



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

EESTI ELEKTRIAAMA TALITLUSE ANALÜÜS

ANLYSIS OF EESTI POWER PLANT OPERATION

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Juri Zenin

Üliõpilaskood: 163641 AAVM

Juhendaja: Heiki Tammoja, Emeriitprofessor

Tallinn, 2019

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

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

“19” Mai 2019

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

“.....” 201.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”201... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

Autor: Juri Zenin

Lõputöö liik: Magistritöö

Töö pealkiri: Eesti Elektri jaama Talitluse analüüs

Kuupäev: 19.05.2019

77 lk

Ülikool: Tallinna Tehnikaülikool

Teaduskond: Energeetikateaduskond

Instituut: Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

Töö juhendaja(d): Heiki Tammoja

Sisu kirjeldus:

Antud lõputöö peaesmärk on määrata Eesti Elektri jaama energia plokkide optimaalse koormusjaotust, kasutades agregaatide sisend-väljundkarakteristikuid ning võrrelda see reaalsega. Energia Plokkide koormusjaotuse optimeerimiseks oli valitud ekvivalentse karakteristikute meetod, mis põhineb plokkide summaarse karakteristikute ehitamisel suhtelise juurdekasvude võrdsuse printsiibil. Seega optimeerimise protsessi rakendamiseks vaja enne määrata ning modifitseerida agregaatide sisend-väljund karakteristikuid. Töö koosneb mitmest peatükist, kuid üldiselt võttes antud magistritööd saab jagada 6. osaks.

Töö esimeses osas tuuakse teoreetiline ülevaade Soojuselektri jaamast ning selle agregaatidest. Järgmiselt määratakse kõik optimeerimiseks vajalikud karakteristikud. Edaspidi on uuritud plokkide koostise valik ning rakendatakse määratud karakteristikute alusel plokkide vahelise koormusjaotuse optimeerimismeetod. Lõputöö viimases osas tuuakse tulemuste analüüs, kus võrreldakse optimaalset koormusjaotust ning kütusekulu antud koormustel reaalsete Eesti SEJ koormusjaotusega ning summaarse kütusekuluga.

Tulemuste analüüsi osas jõuti järeldusele, et meetod on edukas, ning tuletatud koormusjaotust võib rakendada Eesti Elektri jaamas.

Märksõnad: Energia plokid, sisend-väljundkarakteristikud, koormusjaotuse optimeerimine, kütusekulu, väljund netovõimsus.

ABSTRACT

Author: Juri Zenin

Type of the work: Master Thesis

Title: Analysis of Eesti Power Plant Operation

Date: 03.01.2019

77 pages

University: Tallinn University of Technology

School: School of Engineering

Department: Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics

Supervisor(s) of the thesis: Heiki Tammoja

Abstract:

The aim of this thesis is to determine optimal load sharing between working in parallel energy blocks of Eesti Energia Power Plant and compare it with real one. Load sharing optimization is based on input-output characteristics of Power plant energy units. As load sharing optimization method equivalent characteristics method was chosen, which itself is based on principle of equality of margin consumption characteristics. In order to implement this method every unit characteristics need to be determined at first.

Overall in general this thesis work can be divided by 6 major parts.

The first part is providing us theoretical overview of condensation powerplant, and characteristics of main power plant units. Next part shows us how to determine and modify all the characteristics so that they can be used in following optimization. In the following part unit commitment is identified and calculated optimized load sharing, using characteristics determined previously. In the last chapter optimization results are analyzed and compared to real load values and fuel consumptions in Eesti Energia Power Plant.

As a result, analyzed optimization method is considered to be successful and can be implemented into Eesti Energia Power Plant load sharing process.

Keywords: Load share optimization, input-output characteristics, energy blocks, fuel consumption, output neto power

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema:	Eesti Elektriijaama Talitluse Analüüs
Lõputöö teema inglise keeles:	Analysis of Eesti Power Plant Operation
Üliõpilane:	Juri Zenin, 163641 AAVM
Eriala:	Elektroenergeetika
Lõputöö liik:	magistritöö
Lõputöö juhendaja:	Heiki Tammoja
Lõputöö ülesande kehtivusaeg:	
Lõputöö esitamise tähtaeg:	24.05.2019

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppekava juht (allkiri)

1. Teema põhjendus

Antud lõputööga uuritakse võimalusi optimeerida Eesti Elektriijaama talitluse, Energiaplokkide vahelise koormusjaotuse optimeerimise kaudu. Teema on tänapäeval aktuaalne, sest paljudes soojuselektriijaamades optimaalne koormusjaotus režiim ei ole määratud. Üldjuhul põhjus seisneb selles, et soojuselektriijaamades puuduvad aktuaalsed agregaatide karakteristikud või on need seoses katelde moderniseerimisega või ka kütuste muutumise tõttu mitteusaldusväärsed. Seega koormusjaotuse optimaalse režiimi/plaani puudumisel, Soojuselektriijaamad töötavad ebaefektiivselt ning reostavad rohkem ümbritseva keskkonda, kui optimeeritud talitlusel..

2. Töö eesmärk

Tööpõhieesmärgiks on määrata Eesti Elektriijaamale optimaalne plokkide vaheline koormusjaotus ning analüüsida kasutatud meetodi tulemuse täpsust ning efektiivsust.

3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

- Paralleelselt töötavate energiaplokkide vahelise koormusjaotuse optimeerimine. (Kirjanduse alusel).
- Eesti Elektriijaama energiaplokkide sisend-väljund karakteristikute leidmine.
- Eesti Elektriijaama kooseisu valik väljund võimsuse muutumisel
- Optimaalsete koormusjaotuste arvutamine erinevate koormuste korral.
- Kütusekulu arvutamine etteantud plokkide koormuste korral

- Reaalsete koormusjaotuste ning kütuse kulu võrdlus arvutatud optimaal režiimiga saavutatud omadega
- Eesti põlevkivi erikulu analüüs
- Tulemuste analüüs ja järeldused

4. Lähteandmed

Lähteandemeteks on kasutatud Eesti energia poolt saadud energiablokkide kasuteguri sisend-väljund karakteristikut ning 2017.aasta koormusjaotus statistika. Lähteandmed on edastatud Eesti Energia poolt läbi lõputöö juhendaja (Heiki Tammoja)

5. Uurimismeetodid

Tööeesmärgi jõudmiseks on arvutuste tegemiseks on kasutatud MS office tarkvara Exceli tabelarvutusi ning võrrandite lahendamiseks Exceli alamprogrammi Goal Seek. Arvutuste aluseks on Eesti Elektri jaama plokkide kasuteguri karakteristikud, millest hiljem on avaldatud optimeerimisülesanne vajalikud plokkide sisend-väljund karakteristikud. Optimeerimisarvutused põhinevad kirjanduses toodud meetodikale ning kohandatud vastavalt olemasolevale sisendinfole.

6. Töö struktuur

Lõputöö koosneb järgmistest põhipeatükkidest:

- 1) Eesti Elektri jaam
- 2) Plokkide sisend-väljund karakteristikud
- 3) Plokkide koosseisude valik
- 4) Plokkide vaheline koormusjaotus optimeerimine
- 5) Põlevkivi kulu analüüs
- 6) Tulemuste analüüs

7. Kasutatud kirjanduse allikad

Lõputöö peamised kirjanduse allikad on järgmised:

- Valdma. M., Tammoja. H., Keel. M. "Soojuselektri jaamade Talitluse Optimeerimine", 2008.
- Vuorinen. A. "Planning of Optimal Power Systems", 2007.
- Sinkov. V. M., Bogoslovski. A. V., Grigorenko. V. G., Kalinovski. J. A., Ogorodnikov. A. A., Mozgovaja. E. A., "Energiasüsteemide režiimide optimeerimine", „ Оптимизация Режимов Энергетических Систем“, 1976.

8. Töö etapid ja ajakava

- Kirjanduse ning lähteandmete läbitöötamine (14.01.19)
- Arvutuste teostamine (28.03.19)
- Teoreetilise osa kirjutamine ning uuringu tulemuste kirjeldamine (15.04.19)
- Töö esimene versioon valmis (22.04.19)
- Paranduste sisseviimine (06.05.19)
- Juhendajale läbivaatamiseks (20.05.19)
- Viimased parandused (22.05.19)
- Töö lõplik versioon valmis (23.05.19)

SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE.....	3
ABSTRACT	4
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE	5
EESSÕNA.....	10
SISSEJUHATUS	11
1. EESTI ELEKTRIJAAM	13
1.1. Üldine Ülevaade	13
1.2. Eesti Elektrijaama energiaplokkide ülevaade	16
1.3 Plokkide emissioonid	20
1.3.1 Lämmastiku oksiidide emissioonid.....	20
1.3.2 Tolmu emissioonid	21
1.3.3 Vääveldioksiidi emissioonid	22
2. ELEKRIJAAMA ENERGIAPLOKKIDE SISEND-/VÄLJUND KARAKTERISTIKUD	24
2.1 Energiaploki karakteristikud	25
2.1.1 Ploki kütusekulu karakteristik	25
2.1.2 Ploki kütusekulu suhtelise juurdekasvu karakteristik	26
2.1.3 Ploki kütuse erikulu karakteristik	28
2.1.4 Ploki kasuteguri karakteristik	29
2.2 Karakteristikute aproksimeerimine	30
2.3 Eesti SEJ energiaplokkide karakteristikud.....	31
2.4 Eesti SEJ kütuse kulukarakteristik	33
2.5 Eesti SEJ suhtelise juurdekasvu karakteristikud.....	36
2.6 Plok nr. 8 karakteristikud segakütusel	39
3. EESTI ELEKTRIJAAMA PLOKKIDE KOOSSEISU VALIK.....	42
3.1 Sissejuhatus.....	42

3.1.1 Plokkide käivituskulud	43
3.1.2 Koosseisualiku meetodikat	44
3.1.3 Plokkide erikulukarakteristik.....	45
3.1.4 Plokkide koosseisu valik	47
4. PLOKK-KONDENSATSIOONJAAMADE KORMUSJAOTUS OPTIMEERIMINE	49
4.1 Optimeerimisülesanne püstitus.....	49
4.2 Optimaalsustingimus	50
4.3 Kondensatsioonplokkide koormuste optimeerimise klassikaline reegel.....	50
4.4 Elektrijaama ekvivalentsete karakteristikute lahendusmeetod	51
4.4.1 Plokkide koormuste ning võimsuste arvutamine plokkide võrdsete suhteliste juurdekasvude printsiibil	53
4.4.2 Plokkide koormuste arvutus erinevatel μ väärtustel	56
4.5 Eesti SEJ optimeeritud koormusjaotus	58
4.5.1 Ekvivalentne suhtelise juurdekasvu karakteristik	58
4.6 Koormusjaotuse optimeerimismeetodi kontroll	61
4.6.1 Optimaalse koormusjaotuse režiimi kütusekulu.....	61
4.6.2 Eesti SEJ optimeerimata koormusjaotuse kütusekulu.....	63
5. PÕLEVKIVI ERIKULU ANALÜÜS	65
6. TULEMUSTE ANALÜÜS	70
KOKKUVÕTE	72
SUMMARY	74
KASUTATUD KIRJANDUS	76

EESSÕNA

Antud lõputöö teema oli välja pakutud emeriitprofessori Heiki Tammoja poolt. Algandmed on edastatud lõputöö juhendajale Eesti Energia juhatuse liige energia tootmise valdkonnas Raine Pajo poolt. Kogu algandmete kogumine toimus juhendaja poolt, kellele sooviksin avaldada tänu töökoostamise juhendamise ning abi eest.

