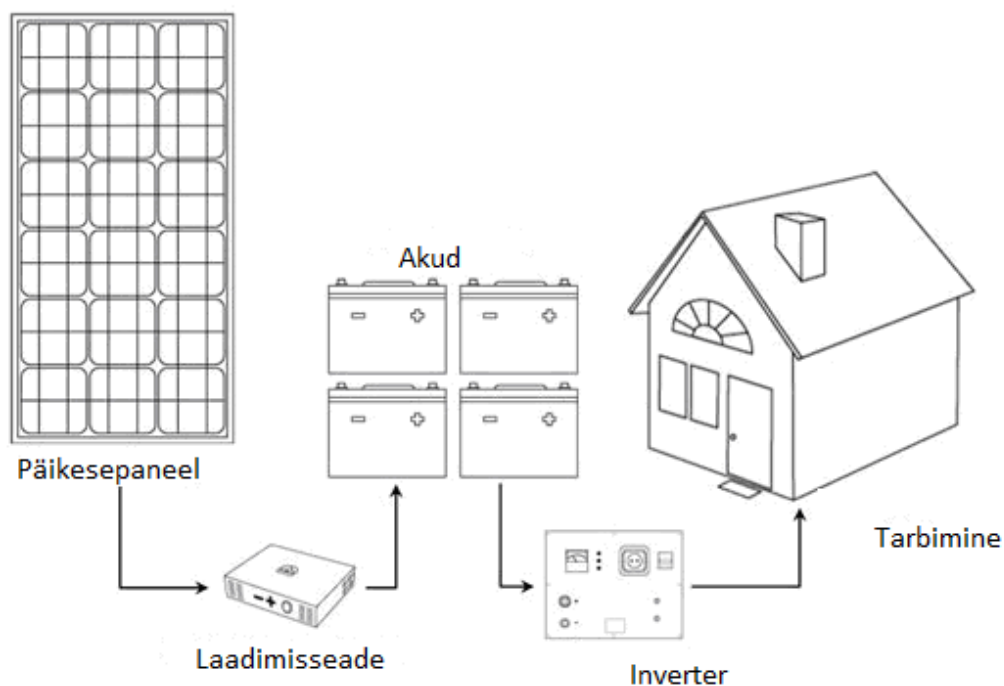
## 3. Päikeseelektrijaam

Seoses fossiilkütuste ammendumisega on laialdaselt asutud kasutama taastuvaid energiaallikaid. Üheks taastuvaks energiaallikaks on päikseenergia. Päikese pinnal toimuvad termoreaktsioonid, mis toodavad pidevalt suurel hulgal energiat. Päikese energiavoog maale on 3 850 000 EJ samas oli 20 10 aasta inimeste elektritarbimine 67 EJ [20]. Kui inimesed suudaksid kasutada 0,001 % päikselt saadud energiast oleks kogu elektritarbimine sellega kaetud. Päikseenergia muundamiseks elektrienergiaks kasutatakse päiksepaneele.

### 3.1 Päikeseelektrijaama ehitus

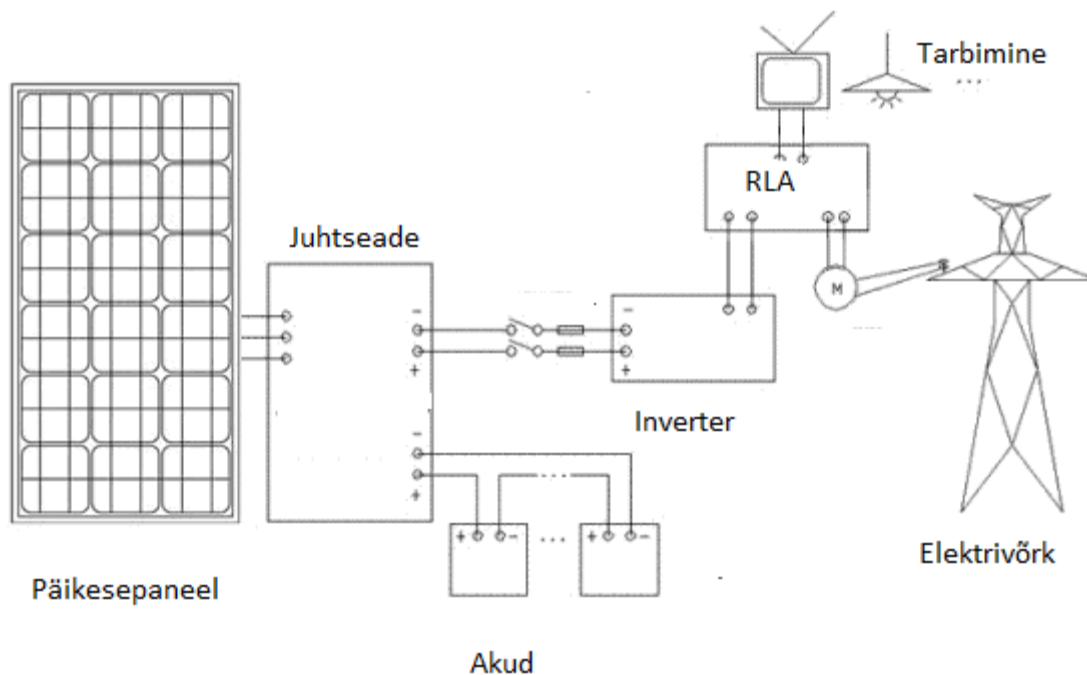
Päikese paneelidega elektrijaam koosneb päiksepaneelides, mis võtavad otseselt vastu päikeselt tulevat energiat kiirguse kaudu. Päiksepaneelid muundavad päikesekiirguse elektrienergiaks. Kuna päiksepaneelid annavad voolu madalal pingel, siis elektrienergia tarbimiseks kasutatakse invertoreid, et tõsta pinget vajalikku suuruseni ning muundada päiksepaneeli alalisvool kodutarbimisele sobivaks vahelduvvooluks. Lisaks inverterile sisaldavad päikeseelektrijaamad akusid ning monitooringuseadmeid. Kindel skeem ja seadmete valik sõltub elektrijaama otstarvest.

Joonisel (Joonis 3.1) on autonoomne päikeseelektrijaam, mis toidab ühte tarbijat läbi akude. Kogu tarbimine toimub ainult päikseenergia abil ning võrguga ühendus puudub. Kui päiksekiirgust ei ole, siis objekti toidetakse akudelt, kuhu on eelnevalt salvestunud päikesekiirguse energia.



***Joonis 3.1 Autonoomne päikeseelektrijaam [21]***

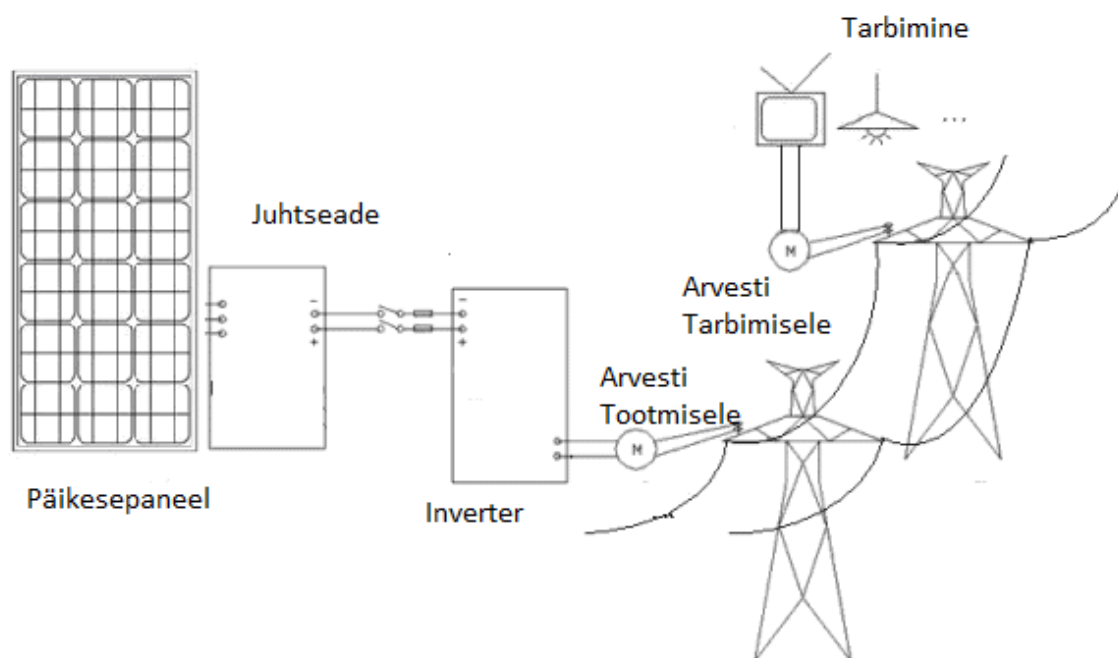
Joonisel (Joonis 3.2) on päikeseelektrijaam, mis on ühendatud võrguga. RLA võimaldab tarbimist reguleerida ning teostada ümberlülitusi. Kui päikese kiirgus puudub ning akud on lõplikult tühjenenud, saab tarbida energiat elektrivõrgust. Antud juhul on võimalik päikesepaneele kasutada ka varutoitena. Näiteks, kui elektrivõrgus pinge kaob, saab tarbijaid toita läbi akude ja otse päikesepaneelide pealt.



***Joonis 3.2 Võrgühendusega päikeselektrijaam [21]***

Joonisel (Joonis 3.3) on toodud päikeselektrijaama skeem, kus kogu tarbimine toimub päikesepaneelide ja akude pealt, kui päikeseikiirgust ei ole, siis käivitud varu toiteallikas nagu näiteks diisलगeneraator ning tarbimine toimub läbi selle. Selliseid skeeme kasutatakse, et tarbimine oleks võimalikult autonoomne ning elektrivõrguga ühendus puuduks. Samas on aga tagatud toite katkematus ning varustuskindluse sõltumatus päikeseikiirgusest.