SISSEJUHATUS

Kuigi tänapäeval üle maailma taastuenergeetika on enim kasvav valdkond, siiski fossiilkütuste energeetika on ülemaailmsetes energiasüsteemides jätkuvalt ülekaalus. 2016.a. andmetel üle 80% ülemaailmsest energiast on toodud just fossiilkütustelt (kivisöest, maagaasist ja kütteõldest). Fossiilenergia oli tööstusrevolutsiooni põhiline edasiviiv jõud, sellele on järgnenud tehnoloogiline, sotsiaalne, majanduslik ja areng.

Kuid fossiilkütustel on ka negatiivne mõju, kuna see on kohaliku õhusaaste domineeriv allikas ning süsinikdioksiidi (CO₂) ja teiste kasvuhoonegaaside tekitaja. Seepärast peab maailm energiaga seotud rolli ühiskondlikus ja majanduslikus arengus tasakaalustama koos süsinikdioksiidheite vähendamise vajadusega, vähendada sõltuvust fossiilkütustest ja üleminekut vähem CO₂-heiteallikatele.

Suurem osa Eesti energiasüsteemi põlevkivi elektrijaamadest on ehitatud 1970–1980. aastatel, pärast mida on neid vaid osaliselt rekonstrueeritud. Vaatamata sellele, et Eestis on püstitatud suurel hulgal tuulegeneraatoreid ja ehitatud mitmeid uusi, alternatiivsetel kütuseallikatel töötavaid väike-elektrijaamu, ei ole need võimelised täielikult asendama olemasolevaid vananenud elektrijaamu, mis praegu peavad katma Eesti energiavajaduse.

Tänapäeval Eestis toodetakse peaaegu kogu elektrienergia (üle 95%) soojuselektrijaamade abil. Seejuures üle 90% elektrist toodetakse põlevkivist. Kuid soojuselektrijaamade elektri genereerimise kasutegur on alla 40%. Seepärast nad tarbivad palju kütust ja põlemisjäätid (tuhk ja suitsugaasid) saastavad keskkonda. Soojuselektrijaamad on keerukad tehnilised süsteemid. Kui neid hoida optimaalses töörežiimis, siis on võimalik säästa kütust, vähendada gaaside emissioone ja tuha koguseid. Seega probleem on tänapäeval aktuaalne, mitte ainult Eestis vaid ka kogu maailmas. Eestis, kus üle 90% elektrienergiast toodetakse põlevkivi baasil, võimaldaks see säästa põlevkivi ja CO₂ emissioone soojuselektrijaamade talitluse optimeerimise kaudu. [3]

Käesolevas uurimustöös on uuritud võimalusi leida optimaalse koormusjaotuserežiimi Eesti Elektrijaamas. Optimaalse koormusjaotus režiimi leidmine toimub sisend-väljund karakteristikute alusel, millest algandemetena oli antud energiaplokkide kasutegurikarakteristikud.

Eesti Soojuselektrijaam on ettevõttele Eesti Energia kuuluv elektrijaam, mis on üks nii nimetatud Narva Elektrijaamadest, soojuselektrijaam asub Narva lähedal Mustajõel. Eesti elektrijaam töötab alates 1969. aastast ning selle põhikütuseks on põlevkivi. Eesti Elektrijaamas on hetkel 8 energiaplokki, viimane neist on valminud 2005. aastal. Plokis nr.8 - keevkihtplokis on võimalik asendada kuni 20% põlevkivist biokütusega.[3]

Eesti Elektriijaam on Eesti suurim elektriijaam: selle elektriline võimsus on 1355 MW . Ühtlasi on tegu maailma suurima põlevkivielektriijaamaga. Kokku töötab jaamas kaheksa energiablokki, sealhulgas ka 2005. aastal rajatud keskkonnasõbralikul keevkihttehnoloogial kaasaegne energiablokk.[3;4;11]

Arvestades siiani Eesti maksimum tarbimistippu 1587 MW Eesti Elektriijaam teoreetiliselt on suuteline ainuüksi katta tarbimist. Seega arvestades väljund võimsust antud Elektriijaama optimaalne töörežiim on eriti oluline.[4]

Optimaalse töörežiimi üheks peamistest teguritest on optimaalne koormusjaotus energiablokkide vahel. Eesti Elektriijaamal 2018 aasta seisuga on neid 8. Antud lõputöös on kirjeldatud suhtelise juurdekasvu võrdsuse meetodit, mida kasutades on leitud optimaalne koormusjaotus. Lõputöö viimases osas on analüüsitud koormusjaotuse optimeerimismeetodi efektiivsust võrreldes see Eesti Elektriijaama reaalse koormusjaotuse tagajärjega.

Töö põhieesmärgiks on määrata Eesti Elektriijaamale optimaalne plokkide vaheline koormusjaotus ning analüüsida kasutatud meetodi tulemust täpsust ning efektiivsust. Kuna iga koormusjaotuse optimeerimismeetodi aluseks on alati optimeeritavate agregaatide sisend-väljund karakteristikud, siis ka nende määramine kuulub antud magistritöö mahtu.

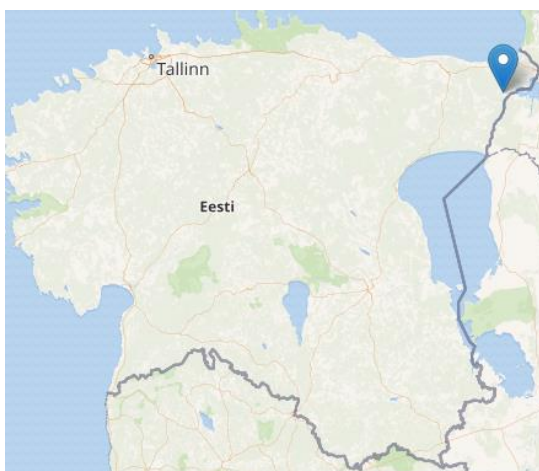
Optimeeritud koormusjaotus peaks lubama Eesti elektriijaamal säästa kulusid, millest põhiline on kütuse ehk põlevikivi kulu. Paralleelselt peaesmärgile on analüüsitud sammuti Eesti põlevikivi kulu statistikat. Vaadeldut on Eesti erikulu kiire muutust viimaste aastate jooksul ning uuritud selle põhjust.

1. EESTI ELEKTRIJAAAM

Antud peatükis on toodud ülevaade Eesti Elektriyaamast, mis on sammuti tuntud lühendatud nime all „Eesti SEJ“. Vaadeldud on just Eesti Soojuselektriyaama kuna järgmistes peatükkides optimeerimisülesanne on lahendatud antud Elektriyaama andmete alusel.

1.1. Üldine Ülevaade

Eesti Elektriyaam on üks Narva Elektriyaamade osa ning kuulub ettevõttele Eesti energia. Antud elektriyaam asub Narva lähedal Mustajõeel (Joonis 1.1)



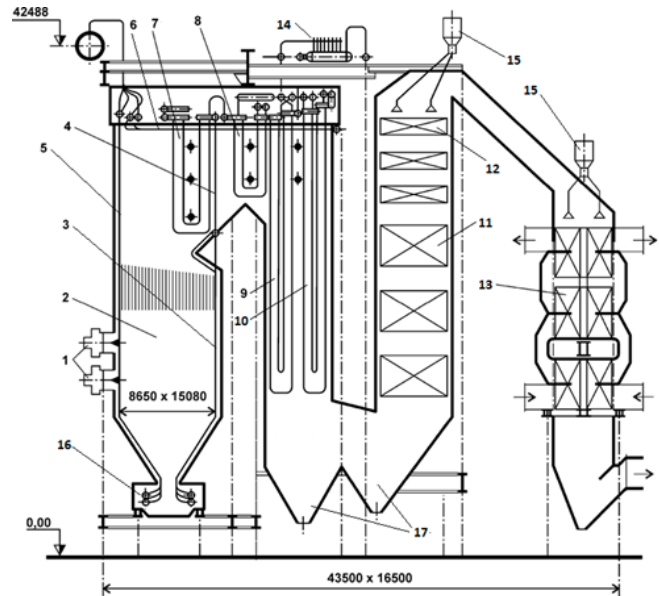
Joonis 1.1.1 Eesti Elektriyaama asukoht

Antud asukohta ei valitud juhuslikult. Kohalikut mõjutasid toorainevarude lähedus, tootmiseks vajaliku vee olemasolu ning piisav kaugus suurematest asustatud punktidest, millel on keskkonnakaitse seisukohalt märgatav tähtsus. [23]



Joonis 1.2 Eesti Elektriyaam 2015 aasta [7]

Eesti Elektriijaam kuulub plok-kondensatsioon jaamade hulka, seetõttu järgmistes peatükkides on vaadeldud koosseisu valiku ning koormusjaotusoptimeerimist just plokide vahel. Eesti Elektriijaama alal on 8 energiaplokki, mille katlaseadmeteks on enamus TP-101 katlad (joonis 1.3.), ning üks energiaplokk, kus kasutuses on Foster Wheeler'i keevkihtkatlad.



Joonis 1.3 TP-101 Katlaseadme pikilõige. [13]

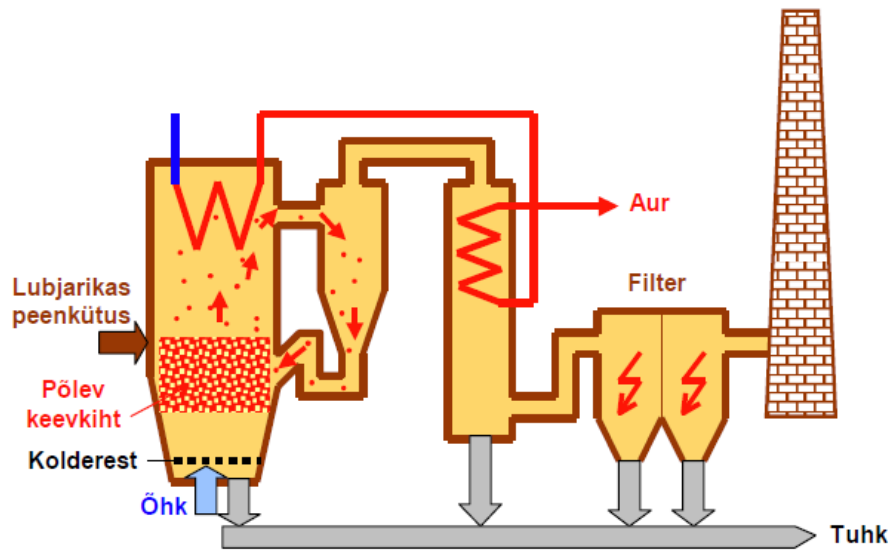
1 – Põletid; 2 – kolde; 3 – koldekraanid; 4 – festoon; 5 – kiirgusülekuumendi; 6 – laeülekuumendi; 7, 8, 9 – kõrgrõhu ülekuumendi širmid; 10 – madala rõhu ülekuumendi širmid; 11 – veeõkonomaiseri širmiosa; 12 – veeõkonomaiseri konvektiivosa; 13 – õhu eelsoojendi; 14 – soojusvaheti; 15 – demonteeritud seadmed; 16 – šlakieemaldajad; 17 – külmad lehtrid. Allikas – [13]

Eesti Elektriijaama esimene energiaplokk võimsusega 200MW käivitati 30.juunil 1969. aastal. Küll aga projekteeritud nimivõimsuse 1600MW saavutas elektriijaam alles neli aastat hiljem ning sai nii Eesti kui ka maailma suurimaks põlevkivielektriijaamaks. [10]

Alates 1969. aastast Eesti Soojuselektriijaama katlad töötasid tolmpõletustehnoloogial. Kuid tänapäevased elektriijaamad on üha suuremad ja võimsamad. Kui algsete elektriijaamade võimsust mõõdeti kilovattides, siis nüüd mõõdetakse tuhandetes megavattides. Suurenenud on ka energeetikas kasutatavate seadmete kasutegurid, mis tähendab, et senisest enam suudetakse muuta kütuses olevat energiat elektriks ja soojuseks.[10]

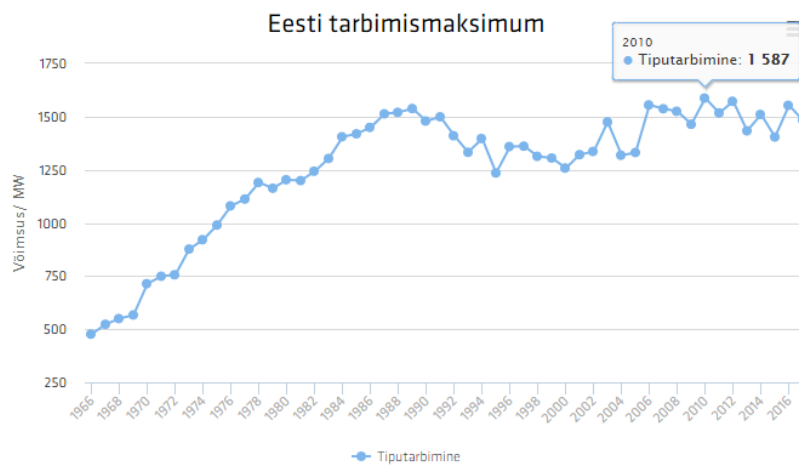
1991.aastal taasiseseisvunud Eesti energeetika keskseks küsimuseks tõusis olemasolevate elektriijaamade kaasajastamise vajadus ja tootmise keskkonnamõju vähendamine. Esimesed põlevkivikatlad olid selleks ajaks on töös olnud üle 40 aasta ning olid füüsiliselt ja moraalselt vananenud. See omakorda tõstas küsimuse põletamis tehnoloogia muutmisest. Nii Eesti Energia tellimisel viidi läbi põhjalikud uuringud, et leida põlevkivi põletamiseks parim tehnoloogia, mille

tulemusena 2001.aastal otsustati rajada Balti ja Eesti elektrijaamale üks keevkihtpõletustehnoloogial (joonis 1.4) baseeruv 215 MW energiablokki.[10]



Joonis 1.4 Tsirkuleeriva keevkihtpõletusega katla põhimõtteline skeem [9]

1969. aastast on tehtud mitmeid ümberehitusi kuid Eesti Elektri jaam on praegugi Eesti olulisim elektritootja ning maailma suurim põlevkivielektri jaam, selle elektriline maksimaalne võimsus on 1615 MW ja soojuslik võimsus on 84 MW. Ning arvestades Eesti kõikide aegade tarbimistippu 1587 MW (joonis 1.5), suudaks ta maksimaalset koormust arvestades ainuüksi tagada meie riigile elektrit.



Joonis 1.5 Eleringi tiputarbimise andmed 2018a. [12]

Eesti elektrijaama maksimaalne elektriline võimsus on küll 1615MW, kuid normaal režiimis elektrigenerereerimis võimsus on 1355 MW, seda on Eesti Elektri jaam edastanud 2015. aastal Eleringi tootmiseseadme aruandele (Tabel 1.6.).

Tabel 1.1 Eesti elektrisüsteemiga ühendatud tootmisseedmed 2015. aastal[11]

Elektrijaam	Installeeritud netovõimsus, MW	Kasutatav tootmisvõimsus, MW
Eesti Elektrijaam	1355	1040
Balti Elektrijaam	322	266
Iru Elektrijaam	173	173
Kiisa avariireservelektrijaam*	250	0
Põhja SEJ	78	78
Lõuna SEJ	7	7
Sillamäe SEJ	16	8
Tallinna elektrijaam	21	21
Tartu elektrijaam	22	22
Pärnu Elektrijaam	20	20
Enefit	11	11
Tööstus- ja väike-koostootmisjaamad	62	50
Hüdroelektrijaamad	8	4
Tuuleelektrijaamad	307	0
Päikeseelektrijaamad	0,7	0
Mikrotootjad	3,7	0
Summa	2656	1700

Eestielektrijaama summaarne netovõimsus on genereeritav, kui kõik 8 ploki on töös. Iga ploki maksimaalne netovõimsus on toodud allpool olevas tabelis (Tabel 1.2).

Tabel 1.2 Eesti SEJ plokkide netovõimsused [12]

Plokk 1	Plokk 2	Plokk 3	Plokk 4	Plokk 5	Plokk 6	Plokk 7	Plokk 8
165 MW	165 MW	165 MW	165 MW	175 MW	175 MW	165	195 MW

1.2. Eesti Elektrijaama energiaplokkide ülevaade

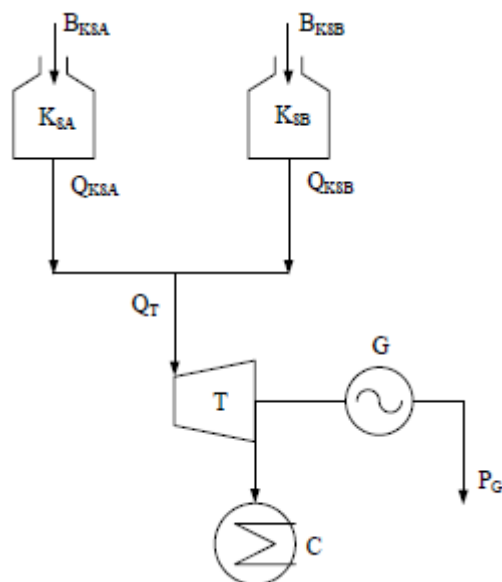
Eesti Elektrijaamas on installeeritud duubelplokid. Duubelplokk võib töötada nii ühekatla, kui ka kahekatla režiimiga. Kuna katlad on identsed, ühe tööoleva katla ploki nimivõimsus on kaks korda väiksem kui kahe katlaga ploki oma. Kuid süsteemis olev aururõhk enne turbiini ühe katlaga on vähem kui kahe töös oleva katlaga aga mitte kahekordselt, vastavalt 10,5 MPa ja 12,7 MPa. Energiaploki töö efektiivsus sõltub nii katla kui ka turbiini töö efektiivsusest. Kahe töötava katla puhul on vaja optimaalselt jaotada katla koormust, et iga katel töötaks võimalikult efektiivselt sõltuvalt koormusest ja saastamisest. [13]

Energiaploki efektiivsuses mängib suurt rolli omatarbe, mida väiksem on omatarbe seda efektiivsem on töö. Omatarbe omakorda jaguneb kaheks, on olemas elektriline ja soojuslik omatarbe. Soojuse omatarbe on auruhulk, mida kasutakse näiteks kondensaatori vaakumi toetamiseks, katlas külmõhu eelsoojendamiseks (enne eelsoojendit), põlevkiviõli pihustamiseks ja

pihusti jahutamiseks, samuti gaasitorustiku ja veskide aurutamiseks. Elektri omatarbe koormus on kõikide ventilaatorite, veskite, pumpade ja muude mehhanismide koormuse summa. Energiaploki koormuse suurenemisega suureneb omatarbe koormus astmeliselt.[13]

Elektrilise omatarbe muutumine on astmeline, sest ettemääratud koormusega, üldiselt energiaploki pool nimivõimsusest, lülitatakse sisse järgmised omatarbe tarbijad: toiteveepump, kondensaatorpump, lisa veski, põlevkivi toituriid. Sammuti sõltuvalt koormusest on töös kas üks või kaks veetsirkulatsioonipumpa.[13]

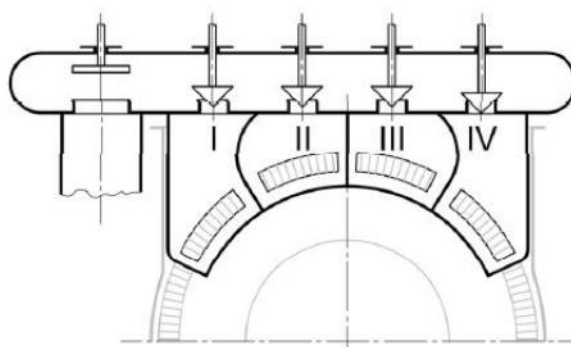
Eesti elektrijaamas on kasutatud nii tolm põletus katlaid TP-101, kui ka keevkihtpõletus ploki (Plokk nr.8). Turbiinide ning generaatorite osas tolm põletus energiaplokkides (1,2,3,4,7) on installeeritud turbiinid K200 - 130 generaatoritega TVV-200, mille nimivõimsused on 200 MW. Energiaplokkides 5 ja 6 on küll kasutatud samad põhi agregaadid, kuid moderniseeritud kujul, mille tagajärjel turbiinide võimsus on suurenenud 10 MW võrra võrreldes moderniseerimata jäänud turbiinidega. Energiaplokkis 8 suurendati turbiini võimsust veelgi ja kooskõlastati uue Foster Wheeleri (CFB) katlaga, kus energiaplokk koosneb kolmesilindrilise K-200-130-6M tüüpi turbiiniga osaliselt moderniseeritud madalrõhusilindriga ja TBB-200-2AM tüüpi moderniseeritud rootoriga generaatorist.. Antud koosseisu illustreerimiseks allpool on toodud Eesti Elektri jaama 8. ploki skemaatiline joonis[23]:



Joonis 1.6 eesti Elektri jaama 8. energiaploki skeem [23]

Skeemil on kasutatud järgmisi tähiseid: K_{8A}, K_{8B} – energiaploki arukatlad; T – turbiin; G – generaator; C – kondensaator; B_{K8A}, B_{K8B} – katla sisend (kütus); Q_{K8A}, Q_{K8B} – katla väljund (aur); Q_T – turbiini sisend (aur); P_G – generaatori väljund (elektriline võimsus).