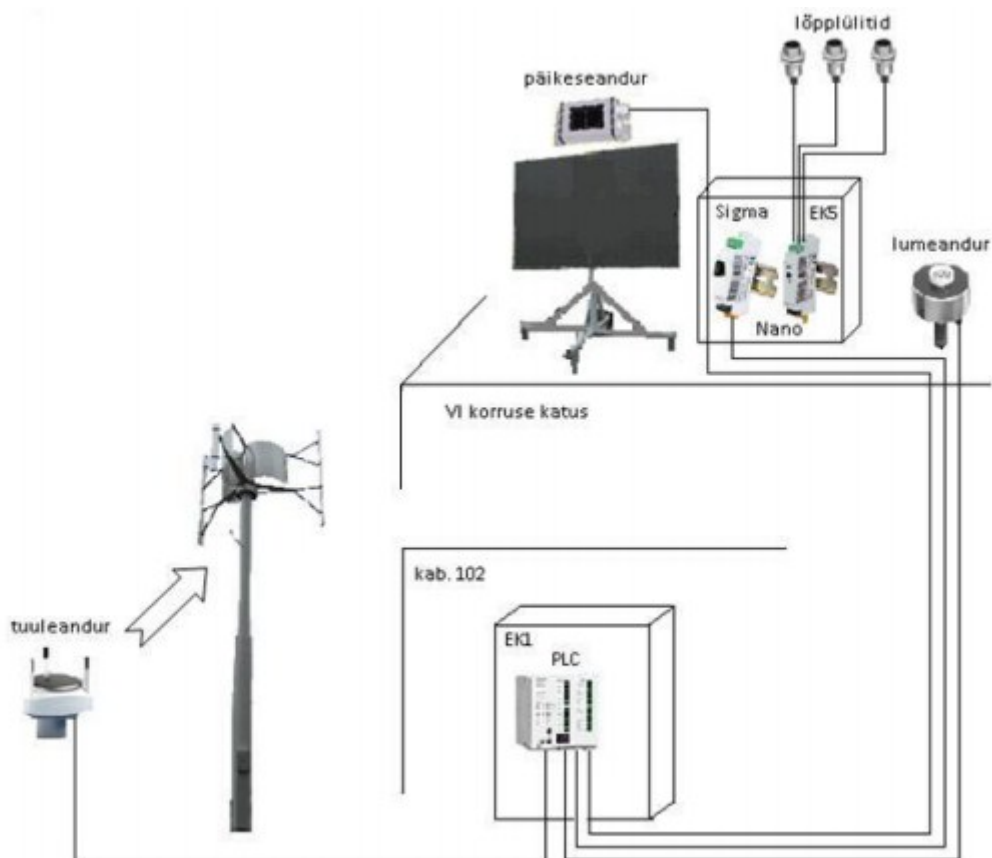




*Joonis 3.4 Päikeseelektrijaam otseühenduses elektrivõrguga [21]*

### 3.2 TTÜ päikesepaneel

TTÜ kasutuses on päikesepaneelide kompleks, mis on paigaldatud NGR korpuse katusele. Seadme juhtimiseks on kasutatud EK5 juhtimisautomaatika kilpi. TTÜ päikesepaneeli kompleksid skeem on esitatud joonisel (Joonis 3.5).



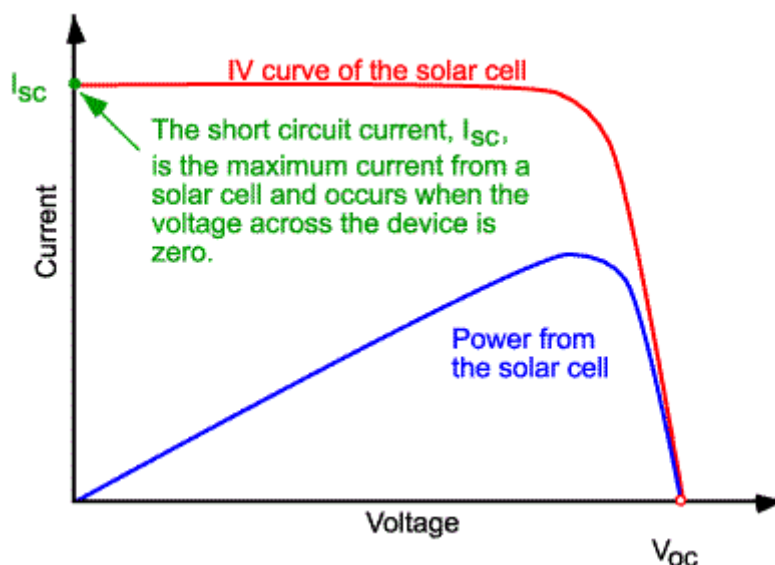
*Joonis 3.5 TTÜ päikesepaneelide süsteem [22]*

Päikesepaneelide kinnitamiseks on OÜ Energiatehnika poolt katusele spetsiaalne alusraam. PV päikesepaneelide moodulite kinnitamiseks on kasutatud liblikmutreid, mis teeb nende vahetamise lihtsaks ja kiireks. Laboritööde läbiviimiseks on kasutusel 4 polükristallidest ja 4 monokristallist PV moodulit võimsusega 225 W. Korraga saab alusraamile paigaldada 4 moodulit. Kõikide seadmete ühendused on lahendatud pistikühendustega. Paneelide töö jälgimiseks on kasutusel mikrokontroller Sigma. Inverterina on kasutusel muundur PM3K060, millega tõstetakse päikesepaneeli alalisvool pingele 365 V. [22]

### **3.3 Päikesepaneelide volt-ampere karakteristik**

Päikesepaneeli elektrilisi parameetreid iseloomustatakse volt-ampere karakteristikute ehk I-V kõvera abil (Joonis 3.6). I-V kõver on karakteristik, kus ühes otsas on lühise  $I_{sc}$  ja teises otsas tühijooksu pinge  $V_{oc}$  parameetrid. Praktikas näitab I-V karakteristik koormuse mõju päikesepaneelile.





Joonis 3.6 Päikesepaneeli I-V karakteristik [23]

### Lühisvool

Päikesepaneeli lühisvool on vool, mis kulgeb päikesepaneelis, kui pinge on võrdne nulliga ehk kui paneel on lühistatud. Ideaalis, kui kaod on minimaalsed, siis lühisvool on võrdne valgusvooluga. Sellest tulenevalt saab lühisvoolu lugeda maksimaalseks vooluks, mida suudab päikesepaneel üldse toota.

Lühisvool sõltub mitmetest parameetritest:

- Päikesepaneeli pindalast- tavaliselt vaadeldakse lühisvoolu tihedust (mA/cm) pindalaühiku kohta, mis võimaldab päikesepaneeli võimsust mitte arvestada
- Footonite arv- lühisvool sõltub otseselt valgusvoo võimsusest
- Langeva valguse spekter- tavaliselt kasutatakse mõõtmisel ühte standardset spektrit
- Päikesepaneeli optilised parameetrid- määratakse paneeli pinnakattega

Genereeritud lühivool on võimalik kirjeldada valemiga (3.1)

$$I_s G = qG(L_n + L_p) \quad [24] \quad (3.1)$$

Kus

G- generatsioonide kiirus

$L_n$  ja  $L_p$ - elektronide ja „aukude“ pikkus

Antud valem (4.1) on lähendus ning ei vasta paljudele reaalsele päikesepaneelide karakteristikutele, kuid see näitab ikkagi, et lühisvool sõltub generatsioonide kiirusest ning elektronide pikkusest.

### **Valgusevool**

Valgusevool on vool, mis on genereeritud valguse poolt päikesepaneeli. Antud suurust tuleb kasutada I-V karakteristikute kirjeldamisel. Kuid praktikas mõõdetakse lühisvoolu ja kuna need suurused on tavaliselt võrdsed, siis kasutatakse lühisvoolu väärtust. Kui päikesepaneeli lühisvoolu tihedus on suur, siis selle mõõtmiseks kasutatakse takisteid ning neid ei saa enam võrdsustada. Tavaliselt oletatakse, et valgusevool sõltub päikesepaneelile langevast valgusest, kuid tegelikult sõltub see vool ka olulisel määral pingest.

### **Tühijooksupinge**

Tühijooksupinge  $V_{oc}$  on maksimaalne pinge, mida tekitab päikesepaneel, kui vool on võrdne nulliga. Tühijooksu pinged saab kirjeldada valemiga (3.2)

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I_l}{I_o} + 1\right) \quad [24] \quad (3.2)$$

Kus

$I_o$ - küllastumisevool

$I_L$ - valgusevool

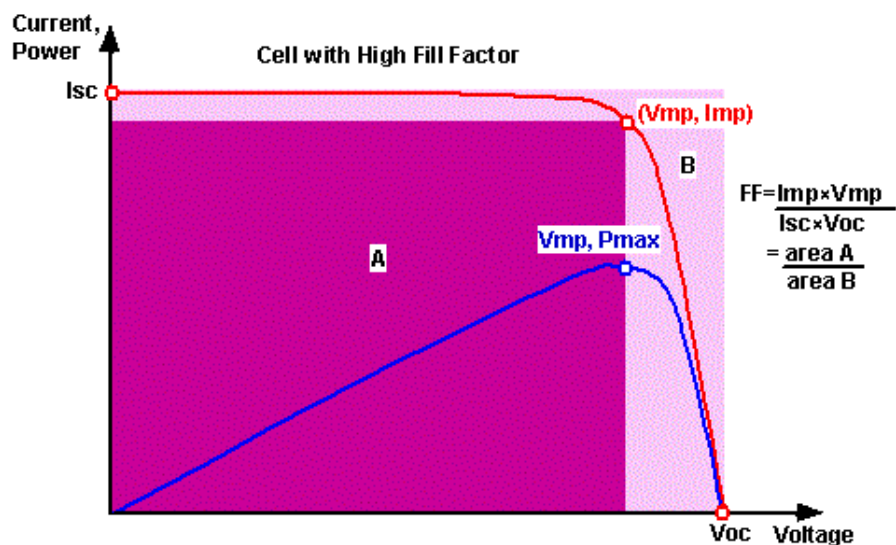
$n$ - ideaalsuse koefitsient

$T$ - temperatuur

Antud võrratuses on näha, et päikesepaneeli tühijooksuvool sõltub olulisel määral küllastumisevoolust. Küllastumisevool sõltub aga omakorda rekombinatsioonidest päikesepaneelis.

### **Täitumise koefitsient**

Lühisvool ja tühijooksu pinge on maksimaalne vool ja pinge, mida on päikesepaneel võimeline genereerima. Kuid võimsus mõlemas nendest punktides on võrdne nulliga. Täitumise koefitsient (FF) on parameeter, mis koos  $V_{oc}$  ja  $I_{sc}$  määravad päikesepaneelide võimsuses. FF (Joonis 3.7) näitab maksimaalse võimsuse sõltuvust lühisvoolust ja tühijooksu pingest.



Joonis 3.7 Päikesepaneeli võimsuse määramine [23]

Et leida FF kasutatakse empiirilist valemit (3.3)

$$FF = \frac{V_{oc} - \ln(V_{oc} + 0,72)}{V_{oc} + 1} \quad [24] \quad (3.3)$$

Antud valemist (3.3) saab järeldada, et mida kõrgem on tühijooksupinge, seda suurem on FF ehk päikesepaneeli võimsus.

### Kasutegur

Kasutegur on kõige levinum parameeter, mida saab kasutada kahe päikesepaneeli tootlikkuse võrdlemiseks. Kasutegur on sõltuvus toodetud võimsusest ja võimsusest, mis langeb päikesepaneelile päikesekiirgusena. Kasutegur sõltub veel lisaks langeva valguse spektrist, intensiivsusest ning välistemperatuurist. Sellest tingituna tuleb kasuteguri leidmisel kõiki neid parameetreid arvestada.

Kasutegurit saab määrata valemiga (3.5), võimsus määratakse valemiga (3.4)

$$P_{\max} = V_{oc} I_{sc} FF \quad [24] \quad (3.4)$$

$$\eta = \frac{V_{oc} I_{sc} FF}{P_i} \quad [24] \quad (3.5)$$

Kus

$P_i$ - päikesepaneelile langeva valguskiirguse võimsus

### **Fotoelemendi karakteristikute mõõtmine loomuliku valgusega**

Mõõtmiskatset loomuliku valgustusega on võimalik läbi viia ainult sellisel juhul, kui summaarne valgustus ei muutu katse jooksul rohkem kui 1 %. Mõõtmistulemuste võrdsustamisel analoogsete katsetega saab ainult sellisel juhul, kui valguse kiirus on vähemalt  $800 \text{ W/m}^2$ . Valguse mõõtmiseks kasutatakse kalibreeritud valgusvoo mõõteseaded, mis peab kogu katse ulatuses paiknema samadel tingimustel mõõdetava fotoelemendiga. [25]

Mõõdetav seade peab olema paigaldatud selliselt, et temale langeks valgus risti ning nurga muutumine ei tohi olla suurem kui  $\pm 10^\circ$ . Kõik mõõteandmed tuleb üles märkida samaaegselt. See tähendab seda, et kõikide väärtuste mõõtmisel peab katsekeha temperatuur olema ühesugune. Kui andmete ülesmärkimine pole selliselt võimalik, siis tuleb seadet kaitsta päikese ja tuule eest selliselt, et tema temperatuur oleks võrdne väliskeskkonna temperatuuriga. Temperatuuri kõikumine katse jooksul võib olla kuni  $2^\circ \text{C}$ . Mõõtetulemused tuleb korrigeerida nii, et need vastaksid etteantud kiirgustasemele ning seadme temperatuurile. [25]

### **Fotoelemendi karakteristikute mõõtmine tehisvalgusega**

Tehisvalgustusega mõõtmisel peab seade paiknema risti valgusvooga ning nurga muutus ei tohi ületada  $\pm 5^\circ$ . [25]

Valgus peab langema nii valgusvoo mõõteseadmele kui ka fotoelemendile võrdselt. Kui valgusallika valgusvoog seda ei võimalda, siis tuleb valgusvoo mõõteseadmega fikseerida näidu kindlas asukohas ning katse läbiviimiseks paigaldama samasse kohta fotoelemendi.

Mõõteandmed tuleb fikseerida ühesugusel temperatuuril. Kui temperatuuri muutusi pole võimalik ära hoida, tuleb fotoelemendi temperatuur enne katse algust võrdsustada väliskeskkonna temperatuuriga.

**Aruanne** peab sisaldama järgmist infot:

- katsetava seadme kirjeldus ning tema määratlus
- mõõtmiskatse läbiviimise tingimused (valgustusallikat ja väliskeskkond)
- valguskiirguse andmed
- temperatuur
- mõõtmiskatse läbiviimise kord ja võimalikud kõrvalekalded juhendist
- mõõtmistulemused ning nende analüüs [25]

## 4. Elektriyaamade elektriline osa

Tänapäeva plokk tüüpi elektriyaamad eeldavad juhtivpersonalilt väga laialdasi teadmisi nii elektriskeemidest kui ka elektriyaama soojustalitlusest. Töö käigus puututakse kokku elektriseadmete normaal- ja avariirežiimidega ning Elektriyaama elektrilise osa juhtimiseks on automaatika- ja relepaigaldis, mille seadistamiseks tehakse katseid ja modelleerimisi.

### 4.1 Põhiprobleemid generaatori kaitsel

#### Staatori mähise rikkumine

Mitmefaasiline lühis on kõige raskem generaatori rikke. Lühisega kaasnevad suure väärtusega voolud, mis võivad mitmekordselt ületada generaatori nimiparameetreid. Mitmefaasilised lühised kutsuvad esile staatori rikkumist. Generaatorid, mille võimsus on üle 100 kW ja millel on eraldi faaside väljatulekud neutraali poolt, kasutatakse lühiskaitsena pikki diferentsiaalkaitset, mis toimib generaatori väljalülitamisele. Väikse võimsusega generaatoritel kasutatakse mitmefaasiliste lühise kaitseks lihtsustatud meetodeid:

- liigvoolu automaat
- automaatne väljalülitus
- sulavkaitsmed

Generaatoril, mille staatori mähise pinge on üle 1 000 V ning iseleeritud neutraali puhul kandub ühefaasilise maalühise puhul lühiskohta väike vool võrreldes mitmefaasilise lühisega. Kuid, kui lühisvoolu toime on pikkajaline võib lühiskohta tekkida kaar, mis viib isolatsiooni riknemiseni lühisekohas ning isegi korpuse sulamiseni. Tuginedes käidukogemusele ning katsetele oletatakse, et staatori mähise rikkumisel ja 5 A suuruse maavoolu puhul, ei toimu nähtavat seadme rikkumist. Sellest tingituna on kuni 6 A maalühisvool ainult signaaliks ning generaatori tööd ei muudeta. Kui lühisvool ületab 6 A, siis peab rakenduma kaitse ning generaator seistatakse. [26]

Väikse võimsusega generaatorite puhul, mille pinge on kuni 1 000 V ning neutraal on maandatud, on ühefaasiline lühisvool küllalt suure väärtusega, ning kaitse toimib generaatori avariilise seiskajana. [26]

Generaatori staatoris esinevad lühised mähise keerdude vahel. Voolud sellise lühise puhul on võrreldavad mitmefaasilise lühiste vooludega. Generaatori kaitseks keerdudevaheliste lühiste eest kasutatakse põiki diferentsiaalkaitset, mis toimib generaatori väljalülitamisele.

Generaatoril, mille puuduvad paralleelsed keerud, kaitset ei kasutata, kuna selle lahendamine oleks keerukas ning keerdudevaheline lühis ei kasva üle teist liiki lühiseks. [26]

### **Rootori mähise riknemine**

Maalühis ühes punktis ergutuse skeemis ei mõjuta generaatori tööd, kuna vool lühiskohast edasi ei kandu ning magnetvälja sümmeetria säilib. Kuid lühise olemasolu kujutab endast potentsiaalset ohtu generaatorile, kuna samasuguse lühise tekkimisel teises punktis, on mähis jäigalt lühistatud. Maalühis mitmes mähise punktis kutsub esile tugevat vibratsiooni ning magnetväli ei ole enam sümmeetriline. Kaar lühiskohas võib põhjustada seadme ja staatori mähise riknemist.

Kahepunktilise lühise ärahoidmiseks kasutatakse kaitset ühepunktilise maalühise eest, mis näeb ette generaatori väljalülitamist. Turbogeneraatorid, millel on vesijahutus või loomulik jahutus ning võimsus anna 300 MW, nähakse ette ühepunktilise lühise puhul häiresignaal. Kaitse kahe maalühise eest on paigaldatud ainult turbogeneraatoritel. [26]

### **Avariirežiim**

Staatori koormamisel vooluga, mis ületab nimivoolu, toob endaga kaasa isolatsiooni kuumenemist ning mähise riknemist, mis viib selleni, et generaatoris võib toimuda lühis. Laialdast kasutust leiavad generaatorid, millel kasutatakse sõltumatut mähise jahutust, kus jahutusaine ringleb voolujuhtivas keskkonnas, mis võimaldab parandada jahutustulemusi ning suurendada voolutihedust juhtides. Generaatorid, mis lubavad väiksemat ülekoormust, peavad olema pideva jälgimise all. Selleks et elektrijaama personal saaks õigeaegselt generaatori tööd reguleerida, paigaldatakse generaatorile ülekoormuskaitse, mis on varustatud signaaliga.

Välislühise puhul, kui ülekoormuse vool saavutab suuri väärtusi, võib isegi lühiajaline kestvus mõjutada staatori isolatsiooni ja viia selle riknemiseni. Generaatori kaitseks välise ülekoormuse eest, kui lühise väljalülitamine ei toimu lattidel, kasutatakse liigvoolukaitset, mis töötab kas pingest sõltuvalt või sõltumata, ning lühise korral lülitatakse generaator välja. [26]

Suuremat kahju generaatorile põhjustavad ebasümmeetrilised välislühised. Selline ebasümmeetrilise voolu puhul faasides esineb rootori kuumenemine ning generaatori vibratsioon, mis võib kaasa tuua seadme riknemist. Staatori voolude ebasümmeetriat võib esile kutsuda ka ühe faasi katkemine või näiteks ühe faasi lüliti rikke. Generaatori kaitsmine välislühiste eest toimub vastujärgnevusvoolude kaitsel ning toimub generaatori seiskamine või rikkesignaali väljastamine.

### **Rootorivoolu ülekoormus**

Rootori ülekoormuskaitse nähakse ette ainult ergutuseta turbogeneraatorite puhul. Asünkroonsel töötamisel suureneb generaatori pöörlemisagedus ning esineb voolu pulseerimine staatoris. Enamus kaudse jahutusega turbogeneraatoreid on võimelised töötama kuni poolt tundi asünkroonses režiimis koormusega kuni 60 % nimikoormusest. Turbogeneraatorid, millel on otsene jahutus, tohivad asünkroonselt töötada ainult 40 % nimikoormusega. Generaatori töötamisel asünkroonses režiimis toob endaga kaasa pinge langemise ja kõikumise, mille puhul vool staatoris võib mitmekordselt ületada nimivoolu. Sellest tingituna on ergutuse kadumisel vajalik generaator seistada või taastada normaalolukord. [26]

Pinge tõusmisel generaatori väljunditel võib endaga kaasa tuua isolatsiooni riknemist mähises või generaatori trafoplokki riket. Isolatsioonile ohtliku pinge tõusu põhjustab staatori magnetvoo kadumine ning seadme pöördesageduse suurenemine koormuse järsul langemisel. Suure võimsusega generaatoril on paigaldatud kaitse, mis rakendub generaatori pinge tõusul, mis on tingitud generaatori järsul seiskamisel. Kaitse toimib ergutuse magnetvälja kustutamise teel.