Energiaplokkide praeguste nimivõimsuste defineeritud väärtused on väiksemad, kui tehase poolt defineeritud nende turbiinide nimivõimsused. Energiaplokkide nr 5 ja 6 nimivõimsusteks on – 195MW; plokkide 1-4 ja 7 nimivõimsused on 185 MW. Renoveeritud turbiiniga 8-nda energiaploki nimivõimsus on 215 MW. Antud tüüpi turbiini võimsust reguleeritakse nii klappreguleerimisega kui ka liikuvreguleerimisega. Reguleerimine on illustreeritud joonisel 1.7.



Joonis 1.7 Klappreguleerimine[13]

Reguleerimisklapid avanevad järjestikku. Neljas klapp jääb normaaltingimustes suletuks. Ta avaneb ainult siis, kui mõni teine klapp on purunenud või aururõhk on nominaalst väiksem.

Turbiinid koosnevad ühest kõrgrõhu silindrist, ühest keskmise rõhuga silindrist ja ühest madala rõhuga silindrist. Peale kõrgrõhu silindrit voolab aur katla auruvahekuumendisse. Peale seda voolab aur keskmise rõhu silindrisse, siis madalrõhu silindrisse ja siis kondensaatorisse. Turbiin omab seitset regeneratiivset vaheltvõtet. Need on ette nähtud kondensaadi ja toitevee soojendamiseks.[13]

Turbiini kasutegurit mõjutavad kõigepealt drosselduskaod. Drosselduskaod sõltuvad sellest, kui suurelt klapp on avatud. Turbiini reguleerimissüsteem juhib reguleerimisklappide avamist ja sulgemist. Regulaarsed turbiinide seiskamised ja käivitamised kulutavad süsteemi ressursi kiiresti. Koormusega muutuvad kaod turbiini kondensaatoris. Mida vähem on koormus, seda suuremad on kaod kondensaatorist jahutusveega.[13]

Vaatamata plokkide erinevatele võimsustele, plokid nr. 1-7 on siiski väga sarnased ehituselt. Seega erinevus tuleb plokkides vaid modifitseerimisest. TP-101 katlad on kõik ehituselt tolmuatlad. Kuid tolmuatlad on erineva veeökonomaiseri skeemiga, ehk veekäigu osad on paigaldatud gaasikäikudes erinevalt. Samuti erinevad ka retrogaasi põletite võimsused. Kuid ainult antud modifitseerimistega Eesti SEJ plokid ei piirdu, ajapikku plokkide on pidevalt modifitseeritud nii üks-, kui ka gruppahaaval. Näiteks neljandas plokkis on installeeritud lämmastikuoksiidide eemaldamise süsteemid. Need on integreeritud katlasse ja seeläbi erinevad nad moderniseerimata jäänud kateldest. [13]

Üldiselt katelde identsusest saab rääkida ainult ideaalselt puhaste katelde kohta. Igal ajahetkel iga katla kasutegur võib tunduvalt erineda teistest. Ka ühe ja sama katla kasutegur võib olla erinev igal ajahetkel.

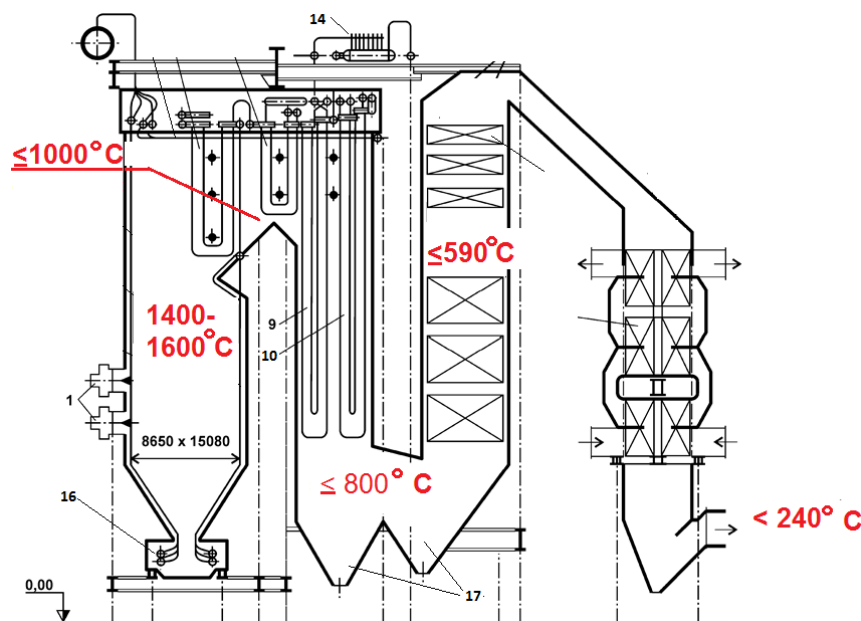
Antud erinevus on tingitud sellest, et katelde kütuseks on kohalik Eesti Põlevkivi, mis on madala kalorisaldusega kütus. Sellel on madal alumine kütteväärtus (8,5–9,0 MJ/kg), selle keskmine niiskus on 8–12% ning selles sisaldub palju karbonaatseid mineraale. Samuti on Eesti põlevkivi eripäraks madal soojusjuhtivus (2000 kcal/kg) ja väga kõrge tuhasus (43–45%).[22]

Seega reaalelus on tolmukatelde eripära see, et need katlad saastuvad kiiresti tuhaga. Katla saastumine põlevkivipõletamisel mängib väga suurt rolli, sest eraldatud tuhk mõjutab kogu katla süsteemi.

Šlakk ladestub kolde aurustustorude pinnale, moodustades jämeda kihi. Auruülekuumendi vertikaalitorudes sadestub tuhk. Temperatuuri ja niiskuse koosmõjul toimub sulfatsioon ja moodustab seal kipsikihi. Veeökonomaiserit torud on horisontaalsed. Seal ei ole temperatuur nii suur, et toimuks keemiline reaktsioon, aga tuhk võib kuhjuda sinna suures hulgas, ja niiskuse puhul ka kivistuda. [13]

Selleks, et vältida kipsikihi tekkimist veetorustikes kasutatakse järgmiseid meetmeid. Koldes paakunud šlakk eemaldatakse veepuhumisega. Veejuga satub hõõgkuuma šlakikihi pinnale, hetkeliselt aurutab plahvusega, toimub nii nimetatud termošokk, ja šlakkikiht puruneb. Veepuhumine korraldatakse kolm korda ööpäevas ja iga katla kustutamisel. Auruülekuumendi pinnad puhastatakse sise-seinade raputusega ja veepuhumisega. Raputus korraldatakse vajaduse korral mitte harvem kui kord kahe tunni jooksul. Veepuhumist teostatakse iga katla kustumisel, kui katel on töötanud vähemalt 5 päeva. Veeökonomaiserit puhastatakse ka raputusega üks kord tunnis. Raputus on antud juhulennetav meetod, sest kuhjunud tuhka eemaldada ei saa. [13]

Tuhakihi eemaldamine on oluline osa katla süsteemis, kuna kogunev tuhakiht vähendab soojusülekanne leegist ja heitgaasidest veele ja aurule. Saastunud katlas saavad vesi ja aur ühe ja sama kütuse kuluga vähem soojust võrreldes puhta katlaga.



Joonis 1.8 Maksimaalselt lubatud aurutemperatuurid katla gaasikäikudes. [13]

Ökonoomse talitluse eesmärgiks on ettenähtud nn. katla režiimikaart, kus on arvestatud katla seadme maksimaallubatud väärtustega. Näiteks temperatuuride jälgimine pöördkambris, mis ei tohi ületada 1000°C - see on seotud põlevkivešlakki omadusega. Enne veeökonomaiseri gaasikäiku ei tohi temperatuur olla rohkem rohkem kui 800°C, enne konvektiiv osa mitte rohkem kui 590 °C – viimased nõuded tulevad katla konstruktsioonilistest omadustest. Katla väljundis gaasid ei tohi olla kuumemad kui 240°C. [15]

1.3 Plokkide emissioonid

Põlevkivi soojuselektrijaamadel on suur õhureostus, seega iga soojuselektrijaamas on kasutuses erinevad emissioonide vähendamise seadmeid. Kõige olulisemateks näitajateks, mida tuleks minimeerida on kütusekulu ja CO₂, SO₂, NO_x emissioonid ning lendtuha kogused

1.3.1 Lämmastiku oksiidide emissioonid

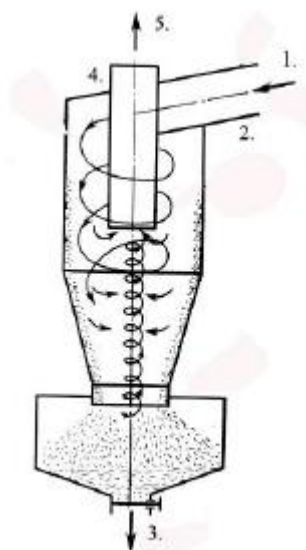
Keevkihiga katlad nagu katel nr. 8 toodavad 140-160 mg/Nm³ lämmastiku oksiide, mis on 1,3-1,9 korda vähem võrreldes tolmkateldega, mis toodavad tavaliselt 220-270 mg/Nm³[13]. Rahuldav väärtus on 200 mg/Nm³, mida võib saavutada lämmastikudioksiide eemaldamise (DeNO_x) süsteemiga. Eesti Energia elektrijaamadel on lubatud lämmastiku oksiidi heidiste maht 14000 tonni aastas. Kontsentratsiooni väärtus 200 mg/Nm³ on arvatud lähtudes selle lubatud mahust ja aasta keskmisest gaasimahust kateldes.[13]

Süsteem ei eemalda põlemisproduktidest lämmastikuoksiide, vaid pigem väldib nende tekitamist seal. Lämmastik asub õhus ja mida väiksem on lõkke temperatuur ja õhuhulk, seda vähem on

lämmastikuoksiide põlemisproduktides. DeNOx süsteem on õhutorustike ja düüside süsteem, mis on paigaldatud olemasolevate õhukanalide kõrvale.[13]

1.3.2 Tolmu emissioonid

Suitsugaasi puhastamise esimene etapp on selle puhastamine tuhatsüklonites, mis on paigaldatud otse põlemiskambri järel. Tuhatsüklon on seade, mida kasutatakse gaasi puhastamiseks raskematest tuha lendosakekestest (Joonis 1.9.).