## **4.2 Treening- ja modelleerimistarkvara**

Antud töös kirjeldatakse ja analüüstitakse generaatori releekaitse modelleerimist tarkvaraga „Корвин-3“ kuid samade ülesannete täitmiseks saab kasutada sarnaseid treeningprogramme:

- REF615
- CAPE
- MATLAB-SIMULINK [27]

Modelleerimisülesande püstitamisel visualiseeritakse graafiliselt ainult esmaseid primaarseadmeid. Sekundaarskeeme ja seadmeid graafiliselt ei esitata nende andmed on üldiselt kirjeldatud seadistustest, mida kujutatakse ekraanil tabelitena. Iga primaarseade omab seadistusatribuute, mis on määratud tema releesätetega.

Pinge, voolu ja juhtimisahelad kõik kaitsmeid võivad olla kas sisselülitatud või väljalülitatud olekus. Iga kaitse sisselülitamise olek seadistatakse eraldi ja see võib olla kas sisselülitatud või väljalülitatud olekus. Sekundaarahela seadmed võivad olla samamoodi kahes erinevas olekus.

Sekundaarseadmete parameetrite muutmine toimub tabeliandmete muutmise teel, kus toimub parameetri kindlaksmääramine võimalikest variantidest. Seadmete parameetrid on kahte tüüpi, kas ainult infoks või informatiivsed ja muudetavad. Kui parameetri väärtus on informatiivne, siis tema muutmine ei ole võimalik.

Mudeli releekaitse ja kaitseskeemi kujundamine toimud konstruktorina. Tarkvara andmebaasis on erinevate funktsioonidega skeemid. Tarkvaraga on juba ettenähtud tüüpskeemid, mis genereeritakse vastavalt vajadustele. Skeemid, mida on võimalik otse konstrueerida on järgmised:

- Blokeeringud
- Kaitse
- RLA
- Sünkroniseerimine
- Lahklülitid
- Voolu- ja pingetrafod
- Elektri genereerimine [28]

Sekundaarskeemide modelleerimine toimub etapiviisiliselt. Kõigepealt genereeritakse automaatselt primaarskeem vastava käsuga. Peale skeemi valmimist toimub seadmete parameetrite määramine ja muutmine iga lõigu kohta eraldi. Skeemi genereerimine toimub automaatselt vastavalt valitud eesmärgile ja tüübile.

Primaarskeemi genereerimisel modelleeritakse igale seadmele maksimaalselt võimalik loogiliste ühenduste arv. Edasi määratakse ja valitakse ühendused vastavalt skeemis olevatele seadmetele. Kaitseliigid, mida on võimalik modelleerida on järgmised:

- Diferentsiaalkaitse
- Faasi diferentsiaalkaitse
- Suunatud diferentsiaalkaitse
- Radiaalne diferentsiaalkaitse
- Põik kaitse
- Distantkaitse
- Maaühenduse kaitse
- Liigvoolukaitse [28]



Kaitseliikide andmed kirjutatakse andmebaasi ning neid vaadeldakse kui võimalikke variante. Praktikas modelleeritakse üks põhikatseliik ning üks kaitse reservina veel juurde. Lisaks on kasutusel erinevat liiki trafokaitsed.

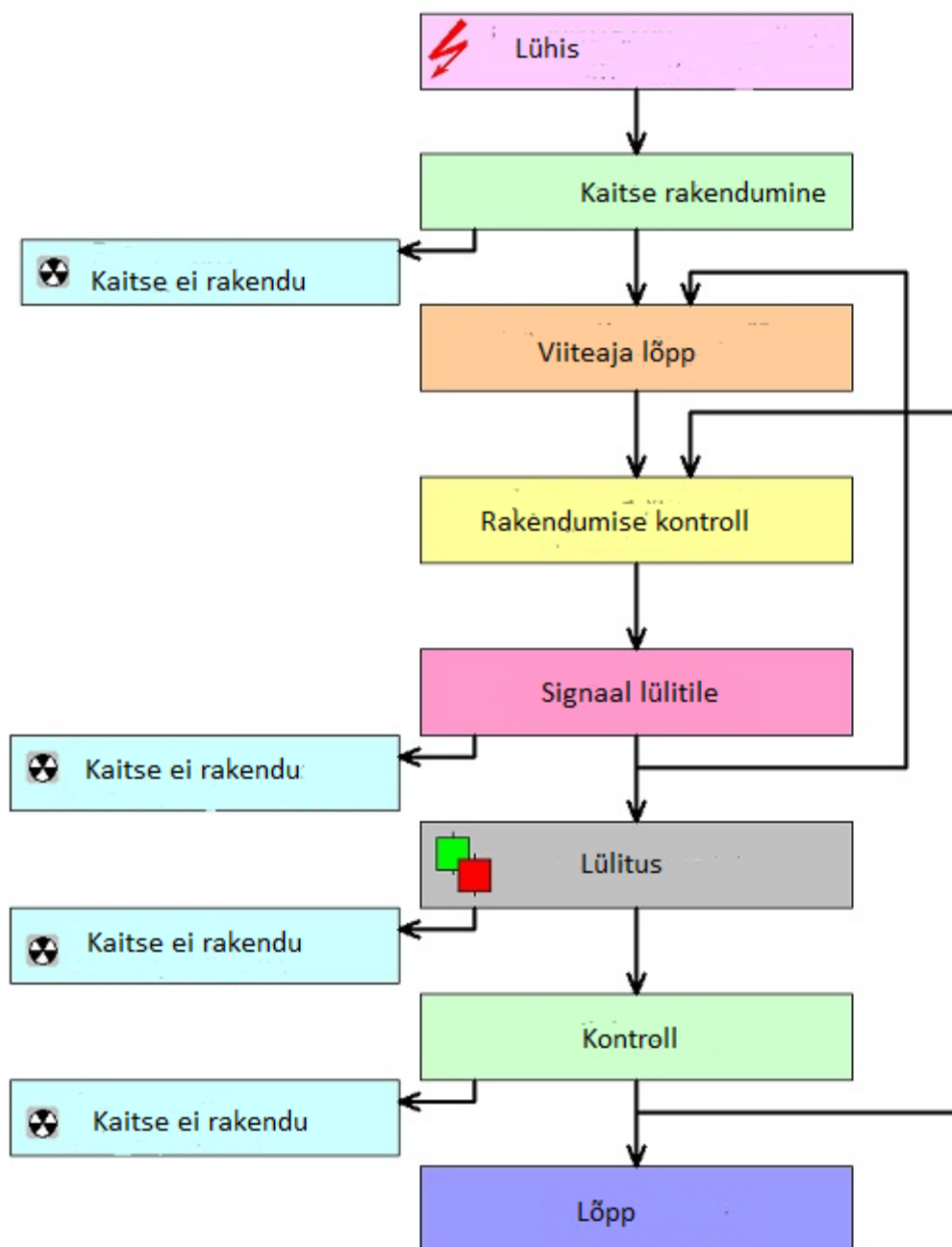
Esmaselt genereeritud kaitseskeemid on näitlikud, ning nende parameetreid võib muuta vastavalt vajadustele. Kui mudelisse planeeritakse liiga palju seadmeid ja neid ei vajata kontrollülesannete läbiviimiseks on neid võimalik skeemist eemaldada või ajutiselt välja lülitada. Peale skeemi genereerimist võimaldab tarkvara seda visuaalselt jälgida ning kõikki ühendusi kontrollida. Valminud skeemi on võimalik korrigeerida ja viia nõuetele ja eesmärgile vastavaks. Seadmete seadistamine seisneb nende liigitamiseks vajalikeks võimalikult vajalikeks ja mittevajalikeks. Parameetrite muutmiseks peab kasutaja märkima primaarseadme, mille sekundaarelemente muutmist soovitakse. Valitud nimekirjas kujutatakse iga elemendi staatus, kas ta on skeemi lülitatud või mitte. [28]

Modelleerimisülesande täitmisel kuvatakse ekraanile ainult need seadmed, mis on skeemi lülitatud. Olemasolevad seadmed liigitatakse omakorda sisselülitatud ja väljalülitatud olekute järgi. Seadme ümberlülitamiseks muudetakse lihtsalt tema staatust.

### **4.3 Töötamine modelleeritud skeemiga**

Kaitseskeemi modelleerimise põhieesmärgiks on viia läbi katseid, millega kontrollitakse seadme võimet tulla toime avariolukordadega. Lisaks teostatakse lülitusi ning jälgitakse seadmete reaktsiooni siirdeprotsessidele. Lülituste tegemisel kontrollitakse õpetatava arusaamist kogu süsteemi kohta. Katsemudel esitatakse graafiliselt, kus on kujutatud lülitid ning signaallambid, mis annavad tagasisidet protsessidest. Avariilise olukorra tekkimisel on oluline antud lõik välja lülitada, et lokaliseerida rikkeid.

Rikke tekkimise ja selle kõrvaldamise algoritm on esitatud joonisel (Joonis 4.1).



*Joonis 4.1 kaitse rakendumise algoritm [29]*

Ülesehitatud mudel teostab lisaks kaitsetoimingutele ka tagasilülitust, et tagada toite olemasolu. Sellest tingituna peab mudeli ülesehitamisel jälgime, et see sisaldaks lisaks kaitseadmetele ka lüliteid, mis oleksid võimelised automaatselt taastama toite. Kui toite taastamine pole taaslülitustega võimalik peab ette nägema võimalusi, mis võimaldaksid teha ümberlülitusi reservtoitele. Lülituskatsetel on vajalik ette näha nii kaitselülitusi kui ka

automaatikalülitusi. Praktikas kujutab see endast dispetšeri tööd alajaamas, kus info kuvatakse tabloodele, selline graafiline esitus on kasutusel ka modelleerimistarkvaras. Kaitsesüsteem peab võimaldama seadistusi erinevate seadmete vahel.