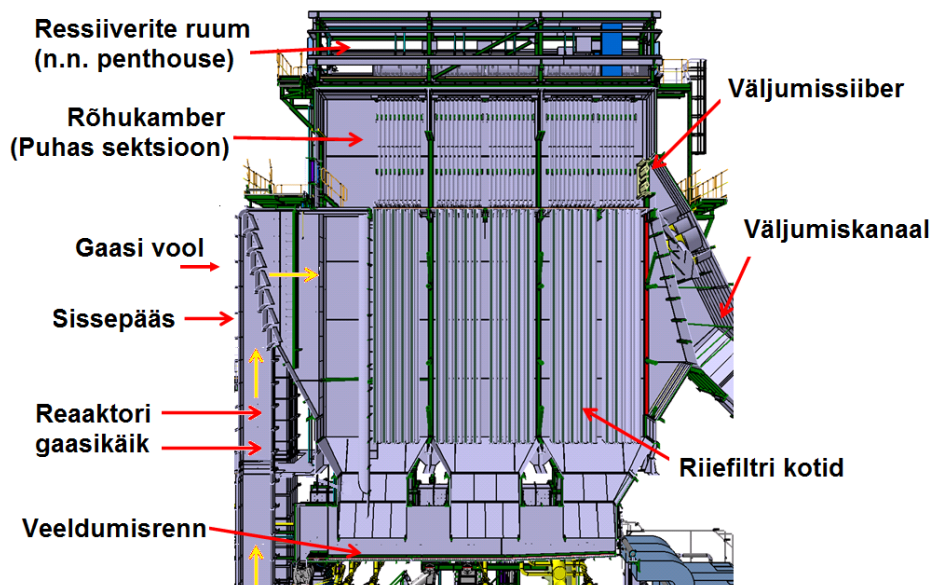


Joonis 1.9 Tuhatsükloni tööõhimiteline skeem [23]

Tsükloni tööõhimitõte on järgmine. Puhastamist vajava gaasi voog (1) tuleb seadmesse selle ülaosas asuva sisendtoru kaudu (2). Tsüklonis tekib õhupööris, mis on suunatud alla, koonusekujulisse ossa. Intertsi ehk tsentrifugaaljõu mõjul hakkavad tuhaosakesed õhuvoolust välja liikuma ja ladestuvad tsükloni seintele. Seejärel pudenevad need maha ja satuvad seadme allossa (3.), kust tuhka suunatakse lehtrite abil tuhapunkrisse. Tuhast puhastatud gaas (5.) juhitakse seadme ülaosas asuva väljalasketoru (4.) kaudu välja.[23]

Järgmine suitsugaasi lendtuhast puhastamise etapp on elektrifilter. Tsirkuleeriva keevkihi põletamise tehnoloogia ei tekita palju tolmtuha heidist. Kuid ka Foster Wheeleri CFB katlad on varustanud nelja väljaga elektrifiltriga. Nende katlade heitmed ei ületa 30 mg/Nm³ [13]. Kateledes TP-101 on kolmeväljalised ABB elektrifiltrid, mis on paigaldatud energiablokkides 1, 2, ja 7. Elektrifiltrite tööprintsip põhineb kahel elektroodi tüübil - koroneeriv ja sadesti elektroodi töö, mille vahel on suur alalispinge, antud pinge varieerub 50-100kV. Vaatamata suurele pingele, elektrifiltrite efektiivsus sõltub suuresti just heitgaasi kiirusest. Kui kiirus on väike, siis filtrid suudavad paremini eemaldada tuha. [13;23]

Plokid 3-6 on varustatud vääveldioksiidi eemaldamise seadmega NID (novel integrated desulphurization). Väävli eemaldamissüsteemiga koos on elektrifiltrite asemele kambrisse monteeritud riidefiltrid. Iga katla kohta on 4 NID seadet, iga ploki kohta 8 seadet. Igal NID-liinil on 1128 filtrit, mis on sammuti illustreeritud joonisel 1.10. [13]



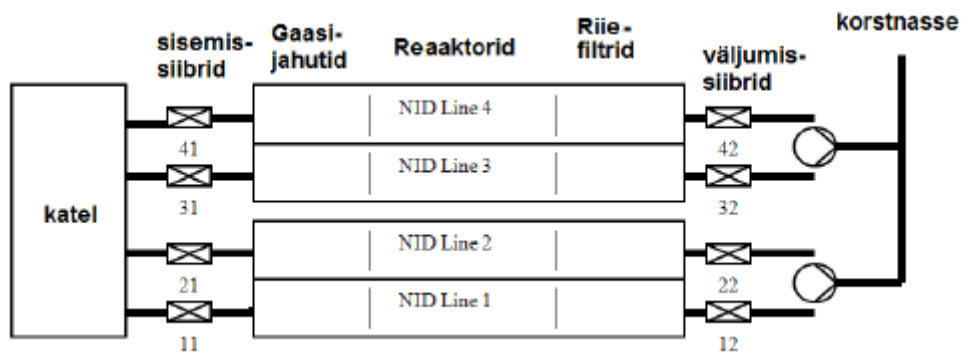
Joonis 1.10 Riiefiltri tolmu puhastussüsteem [13]

Filtrid (joonis 9) on tehtud 2-3 mm paksusest erinevate omadusega kiudmaterjalist. Filter on 9 m pikkune ja suure koti kujuline, mis on paigutatud metalltraadist karkassile. Filter töötab nagu tolmuimeja kottfilter. Suur filtrite hulk ja suured mõõtmed tähendavad suurt filtreerimise pindala. Enne filtrikambrit võib tolmu kontsentratsioon õhus olla 1-2 kg/Nm³[15].

Tolm sadestub varruka välispinnasele. Varruka sisse on paigaldatud suruõhu torustik. Klapid rakenduvad perioodiliselt ja varrukasse antakse suruõhu impulss. See võimaldab eemaldada varruka välispinnast tolmuhihi. Suruõhu klapid ja *ressiiverid* asuvad nn. *penthouses*. Tolmu osakesed kukuvad veeldumisrennile. Renni all olev veeldumisõhk võimaldab tolmuhihile anda vedeliku omaduse. Edaspidi tuhatolm satub segistidosaatorile, kust jäägid eemaldatakse tuha eemaldamise hüdro süsteemiga seetis. [13]

1.3.3 Vääveldioksiidi emissioonid

Keevkiht-katlad toodavad tunduvalt vähem vääveldioksiidi, siis nende kasutamine on eelistatud. TP-101 katlad toodavad tunduvalt rohkem vääveldioksiidi emissioonide seisukohalt. Seega vääveldioksiidi emissioonide vähendamiseks 4s plokkid on varustatud NID süsteemiga. Keevkiht-katlad toodavad tunduvalt vähem vääveldioksiidi, siis nende kasutamine on eelistatud. TP-101 katlad toodavad tunduvalt rohkem vääveldioksiidi emissioonide seisukohalt. Seega vääveldioksiidi emissioonide vähendamiseks 4 ploki on varustatud NID süsteemiga (joonis 1.11)



Joonis 1.11 Väavli eemaldamise skeem ühe katla kohta[13]

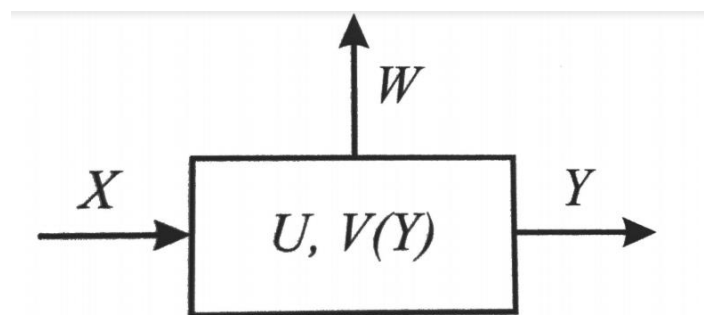
NID-liinide kaupa mõõdetakse heitgaaside vooluhulka, need summeeritakse ja arvutakse vooluhulk iga katla kohta. Gaasi vooluhulk mõjub väaveldioksiidi eemaldamise tulemusele ja üleüldisele süsteemi tööle. Iga NID-liini võib välja lülitada sisemis- ja väljumis siibritega. Eeltoodud riidefiltrikamber on NID-liini lahutamatu osa. Lisaks on igal liinil gaasijahuti ja reaktor. Gaasijahuti reaktorid moodustavad U-kujulise ristküliku kujulise läbilõikega torustiku. Gaasijahutisse on paigaldatud veedüüsid, mille kaudu vajaduse korral pihustakse süsteemi tehnilist vett. Veepihustamine võimaldab vajaduse korral rohkem jahutada heitgaase. Normaalsrežiimis pihustatakse vett segistisse ja jahutamine toimub reaktori segamistsoonis. Et eemaldada väaveldioksiidi peab sõltuvalt koormusest olema heitgaaside temperatuur 70-85°C. Selleks et kaitsta varrukafiltreid põletamise eest, ei tohi heitgaaside temperatuur normtingimusel olla suurem kui 180°C. [13]

2. ELEKRIJAAMA ENERGIAPLOKKIDE SISEND-/VÄLJUND

KARAKTERISTIKUD

Soojuselektrijaama talitluse optimeerimisel on põhiliseks alginformatsiooniks agregaatide (aurukatelde, auru- ja gaasiturbiinide või turbiingeneraatorite) või energiablokkide sisend-väljundkarakteristikud. Samuti on oluline teada nende omatarbe ja keskkonnamõjude karakteristikuid ehk sõltuvusi. [6]

Üldkujul võib elektrijaama agregaati või energiablokki kirjeldada süsteemina, millel on sisendid, väljundid, olekuparameetrid ja keskkonnamõjud (joonis 2.1).[6]



Joonis 2.1 Agregaaadi põhimõtteline süsteemne mudel [6]

Selle süsteemi staatiliste mudelitena vaatleme järgmisi karakteristikuid ehk funktsioone :

- sisend-väljundkarakteristikud

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

- keskkonnamõjude karakteristikud

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

- omatarbe karakteristikud

$$P^{OT} = P^{OT}[Y, U, V(Y)] = P_{U,V(Y)}^{OT}(Y) \quad (2.3)$$

kus

X – sisendite vektor

Y – väljundite vektor

U – olekuparameetrite vektor

V(Y) – väljundist sõltuvate olekuparameetrite vektor.[6]

Valemities (2.1) – (2.3) on kõiki muutujaid ja parameetreid vaadeldud maatriksvektoritena, sest agregaadil võib olla palju sisendeid ja väljundeid. Kuid konkreetsete ülesannete puhul vaadeldakse agregaatide karakteristikuid sageli ühe muutuja funktsioonidena.