Seadmete modelleerimine toimub järgmiselt:

- Juhtimismoodul, mis teostab jälgimist ja indikatsiooni
- Väljundmoodul, mis edastab signaale lülititele. [30]

Ülesehitatud skeemi kontrollimiseks viikase läbi järgmised katsed vastavalt praktilise töö variandile:

- Maalühis generaatori lattidel
- Mitmefaasiline lühis generaatori staatoril ja tema lattidel
- Lühis staatori mähiste vahel
- Mitmefaasiline lühis trafo mähistel ja tema lattidel
- Ühefaasiline maalühis trafo mähisel ja lattidel
- Lühis trafo mähistel
- Välislühis liinil
- Generaatori vastujärgnevusvoolu ülekoormus
- Sümmeetrilised ülekoormused generaatori staatoril ning trafos
- Generaatori rootori ülekoormus ergutusega
- Liigpinge generaatori staatoril ja trafos
- Ergutuse kadu
- Trafoõli kadu. [31]

Kuna õppeaine „Elektrijaamad“ läbimisel ei ole üliõpilastel sügavaid teadmisi releekaitsest, siis on mõistlik teostada ainult ühte katset korraga, mis annaks lühikese ülevaate generaatori kaitse toimimisest. Releekaitsega tutvumiseks modelleeritakse valitud tüüpskeemil üks võimalikest generaatori rikestest. Peale modelleerimiskatse läbiviimist koostatakse aruanne, mis kirjeldab skeemi punkte:

- Katsetava generaatori tüüp
- Generaatori ühendusskeem
- Imiteeritud rikke tüüp
- Rakendunud kaitse tüüp ja selle algoritm
- Rikke mõju generaatori tööle

## 5. Sisepõlemismootoriga elektrigeneraator

Elektrigeneraator on püsivalt paigaldatud või kaasaskantav elektrienergeetiline seade, mille põhivarustus koosneb mehaaniliselt ühendatud elektrigeneraatorist ja sisepõlemismootorist. Sisepõlemismootoriga elektrijaamu kasutatakse tavaliselt reserv allikana, harvem on need kasutusel ka autonoomse elektrivarustuse allikana. Sisepõlemismootoriga elektrijaamad on kiiresti käivituvad ja -reguleeritavad seadmed.

### 5.1 Sisepõlemismootoriga elektrigeneraator

Sisepõlemismootoriga jaamades on primaarenergia allikaks tavaliselt kolbmootor. Kolbmootorid põhinevad teatavasti kolvi liikumisel silindris, kusjuures enamasti on see liikumine vahelduvasuunaliselt kulgev ja muundatakse kepsu ja väntvõlli abil pöörlevaks. [5]

Kõige laiemalt on sellest mootoriliigist nüüdisajal kasutusel sisepõlemismootorid, milles mehaaniline energia tekitatakse gaasilise või vedela kütuse ja õhu segu plahvatuslikul süütamisel. Enamasti on sellised mootorid neljataktilised, s.t nende igas töösüklis toimub järjekorras

- kütuse ja õhu segu sisselase,
- küttesegu komprimeerimine,
- küttesegu süütamine ja plahvatuslik paisumine koos kolvile toimiva jõu tekkega,
- kütuse põlemissaaduste (heitgaasi) väljalase. [5]

Elektrijaamades kasutatakse sisepõlemismootorist ja generaatorist koosnevaid agregaatvõimsusega mõnikümmend kilovatti kuni mõnikümmend megavatti niihästi pidevtalitluses kui ka tipukatte- ja varutoiteallikatena. Väga levinud on automaatselt (mõne sekundi kuni mõne minuti jooksul) käivituvad töökindlad diiselvarutoiteallikad vastutusrikaste elektritarbijate (haiglate, pankade, lennujaamade, raadio- ja televisioonijaamade jms) elektrivarustussüsteemides. [5]

Sisepõlemismootoriga elektrijaama suureks eeliseks on nende mobiilsus. Mootori käivitamine toimub tavaliselt umbes 10 sekundi jooksul ja koormamine nimivõimsuseni umbes poole minutiga. Sellised suured käivitus- ja koormamiskiirused on võimalikud vaid siis kui kütus on soojas seisundis (jahutusvesi ja õli on ette soojendatud). Mootori

talitlusaeg enne hooldust on tavaliselt 3000 tundi. Kapitaalremontide vaheline aeg on tavaliselt 50 000 tundi ja tööiga umbes 30 aastat, seega sama mis tavalise soojuselektrijaama põhiseadmetel. [5]

Tänapäeva energeetiliste mootorite kasuteguriks elektrienergia tootmiseks on tavaliselt 37-40%. Gaasimootorite kasutegur sõltub suhteliselt vähe mootori koormatusest, muutus keskmiselt 7%, samas on gaasiturbiinidel muutus 12-13%. Kütuse kasutamise kasutegurit saab oluliselt tõsta kui kasutada kasulikult ka mootorist eralduv soojus. [5]

Soojuse eraldumine toimub järgmiste protsessidega:

- lahkuvate gaasidega (20%)
- jahutusveega (10%)
- õli jahutussüsteemis (5%)
- põlemisõhu jahutus (5%). [5]

Sisepõlemismootoriga elektrijaam avaldab mõju keskkonnale põlemisel eralduvate gaasidega. Tõsisemaks probleemiks on suitsugaaside puhastamine lämmastik-oksiididest. Põlemiskambris valitseva kõrge temperatuuri ja rõhu tõttu tekib hulgaliselt lämmastikmonooksiiti, mis enamuses muutub kohe lämmastikdioksiidiks. Lämmastikdioksiidi eemaldamine toimub ammoniaagiga (100%) või ammoniaagi vesilahusega (25%). Toimuv keemiline reaktsioon nõuab temperatuuri 300-400°C ja katalüsaatori juuresolekut. Näiteks 2x15 MW diiselektrijaam tarbib 170 kg 25% ammoniaagivesilahust tunnis. [5]

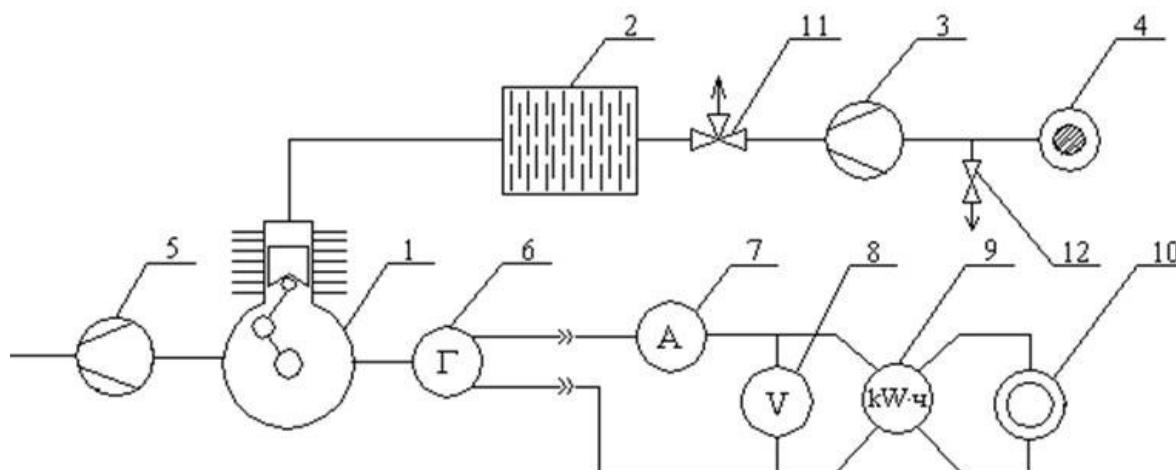
## 5.2 Katseseadme valmistamine

Bensiinimootoriga elektrijaama katseseade on stend, millel paikneb seade ise, valgustus ehk omatarve ja kaabel või mehhanism koormuse tekitamiseks. Näitlik stend, milline võiks seade välja näha on toodud joonisel (Joonis 5.1).



*Joonis 5.1 Bensiinipõlemismootoriga elektrijaama katseseade [32]*

Seadme primaarskeem on esitatud joonisel (Joonis 5.2).



*Joonis 5.2 Bensiinimootoriga elektrijaama skeem [32]*

*1- sisepõlemismootor; 2- summuti, 3- lahkvate gaasiti mõõtesead, 4- suitsugaaside toru, 5- kütusekulu mõõtur, 6- generaator, 7- ampermeeter, 8- voltmeeter, 9- elektriarvesti, 10- koormus, kolmiktoru, 12- kondensaadi väljalaske kraan*

Seadme funktsioneerimine on jagatud järgmiselt

- Kütuse pealeandmine

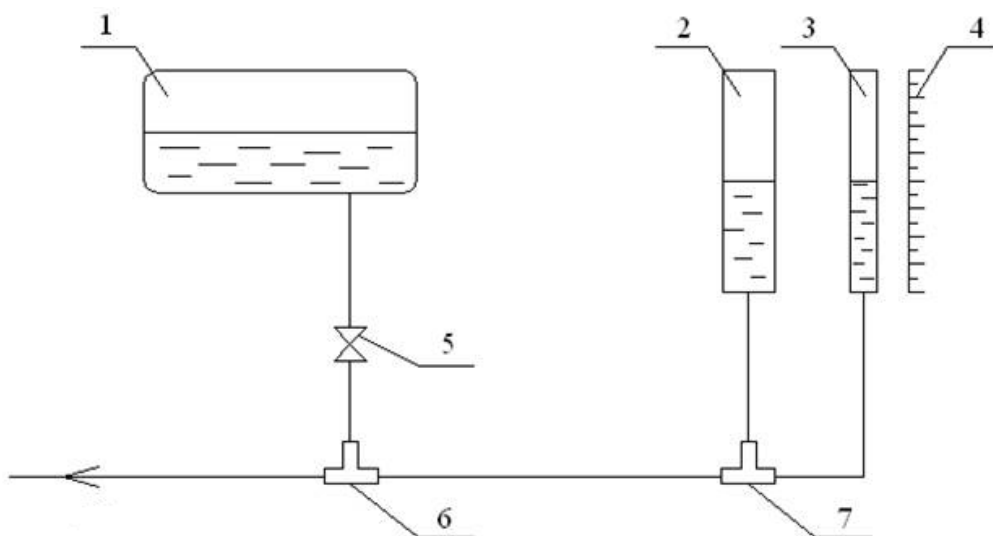
- Sisepõlemismootoriga elektrijaam
- Lahkuvad gaasid
- Mõõteseadmed
- Koormus

Kütuse pealeandmiseks on seadmel bensiinipaak ning „U“ kujuline läbipaistev toru, millele kantakse peale tähised, et oleks võimalik jälgida ja analüüsida kütusekulu. Kütusesõlme juurde kuulub ka karburaator, mis on üks osa bensiinielektrijaama seadmetest ja tema ülesandeks on kütuse ettevalmistamine ehk segamine õhuga.