Agregaadi sisend-väljundkarakteristikuteks nimetatakse agregaadi sisendi sõltuvust agregaadi väljundist ja selle sõltuvuse modifikatsioone. [6]

Agregaadi põhiliseks sisend-väljundkarakteristikuteks on :

- sisendi kulukarakteristik

$$X = G(Y) \quad (2.4) [6]$$

- sisendi suhtelise juurdekasvu ehk marginaalkulu karakteristik

$$X(Y) = \frac{\partial X}{\partial Y} = \frac{\partial G(Y)}{\partial Y} \quad (2.5) [6]$$

- sisendi erikulu karakteristik

$$\delta(Y) = \frac{G(Y)}{Y} \quad (2.6) [6]$$

- kasuteguri karakteristik

$$\eta(Y) = \frac{Y}{G(Y)} \quad (2.7) [6]$$

Valemid (2.1) - (2.7) on põhimõttelised määratlused. Need valemid on õiged siis, kui agregaadi sisendit ja väljundit mõõdetakse samades ühikutes, näiteks megavattides. Kui agregaadi sisendit ja väljundit mõõdetakse erinevates ühikutes, siis tuleb nimetatud valemistesse viia sisse mõõtühikuid arvestavad kordajad.[6]

Järgmiselt vaatleme täpsemalt energiaploki karakteristikuid, kuna edaspidi määratase Eesti Elektriijaama energiaplokkide optimaalse koormusjaotus režiimi just kindla energiaplokkide karakteristikute alusel.

2.1 Energiaploki karakteristikud

Energiaploki sisendiks on kütus ja väljundiks elektriline võimsus ehk generaatori koormus. Ploki kütusekulu jt karakteristikud kujutavad endast liitfunktsioone. Defineerime energiaploki karakteristikud.[6]

2.1.1 Ploki kütusekulu karakteristik

Energiaploki kütusekulu karakteristikuks nimetatakse ploki kütusekulu sõltuvust ühes ajaühikus ploki generaatori koormusest:

$$B_P = B_P(P_P) = B_K(Q_T(P_P)) \quad (3.8) [6]$$

Kus

B_P - ploki kütusekulu ajaühikus

P_P - ploki aktiivkoormus ehk väljundvõimsus

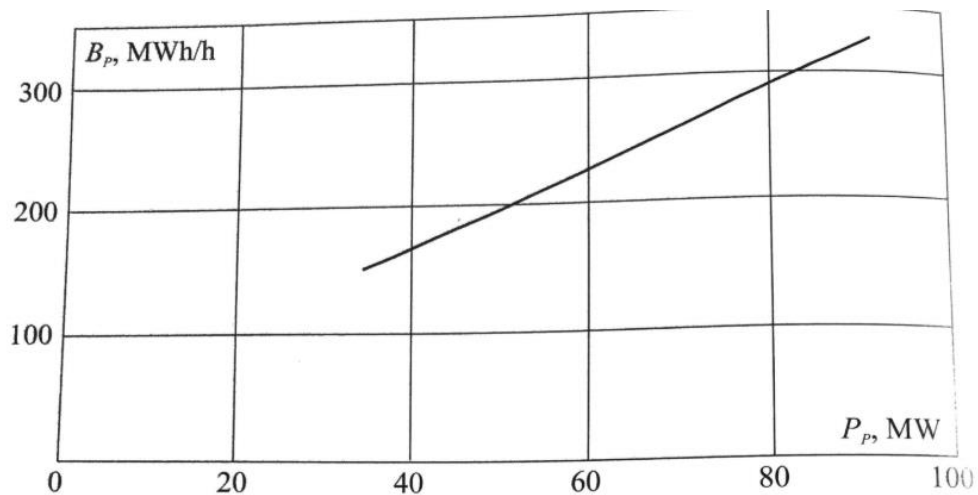
$B_P(P_P)$ - ploki kütusekulu karakteristik

$B_K(Q_T)$ - ploki katla kütusekulu karakteristik

$Q_T(P_P)$ - ploki turbiingeneraatori kulukarakteristik.

Ploki kütusekulu karakteristik on liitfunktsioon: kütusekulu sõltub turbiini soojustarbest ja viimane sõltub ploki aktiivkoormusest. Ploki kütusekulu karakteristiku määravad kindlaks ploki katla ja turbiingeneraatori kulukarakteristikud. [6]

Ploki teoreetiline kütusekulu karakteristik on tood alloleval joonisel (joonis 2.1.1)



Joonis 2.1 Ploki teoreetiline kütusekulukarakteristik [6]

Nagu näha teoorias ploki kütusekulu karakteristikud on üldjuhul lineaarsed ehk ploki katla kütusekulu on lineaarses sõltuvuses generaatori väljund koormusest. Kulukarakteristiku põhiliseks näitajateks on ploki minimaalne ja maksimaalne koormus ning Funktsiooni tõusu kordaja. Järgmises alapunktis vaatame täpsemalt ploki kütusekulu suhtelise juurdekasvu karakteristikut, sest just suhteline juurdekasv määrab ära kütusekulu funktsiooni tõusu.

2.1.2 Ploki kütusekulu suhtelise juurdekasvu karakteristik

Ploki kütusekulu tuletist aktiivkoormuse järgi nimetatakse ploki kütusekulu suhteliseks juurdekasvuks.

$$b_P = \frac{\partial B_P}{\partial P_P} \approx \frac{\Delta B_P}{\Delta P_P} \quad (2.9) [6]$$

Suurus b_P näitab, kui palju suureneb ploki kütusekulu, kui ploki aktiivkoormust suurendada ühe ühiku võrra.

Võttes kütusekulust kui liitfunktsioonist tuletise, saame

$$b_P(P_P) = \frac{\partial B_K(Q_T(P_P))}{\partial Q_T} \cdot \frac{\partial Q_T(P_P)}{\partial P_P} = b_K(Q_T(P_P)) \cdot q_T(P_P) \quad (2.10) [6]$$

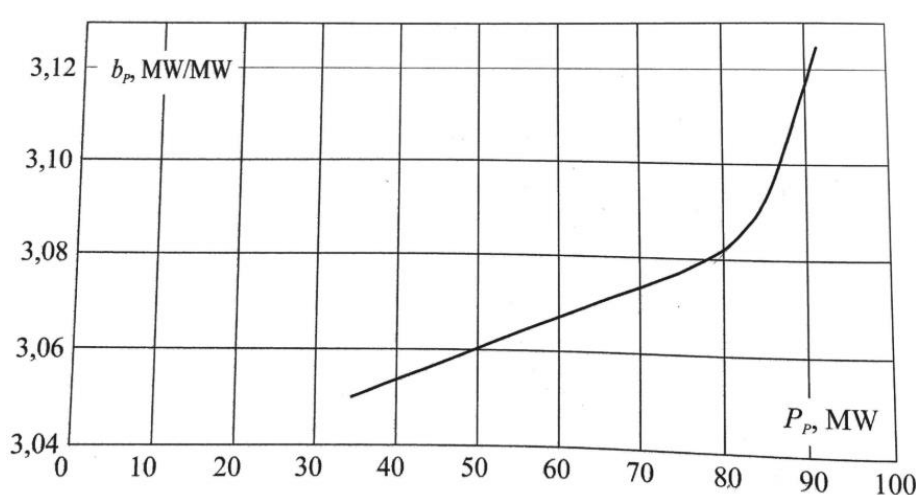
Kus

$b_K(Q_T)$ – katla kütusekulu suhtelise juurdekavu karakteristik

$q_T(P_P)$ – turbiingeneraatori suhtelise juurdekasvu karakteristik.

Seega energiaploki võrdub kütusekulu suhteline juurdekasv katla kütusekulu suhtelise juurdekasvu ja turbiingeneraatori sisendsoojuse suhtelise juurdekasvu korrutisega kohal P_P . Ploki kütusekulu suhtelise juurdekasvu karakteristik on rangelt kasvav funktsioon, mis omab astmeid nendes punktides, kus funktsioonil $q_T(P_P)$ on astmed.[6]

Ploki teoreetiline kütusekulu suhtelise juurdekasvu ehk marginaalkulu karakteristik on toodud joonisel 2.1.2



Joonis 2.2 Ploki teoreetiline marginaalkulu karakteristik

Nagu näeme marginaalkulu funktsioon teoorias on, sarnaselt kütusekulu funktsioonile, rangelt kasvav, kuid enam ei ole lineaarne vaid allapoole kumer ning lähenedes ploki maksimaal koormusele funktsiooni tõus läheb aina järsemaks.

2.1.3 Ploki kütuse erikulu karakteristik

Ploki kütuse erikulu δ_P näitab kütuse keskmist kulu ühe generaatori koormuse ühiku kohta.

Tuletame valemi ploki kütuse erikulu määramise kohta:

$$\delta_P(P_P) = \frac{B_P(P_P)}{P_P} = \frac{B_K(Q_T(P_P))}{Q_T} \cdot \frac{Q_T(P_P)}{P_P} = \delta_K(Q_T(P_P)) \cdot \delta_T(P_P) \quad (3.11)[6]$$

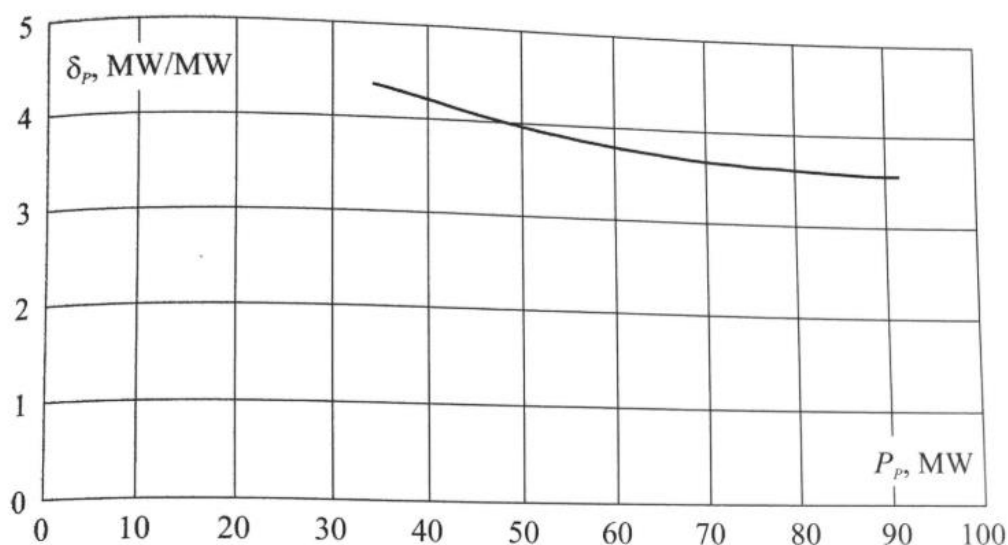
Kus

$\delta_K(Q_T)$ – katla kütuse erikulu kui generaatori koormus on P_G

$\delta_T(P_P)$ – turbiingeneraatori soojuse erikulu, kui generaatori koormus on P_P .