Bensiinielektrijaama koosneb neljataktilisest bensiinimootorist ning elektrigeneraatorist. Oluline on jälgida, et generaator oleks kaitstud välismõjude eest ning oleks võimalikult ohutu. Generaatori juhtimist ja jälgimisseadmed nagu volt- ja ampermeetrid töötavad vahelduvvooluga.

Väljuvate gaaside ärajuhtimiseks ühendatakse jadamisi toru katalüsaatoriga, mis on eraldi kaitsekestas, ning gaaside ärajuhtimise toru. Torule paigaldatakse ventiili, mille abil saab seal ära juhtida kondensaati, et korrosiooni tekkimine oleks minimeeritud.

Mõõtesüsteem sisaldab 6 termomeetrit, mis on ühendatud juhtimisautomaatikasse, väljuvate gaaside mõõtesead, kütusekulu mõõteseaded mis on esitatud joonisel (Joonis 5.3), voltmeeter, ampermeeter ning elektriarvesti. Elektrijaama koormamiseks ning koormuskatsete läbiviimiseks ühendatakse temaga mootor, mida on võimalik eraldi juhtida ja koormust eraldi reguleerida.

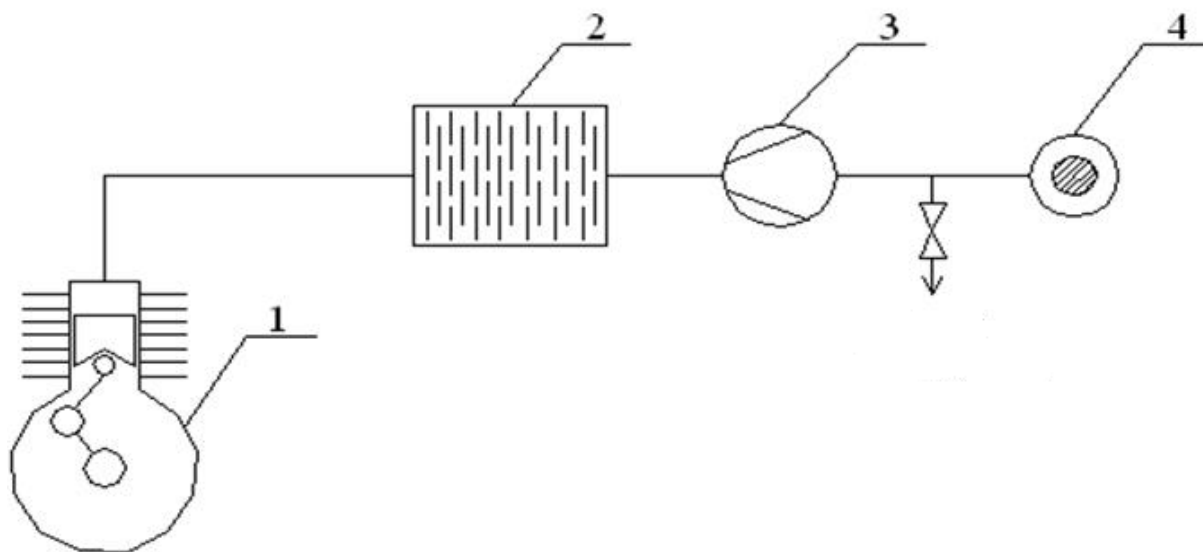


**Joonis 5.3 Sisepõlemismootoriga elektriijaama kütusekulu mõõteseade [32]**  
**1- paak, 2- vahepaak, 3- läbipaistev mõõtetoru, 4- mõõteskaala, 5- kraan, 6 ja 7- kolmikharu**

Kütuse pealeandmine käib läbi kütusepaagi, mis on ühendatud läbi „U“ kujulise toru vahepaagiga, mille täitmine käib läbi kraani, mis reguleerib kütusehulka. Vahepaak võimaldab mõõta kütusekulu täpsusega kuni  $1 \text{ cm}^3$ . Elektriijaama kütusekasutuse ümberlülitamine vahepaagile käib kraani abil ning see toimub katsete läbiviimise ajaks.

Väljuvate gaaside ärajuhtimise seade on esitatud joonisel (Joonis 5.4). Summutitoru kaitsmiseks kasutatakse kahekordset kaitsekesta, sest seadme töötamisel kasvavad gaasi temperatuurid väga kõrgeks. Jadamisi summutiga on ühendatud gaaside kulumõõteseade, et oleks võimalik mõõta ja fikseerida lahkuvate gaaside hulka. Peale katsetamist on vajalik avada kraan ning eemaldada süsteemis kondenseerunud vesi.





*Joonis 5.4 Sisepõlemismootoriga elektriijaama gaaside ärajuhtimise skeem [32]  
1- sisepõlemismootor, 2- summuti, 3- lahkuvate gaaside kulu mõtteseade, 4- suitsutoru*

### 5.3 Katsete läbiviimine

Katsete läbiviimine sisepõlemismootoriga elektriijaama stendil sõltub katse eesmärgist. Katsetamisel põhilisteks mõõteparameetriteks on temperatuur, kütuse- ja gaasikulu ning koormus. Temperatuurinäitude saamiseks on seadmel 6 termopaari, mille näidud fikseeritakse millivoltmeetriga. Temperatuuri mõõtmine toimub järgmistes punktides:

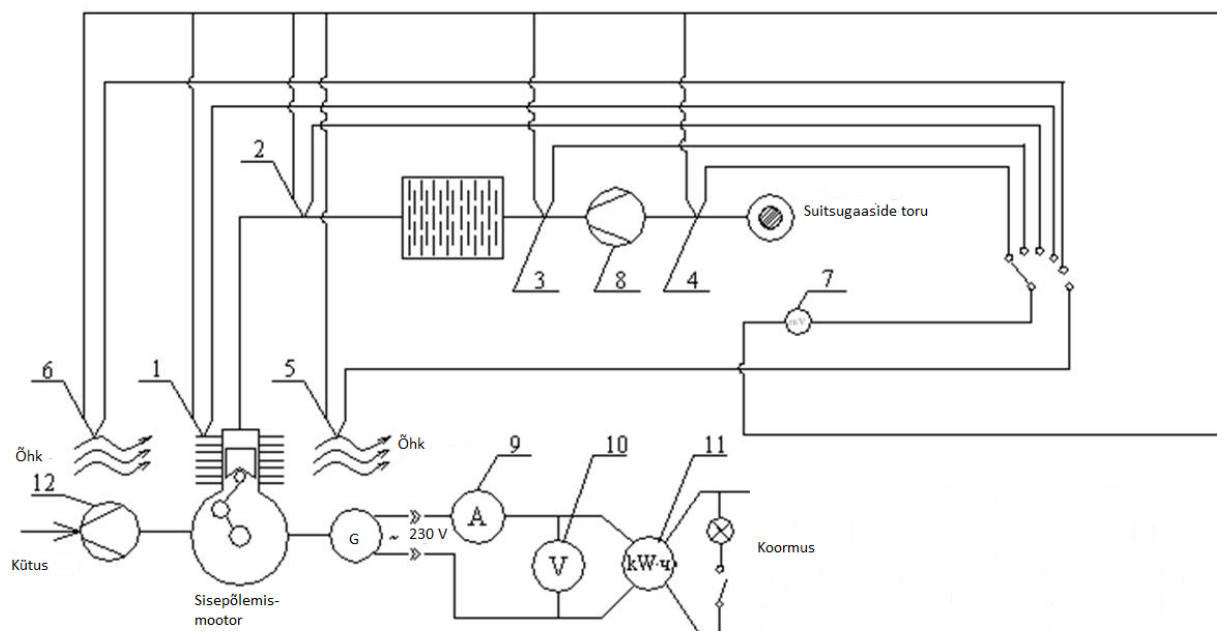
- Välisõhk
- Mootori korpus
- Mootori jahutusõhk
- Gaasi temperatuur enne summutit
- Gaasi temperatuur pärast summutit
- Gaasi temperatuur väljalaske torus

Kütusekulu mõõtmine toimub „U“ kujulises torus. Väljuvate gaaside mõõtmine toimub väljalasketorusse paigaldatud seadme abil.

Elektrienergia mõõtmiseks paigaldatakse seadmele elektriarvesti, mis mõõdab kasutatavat aktiivenergiat pingel 230 V või 400 V, sagedusega 50 Hz. Elektriarvesti mõõtemääramatus määratakse standardiga, mis peavad vastama katsete eesmärgile. Amper- ja voltmeetrit

kasutatakse voolu ja pinget mõõtmiseks, et oleks võimalik hiljem määrata elektrienergia parameetreid.

Bensiinimootoriga elektriijaama mõõteseadmete skeem on toodud joonisel (Joonis 5.5).



**Joonis 5.5** Sisepõlemismootoriga katseseadme mõõteseadmete paigaldusskeem [32]

Laboratoorse töö läbiviimine tuleb jagada neljaks etapiks. Kõigepealt toimub seadme käivitamine, siis viiakse seade maksimaalkoormusele peale seda langetatakse sujuvalt koormus ja elektrijaam seisatatakse.

Seadme käivitamine toimub järgmiselt:

- Töökoha ettevalmistamine
- Seadme visuaalne kontroll
- Mootoriõli kontroll
- Kütusepaagi avamine
- Mootori lüliti asetamine asendisse „ON“
- Mootori käivitamine
- Mootori soojendamine ning nimiparameetrite saavutamine

- Vahe kütusepaagi täitmine

Peale käivitamist toimub parameetrite ülesmärkimine tühijooksukoormusega. Peale esmaste parameetrite ülesmärkimist alustatakse elektrijaama koormamist. Koormamine toimub astmeliselt vastavalt katse eesmärgile iga koormusastme fikseeritakse vajalikud näidud. Peale maksimaalkoormuse saavutamist langetatakse koormus, samal ajal fikseeritakse mõõteandmeid. Fikseeritud katseandmete töötlemine toimub vastavalt katse eesmärgile.

## 6. Ekskursioon elektriijaama

Üliõpilaste elektriijaama ekskursiooni eesmärgiks on tutvuda elektriijaama ehitusega ning toimimisega. Jaama külastusel tutvutakse tema põhiseadmete ning nende toimimisega sealsetes olukordades. Ekskursioon peab motiveerima õpilasi tutvuma lähemalt õpeainega ning kinnistama loengutes saadud teoreetilisi teadmisi.

### 6.1 Eesti Energia Narva Elektriijaamad

Eesti Energia Narva Elektriijaamad on aktsiaselts, mis kuulub Eesti Energia alla ning on asutatud 04.10.1999 ning selle põhieesmärgiks oli Balti soojuselektriijaama ja Eesti soojuselektriijaama käid. Eesti Energia Narva Elektriijaamad varustab elektrienergiaga Eesti tarbijaid ja soojusenergiaga Narva linna, ekspordib elektrienergiat Baltimaadesse ning varustab Estlinki merekaabli kaudu elektriga Põhjamaade elektriturgu. Ettevõtte tegeleb ka põlevkivituha realiseerimisega. [33]

Eesti Energia Narva elektriijaamade tootmisüksused toodavad aastas kokku ca 9 TWh elektrit, millest jaguks 7,5 miljonile inimesele, arvestades, et ühe inimese kohta tarbitakse aastas keskmiselt 1200 kWh elektrienergiat. [34]

Eesti elektriijaama on kaheksa energiaplokiga soojuselektriijaam, mille projekteeritud koguvõimsus on 1610 MW. Elektriijaama on ehitatud töötama kohalikku ja madala kalorsusega tuha- ja väävlirikka põlevkiviga. Elektriijaam esimene energiablokk käivitati aastal 1969. Elektriijaama töö ja emissioonide optimeerimiseks alustati 2001. Aastal kaheksana energiaplokki renoveerimisega. Renoveerimisel paigaldati uus katel, mis töötab tsirkuleerival keevkihttehnoloogial. [35]

Balti elektriijaam on üks maailma võimsaim põlevkivil töötav elektriijaam. Elektriijaama ehitati neljas etapis. Esimeses, teises ja kolmandas etapis paigaldati 18 katelagregaati tootlikkusega 53 kg/s, 8 turboagregaati võimsusega 100 MW ja 2 vasturõhuturbiini võimsusega 12 MW, mille vastastikuse sidumise ja toime tulemusena sai võimalikuks rahuldada Narva ettevõtete vajadust auru järele. Elektriijaama neljandas etapis pandi tööle neli energiaplokki. Igas plokis on paigaldatud katlad tootlikkusega 78 kg/s ja turboagregaadid võimsusega 200 MW. [35]

## 6.2 Auvere elektriyaam

Eesti Energia alustas 2011. aasta suvel uue nüüdisaegsel keevkihttehnoloogial (CFB) töötava elektriyaama rajamist Auverre. Uus elektriyaam, mis peaks valmima 2016. aastal, võimaldab lisaks põlevkivile kasutada kuni 50% ulatuses biokütuseid ning aitab viia yaama heitmed tänapäevase gaasiyaama tasemele. Auvere elektriyaama maksimaalne aastane netotoodang on 2192 GWh. Auvere elektriyaama ehituse finantseerimiseks andis Euroopa Komisjon Eestile loa eraldada Eesti Energiale aastateks 2013–2020 kokku 18 miljonit tonni tasuta CO<sub>2</sub> kvooti. [36]

## 6.3 Ekskursiooni läbiviimine

Elektriyaama külastamise eesmärkideks on:

- Omandatud teoreetiliste teadmiste laiendamine ja kinnistamine
- Praktiline tutvumine elektri tootmise tehnoloogiaga
- Tutvumine põhi- ja abiseadmete ehitusega, talitlusega, projekteerimise ning hooldamisega
- Tutvumine elektriyaamades ning tootmishoonetel oleva tööohutusega
- Tutvumine juhtimisstruktuuriga tootmisprotsessis
- Tutvumine keskkonna kaitse teemadega, mis on seotud elektrienergia tootmisega

Peale elektriyaama külastust koostavad üliõpilased aruande, mis peab sisaldama järgmisi punkte:

- Elektriyaama liik ning tema lühikirjeldus
- Elektriyaama skeem
- Põhi- ja abihoonete olemasolu ning nende eesmärk
- Põhiseadmete lühikirjeldus
- Elektriyaama juhtimise struktuur
- Keskkonnasäästu tagamise meetoodika
- Põhilised ohutusnõuded
- Elektriyaama majanduslik kirjeldus- toodetavad energialiigid nende omahind jne

## Lõputöö kokkuvõte

Lõputöö eesmärgiks oli uurida ning pakkuda välja erinevaid võimalusi õppeaine „Elektrijaamad“ uute praktiliste tööde läbiviimiseks. Laboratoorsete tööde väljatöötamisel tuli arvestada õppeaine sisuga ning õpiväljunditega. Välja pakutud praktilised tööd peavad olema selged ning jõukohased üliõpilastele, kes on tutvunud õppeaine kohustusliku konspektiga ning õppekirjandusega.

Töö on jagatud kuueks osaks, millest 5 kirjeldavad praktilisi töid ning viimane seletuskirja osa koosneb Eestisse rajatava uue Auvere elektrijaama lühikirjeldusest ning tema külastuse kavast ning eesmärkidest. Elektrijaama kirjeldava osa eesmärgiks on anda ülevaade rajatise struktuurist, ajaloost ning põhilistest kasutatavatest seadmetest. Kõiki praktilisi töid kirjeldavad seletuskirja osad on ülesehituselt sarnased. Kõigepealt kirjeldatakse valitud praktilise töö teoreetilist osa, et korrata ja värskendada üliõpilaste teadmisi antud valdkonnas. Seejärel toimub katseseadme või –tarkvara põhjalik kirjeldus, mis selgitab selle tööpõhimõtet ning katse läbiviimise meetodeid. Viimases alaosas toimub ühe võimaliku katse läbiviimise ja andmete töötlemise kirjeldamine ning analüüsimine.

Esimeseks katseks on valitud laboratoorne töö gaasiturbiinseadmega. Gaasiturbiin on üks siseõlemise mootorite alaliike, mis kasutab kütusena gaasi. Kuna turbiin ühendab endas nii auruturbiini kui ka siseõlemismootori omadusi, siis antud praktilise töö teostamine annab hea ülevaate elektrijaamad põhiseadmete tööst. Gaasiturbiini töö kirjeldamiseks kasutatakse Braytoni ringprotsessi. Töotsükli analüüsimisel tuleb silmas pidada, et tegeliku seadme protsessid erinevad ideaalsetest ringprotsessidest.

Praktikumi läbiviimiseks kasutatakse mikroturbiini Capstone C30. Mikroturbiine kasutatakse elektri- ja soojusenergia koostootmiseks. Capstone C30 seadme on madala emissiooniga ning mõõtudelt sobib paigaldamiseks ISO-tüüpi konteinerisse, mis teeb temast väga sobiva seadme õppeasutuse laboratooriumisse. Kuna antud seade on TTÜ Soojusinstituudil juba olemas, siis ei ole vaja teostada mahukaid investeeringuid katseseadme soetamiseks ning halduskulusid on võimalik asutussiseselt ökonoomselt jagada.

Praktikumi sooritamine annab õpilastele hea ülevaate gaasiturbiiniga elektrijaamade tehnoloogilistest skeemidest ning siseõlemise tööpõhimõttest, kuna Capstone C30 mikroturbiini korpus on kompaktne ning visuaalselt hästi jälgitav. Kirjeldatud katse seisneb gaasiturbiini elektrilise ja mehhaanilise võimsuse mõõtmises ja kasuteguri määramises.

Andmete töötlemisel määratakse seadme võimsus lähtuvalt kompressorist või kasutades bilansi meetodit.

Kuna 80 % [3] elektrienergia tootmisest toimub soojuselektrijaamades, siis on oluline, et üliõpilased tunneksid antud liiki elektrijaamade töö optimeerimist. Soojuselektrijaama energia tootmise juhtimise põhilisteks parameetriteks on sisend-väljund karakteristikud, mille alusel pannakse paika ja juhitakse kõiki jaamas toimuvaid protsesse. Põhilised karakteristikud, mida jaama töö juhtimiseks kasutatakse on:

- Sisendi kulukarakteristik
- Marginaalkulu karakteristik
- Sisendi erikulu karakteristik
- Kasuteguri karakteristik.

Jaama töö kulgu optimeerimiseks kasutatakse modelleerimistarkvara EnergyPRO. Andmete sisestamiseks koostatakse kõigepealt jaama mudel ning seejärel teostatakse katseid lähtuvalt etteantud elektrijaama parameetritest. Elektrijaama töö modelleerimisel leitakse võimsuse jagunemine jamas ning koormamise plaan.

Kolmandaks praktiliseks tööks on valitud taastuvenergiat talitlev päikesepaneelidega elektrijaama katsetamine. Seoses taastumatute kütuseliikide ammendumisega on oluline roll elektritootmises ka taastuvatel energiaallikatel. Päikesepaneelidega elektrijaam on seade, mis võtab päikeselt tuleva energia vastu kiirete kaudu. Päikesepaneelidega elektrijaama ehitus võib olla väga erinev ja sõltub elektrienergia tarbimise liigist ja vajadusest. Vastavalt sellele, kuidas klient soovib toodetud elektrienergiat tarbida, ehitatakse valmis ka konkreetne päikesejaama.

Praktilise katse läbiviimiseks kasutatakse TTÜ õppehoone katusele paigaldatud paneele. Kuna paneelid on juba algselt soetatud õppe eesmärgil, siis sisaldavad nad ka kõiki vajalikke seadmeid laboratoorsete tööde läbiviimiseks.

Kuna elektritootmise põhiliseks ökonoomsuse ja tasuvuse näitajaks on kasutegur, siis on antud töö raames leitakse päikesepaneeli elektriline kasutegur. Kasuteguri leidmiseks kasutatakse volt-amper karakteristikuid. Karakteristikute määramiseks mõõdetakse etteantud katseseadme lühisvool ning tühijooksu pinge. Lähtudes mõõdetud suurustest leitakse valgusevool, täitumise koefitsent ja nendest tulenevalt juba kasutegur.

Neljandaks praktiliseks tööks on elektrijaama elektrilise osa koostamine ja katsetamine. Kuna generaator omab elektrijaamas väga suurt tähtsust, siis on oluline ka selle kaitse. Põhilised probleemid, mis generaatori töös esinevad on erinevat liiki lühised ning rikked nagu, staatori ja rootori mähiste vigastused. Kaitseseadmete skeemide koostamine toimub kasutades tarkvara *Корвин-3*. Skeemide moodustamine toimub automaatselt vastavalt kaitse liigile ning katseskeemid on juba eelnevalt üliõpilaste jaoks ette valmistatud. Üliõpilase tööks on katseskeemi käivitamine ning tulemuste võrdlemine erinevate etteantud kaitse parameetritega. Õpilane peab suutma tuvastada kas kaitse on efektiivne või mitte.