Energiaploki kütuse erikulu karakteristik võrdub katla kütuse erikulu ja turbiingeneraatori soojuse erikulu karakteristikute korrutisega kohal P_P . [6]

Ploki teoreetiline kütuse erikulu karakteristik on toodud joonisel 2.1.3



Joonis 2.3 Ploki teoreetiline erikulu karakteristik

Nagu näha erinevalt eelmistest funktsioonidest erikulu graafik ei ole enam rangelt kasvav ega lineaarne. Teoorias graafik peaks olema vastupidi rangelt langev, kuna tulenevalt tahkekütuseid põletatavaid kateldest ning turbiingeneraatori füüsilistest omadustest, suuremal koormusel antud agregaadid töötavad efektiivsemalt, seega ka erikulu koormuse kasvamisel langeb kindlatel koormuse väärtustel.

2.1.4 Ploki kasuteguri karakteristik

Ploki kasuteguriks nimetatakse ploki väljundvõimsuse (väljundenergia) suhet plokki sisenevasse võimsusesse (energiasse):

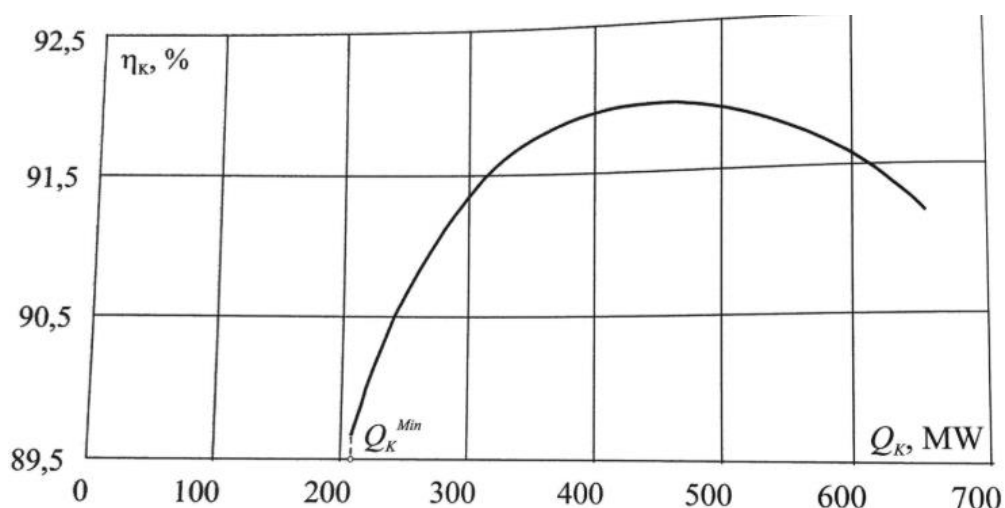
$$\eta_p(P_p) = \frac{P_p}{B_p(Q_T(P_p))} \quad (3.11)[6]$$

Vaadeldes ploki kütusekulu kui liitfunktsiooni, saame

$$\eta_p(P_p) = \frac{P_p}{B_p(Q_T(P_p))} = \frac{Q_T(P_p)}{B_K(Q_T(P_p))} \cdot \frac{P_p}{Q_T(P_p)} = \eta_K(Q_T(P_p)) \cdot \eta_T(P_p) \quad (3.12) [6]$$

Seega võib ka ploki kasuteguri karakteristik leida katla ja turbiini kasuteguri karakteristikute korrutamise teel.

Ploki kasuteguri karakteristik teoorias on sarnane katelde kasuteguri karakteristikutega, seega allpool on toodud katla kasuteguri karakteristik joonis 2.1.4.[6]



Joonis 2.4 Katla kasuteguri karakteristik

Ploki kasuteguri karakteristik on küll sarnane katla kasuteguri karakteristikuga, kuid kasuteguri ühikud on palju madalamad üldjuhul põlevkivi põletatavate ploki kasutegur on 20 – 40%, samal ajal katlal võib see tõusta 95%-ni. Kasuteguri langus on põhjustatud suurtes kadudes, mis tekkivad soojusenergia (ülekuumendatud auru) töötlemisel elektrienergiaks (MW). Sammuti funktsioon suurte koormustel ei lange nii järsult alla, kuna turbiinigeneraatori karakteristik silub selle ära. Aga peamine sarnasus seisneb selles, et graafikul on madalatel koormustel on järsk tõus ning vaadates kogu karakteristikühe kõvera, siis ta on rangelt kumer ülesse ning omab ainult ühte ekstreemumi. Seega ploki on ainult üks koormuse väärtus, kus ta on kõige efektiivsem.

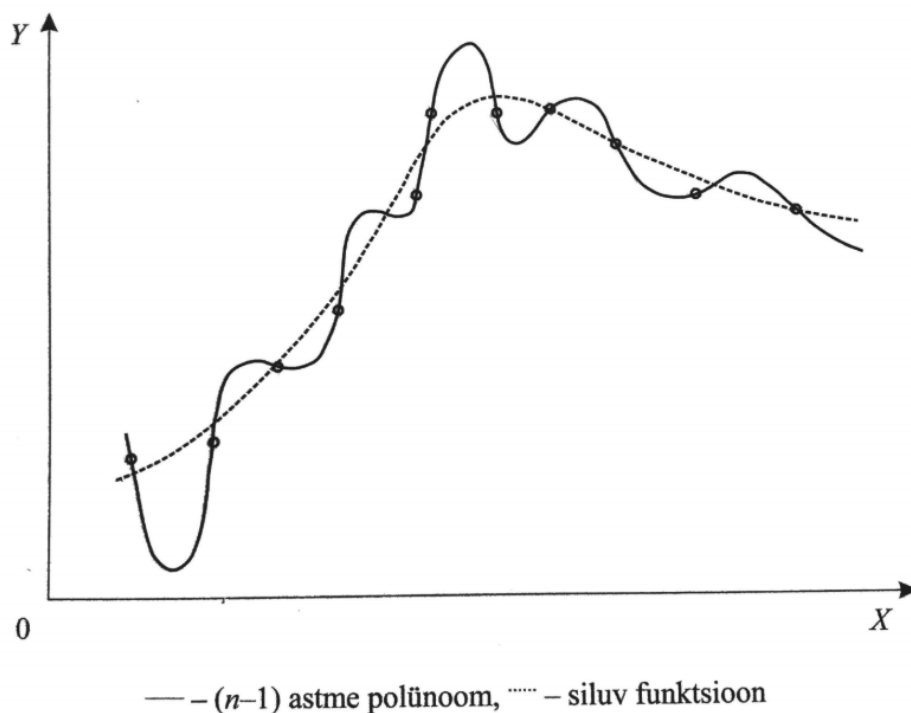
Kuna praktikas karakteristikud üldiselt ei ole nii ideaalsed, kui teoorias, põhjustatud muutlikest keskkonna teguritest ning mõõtevigadest, tuleb neid lihtsustada või nn. siluda. Karakteristikute silumine kutsutakse sammuti aproksimeerimiseks millest on täpsemalt räägitud järgmises peatükis.

2.2 Karakteristikute aproksimeerimine

Enne loetletud karakteristikutest, koormusjaotuse optimeerimise määramisel kasutatakse kütuse kulu ja marginaalkulu karakteristikuid. Nendest kulukarakteristikut määratakse katsetuste meetodil ning kütuse suhtelise juurdekasvu funktsiooni saavutatakse diferentseerimise käigus. Tuleb tõdeda, et katsetus meetodil saadud katseandmed sisaldavad mõõtmisvigu, agregaatide üldise ebastabiilsuse tõttu. Ebastabiilsuse suurimad mõjutegurid, eriti tahkekütuseid põletatavad elektrijaamad, on vältimatud mõõtevead ning kütuse kvaliteedi muutmine. Eelmainitud põhjuste tõttu enne diferentseerimist on vaja siluda katsete tulemusi, seega vaja koostada saadud punktide põhjal siledaid kõveraid. [6]

Katseandmete aproksimeerimine ning silumine toimub järgmiselt.

Oletame, et katse tulemuste käigus on saadud n arv katsepunkti. Läbi n katsepunkti koordinaatidega (x_i, y_i) saab tõmmata $(n-1)$ astme polünoom joone, mis läbib kõik katsepunkte, saavutades esimese funktsiooni (joonis 18). Kuid sellisel aproksimeerimisel puudub siluv efekt. Selleks, et aproksimeerimine siluks katsetulemuste juhuslikke vigu, peab aproksimeeriva funktsiooni aste olema väiksem kui $n-1$. [6]



Joonis 2.5 Katsetulemused ja nende silumine

Uurimised on näidanud, et üldjuhul agregaatide karakteristikute aproksimeerimiseks sobivad 2-4 astme polünoomid. [6]

Allikates on toodud matemaatilised lahendused funktsioonide aproksimeerimiseks ja silumiseks. Kuid antud uurimus töös on kasutatud tänapäeval rohkem levinud lahendust, Silumine MS Office Excel programmiga. Tööpõhimõte on väga sarnane kuid pigem graafiline, kuna Excel võtab uue funktsiooni arvutust enda peale, kus uurija ülesandeks jääb valida parima astme polünoomi nii, et silumis funktsioon oleks maksimaalselt lähedane teoreetilisele. Seega meetod seisneb selles, et siluvat funktsiooni $f(x)$, mis on antud selle katsetulemuste käigus tabeli kujul ning hiljem graafiliselt, asendatakse teise funktsiooniga $\varphi(x)$, mis on avaldatud analüütiliselt (2-4 astme polünoomiga) Exceli abil.