Laboratoorse töö teostamine annab hea ülevaate elektrijaamade elektrilistest skeemidest. Modelleerimisülesande teostamisel on võimalik tutvuda iga skeemiosa tööpõhimõttega, mis võimaldab mõista tema vajadust ja eesmärke.

Viimaseks praktiliseks tööks on sise põlemismootoriga elektrijaama katsetamine. Jaama primaarenergia allikaks on tavaline kolbmootor, mis töötab vedelal põleva kütusel. Kuna tavaliselt kasutatakse sise põlemismootoritega elektrijaama reservjaamadena, siis nende mõõdud ja võimsused on enamasti väiksed ning nende põhieesmärgiks on kiire käivitus ning nimivõimsuse saavutamine.

Katsete läbiviimiseks on tavaline bensiinigeneraator võimsusega 3 kW. Kuna müügil olevad generaatorid ei ole harilikult varustatud mõõteseadmetega laboratoorsete tööde läbiviimiseks, siis on töös põhjalikult kirjeldatud seadmele paigaldatavate mõõtevahendite eesmärk ning täpne asukoht. Katsete läbiviimiseks paigaldatakse tavalisele bensiinmootorige elektrigeneraatorile temperatuuri-, kütusekulu- ja elektri mõõteriistad.

Praktilise töö läbiviimine algab seadme ülevaatuselt ning ohutust käivitamisest ning lõpeb agregaadiga sujuva seisatamisega. Mõõtetulemuste saamiseks kasutatakse mootorit koos pidurdusseadmega, mille ehitust antud töös ei käsitleta. Laboratoorse töö teostamine annab üliõpilastele ülevaate elektritootmiseseadme ehitusest ning talitlusest.

Viimane osa sisaldab elektrijaama ekskursiooni kirjeldamist. Ekskursiooni objektiks on valmiv Auvere uus soojuselektrijaama. Elektrijaama külastuse eesmärgiks on anda üliõpilastele ülevaade suure elektrijaama ehitusest ja talitlusest. Elektrijaama külastamisel pööratakse erilist tähelepanu ohutusele. Eesmärk on külastada elektrijaama, mille ehitamisel on kasutatud tänapäeva tehnoloogiat, kuna lõpetajad suunduvad tööle oludesse, kus ei pruugi olla kasutusel seadmeid ja süsteeme, mida eksponeeritaks vanades suurtes



soojuselektrijaamades. Peale ekskursiooni koostavad üliõpilased aruande, kus kirjeldatakse elektrijaama nii tehnilist kui ka organisatsioonilist poolt.

Kõik praktilised tööd on välja pakutud selliselt, et investeeringud nende teostamiseks oleksid minimaalsed. Kui laboratoorse töö teostamiseks kasutatakse seadmeid, siis on püütud rakendada juba ülikoolis olevaid ja kasutatavaid masinaid, kui see ei ole võimalik, siis soetatava seadme maksumus peaks olema minimaalne ja põhjendatud. Modelleerimisülesannete koostamisel on lähtutud kriteeriumist, et kasutada tuleb neid tarkvarasid, mille litsentse TTÜ juba omab ning mille kasutamisel on arvestatavad kogemused ja oskused.

Antud lõputöö omab praktilist väärtust, kuna võimaldab sellest juhinduvalt koostada õppeaine läbiviimiseks vajalikke praktilisi töid. Töös on kirjeldatud põhilisi praktikume, mis on vajalikud teoreetiliste teadmiste mõistmiseks ning omandamiseks. Lisaks eelpool nimetatud katsetele ja elektrijaamadele on elektri tootmises oluline osa ka tuumaenergeetikal. Kuid kuna tuumajaamad on väga keerulised süsteemid ning koosnevad väga paljudest osadest, siis nendega seotud katsete läbiviimised on väga mahukad. Sellest tulenevalt ei ole antud töös seda valdkonda otseselt käsitletud.

## Kirjandus

- [1] A. Hamburg, „Analysis of Energy Development,“ 2010.
- [2] H. T. M. K. Mati Valdma, Soojuselektrijaamade talitluse optimeerimine, Tallinn: TTÜ kirjastus, 2008.
- [3] R. energiaagentuur, „Key World Energy Statistics 2013“.
- [4] „Õppeaine "Elektrijaamad" õpiväljundid“.
- [5] H. Tammoja, „Elektrijaamad loengukonspekt,“ Tallinn, 2012.
- [6] C. B. Richard E. Sonntag, „Introduction to Engineering Thermodynamics,“ Retrieved, 2007.
- [7] П. В. С, „Двигатели,“ 2015. [Võrgumaterjal]. Available: <http://vdvzhke.ru/sudovye-gazovye-turbiny/konstrukcija-i-princip-dejstvija-gazovyh-turbin/ustrojstvo-i-princip-dejstvija-gazovoj-turbiny.html>.
- [8] A. Vaht, Kombineeritud soojusseadmed, Tallinn: Tallinn Tehnikaülikool, 2001.
- [9] Б. Н.И., Термодинамические процессы газотурбинных двигателей, Недра, 1969.
- [10] H. Ots, Soojustehnika algkursus, Tallin: TTÜ kirjastus, 2011.
- [11] L. C. OÜ, „Amitecproject,“ 2006. [Võrgumaterjal]. Available: [http://www.amitecproject.ee/wp-content/uploads/2012/02/Product-Catalog\\_EESTI\\_LR.pdf](http://www.amitecproject.ee/wp-content/uploads/2012/02/Product-Catalog_EESTI_LR.pdf).
- [12] Б. Инжиниринг, 2015. [Võrgumaterjal]. Available: [http://www.bpcenergy.ru/imgcompany/bpcenergy/doc/Capstone\\_brochure5.pdf](http://www.bpcenergy.ru/imgcompany/bpcenergy/doc/Capstone_brochure5.pdf).
- [13] И. И. Ползунова, „УСТАНОВКИ ГАЗОТУРБИНЫЕ МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ,“ Москва, ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СТАНДАРТОВ СОВЕТА МИНИСТРОВ СССР, 1975.

- [14] M. Vilipuu, „Füüsikaliste suuruste mõõtmine. Mõõtmisvead, mõõtehälbed ja mõõtemääramatus füüsika praktikumites,“ Tallinn, Tallinna Tehnikaülikool, 2015.
- [15] I. M. A. A. Ots, „Soojustehnika,“ Tallinn, Valgus, 1974.
- [16] M. Valdma, „Elektrisüsteemide optimaaljuhtimine loengukonspekt,“ Tallinn, 2014.
- [17] ClimateTechWiki, „Pulverised Coal Combustion with higher efficiency,“ 2015. [Võrgumaterjal]. Available: [http://www.climatetechwiki.org/technology/sup\\_crit\\_coal](http://www.climatetechwiki.org/technology/sup_crit_coal).
- [18] energyPRO, „EnergyPRO Software product description,“ 2015. [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.emd.dk/files/energypro/energyPROBrochureEN.pdf>.
- [19] Росэнергосервис, „Экономика электроэнергетики,“ Ростов-на-Дону, 2010.
- [20] E. I. Administration, „Total Electricity Net Consumption,“ 2013.
- [21] О. «Термодинамика», „Схемы работы солнечной электростанции Тыщ,“ 2014. [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.termocool.ru/products/shemy-raboty-solnechnoj-elektrostantsii>.
- [22] E. OÜ, „TTÜ Arukas energiasüsteem,“ 2015. [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.energiatehnika.ee/arukas-energiasusteeem-kirjeldus>.
- [23] F. J. B. E. Lindholm FA, „Application of the superposition principle to solar-cell analysis,“ *EEE Transactions on Electron Devices*, 1979.
- [24] G. M. Masters, „Renewable and Efficient Electric Power System,“ Wiley, 2004.
- [25] М. СТАНДАРТ, „ИЗМЕРЕНИЯ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК,“ Москва, ПК ИЗДАТЕЛЬСТВО СТАНДАРТОВ Москва, 2004.
- [26] А. В. Б. Н. А.Л Церазов, Электрическая часть тепловых электростанций, Москва: Энергия, 1980.
- [27] B. Vahidi, „MATLAB-SIMULINK-based simulation for digital differential relay protection of power transformer for educational purpose,“ *Amirkabir University of Technology*, 2013.
- [28] Г. И. Абрамович, „Разработка методов и алгоритмов автоматизации планирования

и контроля оперативных переключений в электрических сетях энергосистем,“ Москва, 2013.

- [29] К. В. К. Е. Усов С.В., „Электрическая часть электростанций,“ Энергия, 1972.
- [30] К. МОДУС, „Программный комплекс для энергетики,“ 2015. [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.swman.ru/content/blogcategory/82/119/>.
- [31] П. М. Данилович М.С., „Комутационные перенапряжения при включении и выключении высоковольтных электродвигателей,“ %1 *Электрические станции*, 1973.
- [32] П.А.Щинников, „СБОРНИК ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ,“ Новосибирск, Новосибирский государственный технический университет, 2008.
- [33] Inforegister, Register OÜ, 2015. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.inforegister.ee/10579981-EESTI-ENERGIA-NARVA-ELEKTRIIJAAMAD-AS>.
- [34] E. energia, „Eesti Energia Narva Elektriijaamad AS,“ 2015. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.energia.ee/et/organisatsioon/narvajaamad>.
- [35] „Energeetika ajalugu,“ Eesti energia, 2015.
- [36] „Eesti Energia aastaaruanne 2013,“ Eesti Energia, 2013.
- [37] „Лабораторная работа № 1 испытание токовой защиты нулевой последовательности от замыканий на корпус в обмотке статора генератора,“ Литературный портал онлайн, 2015. [Võrgumaterjal]. Available: <http://bookzooka.com/book/139-ispytanie-tokovoj-zashhity-nulevoj-posledovatelnosti-v-seti-s-malymi-tokami-zamykaniya-na-zemlyu/8-laboratornaya-rabota-1-ispytanie-tokovoj-zashhity-nulevoj-posledovatelnostinbspnbnsp-otnbnsp-zamykanij-na-korpus-v-obmotke-stato>.

## **Lisad**

LISA 1 Mikroturbiin Capstone C30 tooteleht