2.3 Eesti SEJ energiablokkide karakteristikud

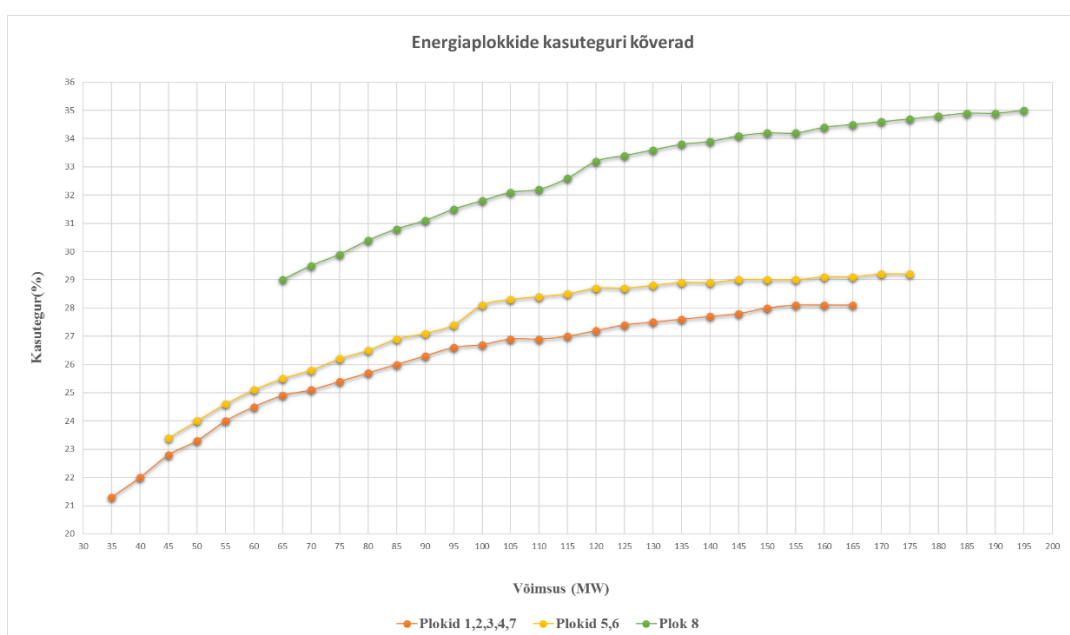
Siin peatükis määratakse Eesti Elektri jaama energiablokkide karakteristikuid toetudes enne toodud teooriale. Eesti Elektri jaamas on kokku 8 energiablokki mille normaalrežiimis summaarne koormus on küll 1355 MW, kuid summaarne elektriline võimsus maksimaalkoormusel on 1615 MW. Järgmistes peatükkides vaatame just normaalrežiimi summaarset koormust ehk 1355 MW, mis Eesti elektri jaam 2016. aastal edastas Eleringile tootmispiisavuse aruanne koostamiseks.

Eelmises peatükis saime teada kuidas toimub energiablokkide määramine. Teoetiliselt esiteks katsetulemuste alusel määratakse energiablokkide kütuse kulukarakteristikud. Katsetulemus töö

kulukarakteristiku katsepunktide saavutamiseks ei kuulu antud uurimustöö mahtu, kuna nõuab suhteliselt suuri investeeringuid ning ressursi, vaid on uuritud energiaplokkide vahelise koormusjaotuse optimeerimist olemasoleva andmete alusel.

Eesti Elektriijaama poolt saadud on energiaplokkide kasuteguri karakteristikud, seega kulukarakteristikute asemel kasutame kasuteguri karakteristikuid algpunktiks.

Saadud reaalseste kasuteguri karakteristikutelt tuli välja, et vaatamata sellele, et Eesti elektriijaamas on 8 plokki neid saab koondada 3 erinevaks karakteristikuteks, kuna mitmed neist on ühesuguse kasuteguri karakteristikuga. Seda näeme ka all olevates tabelis (Tabel 2.3.1) ja graafikus (joonis 2.3.1).



Joonis 2.6 Eesti Elektriijaama energiaplokkide kasuteguri karakteristikud

Kasuteguri karakteristikult on näha funktsiooni, et 8 ploki koonduvad kolmeks erinevaks funktsiooniks järgnevalt:

- punane funktsioon – Plokid nr. 1,2,3,4,7
- kollane funktsioon – Plokid nr. 5,6
- roheline funktsioon – Plok nr. 8

Analüüsid antud karakteristikuid näeme, iga funktsioonil on erinev minimaalne koormus ning töövahemik:

- Plokid nr. 1,2,3,4,7 (punane funktsioon) – Pp = 35 – 165 MW
- Plokid nr. 5,6 (kollane funktsioon) – Pp = 45 – 170 MW
- Plok nr. 8 (roheline funktsioon) – Pp = 65 – 195 MW

Vaatamata plokkide erinevate miinimum ja maksimum koormustele, plokkide reguleerimisvahemikud on samad 130 MW.

Järgmistes peatükkides kasutegurite funktsioonidest määrame kulu-, erikulu- ja suhtelise juurdekasvu karakteristikuid matemaatiliselt. Selleks, et arvutusi oleks võimalik teha peame saama antud väärtused tabelikujul. Kasuteguri funktsioonide katsepunktid ning nendele vastavad (x_i, y_i) koordinaatide leidmiseks on valitud x-telje ehk plokkide koormuse sammuks 5 MW ning saadud tulemused on kantud all olevasse ühise tabelisse (Tabel 2.3.1).

Tabel 2.1 Eesti Elektriijaam kasuteguri andmed

Plokid 1,2,3,4,7		Plokid 5,6		Plok 8	
MW	$\eta(P)$	MW	$\eta(P)$	MW	$\eta(P)$
	%		%		%
35	21,3	45	23,4	65	29
40	22	50	24	70	29,5
45	22,8	55	24,6	75	29,9
50	23,3	60	25,1	80	30,4
55	24	65	25,5	85	30,8
60	24,5	70	25,8	90	31,1
65	24,9	75	26,2	95	31,5
70	25,1	80	26,5	100	31,8
75	25,4	85	26,9	105	32,1
80	25,7	90	27,1	110	32,2
85	26	95	27,4	115	32,6
90	26,3	100	28,1	120	33,2
95	26,6	105	28,3	125	33,4
100	26,7	110	28,4	130	33,6
105	26,9	115	28,5	135	33,8
110	26,9	120	28,7	140	33,9
115	27	125	28,7	145	34,1
120	27,2	130	28,8	150	34,2
125	27,4	135	28,9	155	34,2
130	27,5	140	28,9	160	34,4
135	27,6	145	29	165	34,5
140	27,7	150	29	170	34,6
145	27,8	155	29	175	34,7
150	28	160	29,1	180	34,8
155	28,1	165	29,1	185	34,9
160	28,1	170	29,2	190	34,9
165	28,1	175	29,2	195	35

2.4 Eesti SEJ kütuse kulukarakteristik

Kulukarakteristik on elektriijaama agregaadil üks põhilistest karakteristikutest, mis üldiselt määratakse katse meetodil. Teades aga kasuteguri karakteristiku saame see välja arvutada.

Esiteks vaja teada energiabloki kütuse kütteväärtust, edaspidi (ktv), mis antud elektriijaama põhikütuseks on põlevkivi, mille kütteväärtus on 8000 kJ/kg . Arvestades eelmainitud teooriat peame kõik ühikud võrdsustama, kuna energiabloki koormus kasuteguri karakteristikutes on mõõdetud megavattides, siis peame ka kütteväärtust mõõtma MW/t. Arvestades põlevkivi katelde

kütusekulu mahu mõõtühikusk on valitud 1 tonn. Kuna energia mõõtühiku üldkuju on megavatt-tundi (MWh) siis kütteväärtuse ühiku kJ/kg muudame MWh/t järgmiselt:

Teades, et $1\text{h} = 3600\text{s}$ ning $1\text{t} = 1000\text{kg}$ saame,

$$\frac{ktv^{\text{kJ}}/\text{kg}}{3600 \cdot 1000} = \frac{8000 \cdot 1000}{3600 \cdot 1000} = 2,2 \text{ MWh}/\text{t} \quad (2.4.1)$$

Seega $ktv = 2,2 \text{ MWh}/\text{t}$

Arvestades ploki sisendi ja väljundi kasutegurit, kütusekulu avaldub järgmiselt:

$$B_P = \frac{\frac{P_P}{ktv}}{\frac{\eta_P}{100}} \quad (2.4.2)$$

Kus

P_P – Ploki koormus antud väärtusel

ktv – Põlevkivi kütteväärtus

η_P – ploki kasutegur antud väärtusel

Seega valides ploki nr. 1 koormuseks 35MW, saame:

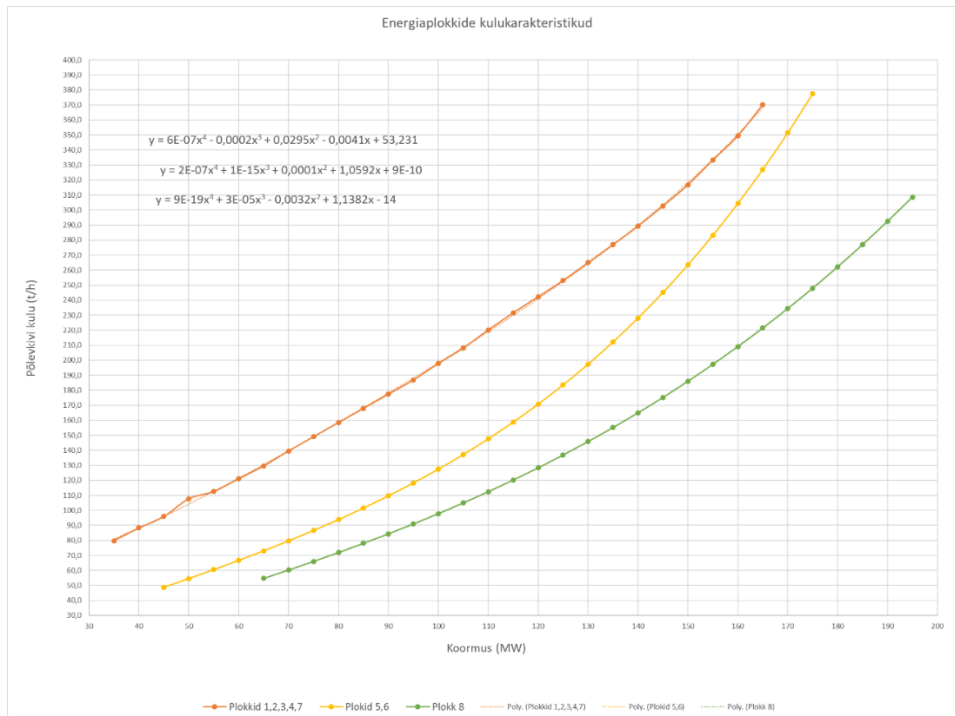
$$B_P = \frac{\frac{P_P}{ktv}}{\frac{\eta_P}{100}} = \frac{\frac{35}{2,2}}{\frac{21,9\%}{100}} = 79,8 \frac{\text{t}}{\text{h}}$$

Kasutades valemi 2.4.2. leiame kõikide plokkide kütusekulu väärtused ning koondame allpool tabelisse (Tabel 2.4.1).

Tabel.2.2. Eesti SEJ tuletatud kütusekulu

P(MW)	Bk(t/h)	Bk(t/h)	Bk(t/h)
35	79,8		
40	88,3		
45	95,9	48,8	
50	107,7	54,6	
55	112,6	60,5	
60	121,1	66,7	
65	129,6	73,1	54,7
70	139,6	79,7	60,3
75	149,1	86,6	66,0
80	158,5	93,9	71,9
85	167,9	101,6	78,1
90	177,4	109,7	84,4
95	186,8	118,3	91,0
100	197,8	127,4	97,8
105	208,1	137,2	105,0
110	220,1	147,6	112,4
115	231,6	158,8	120,2
120	242,3	170,7	128,3
125	253,1	183,6	136,9
130	265,0	197,4	145,8
135	277,1	212,2	155,1
140	289,3	228,1	164,9
145	302,7	245,1	175,2
150	316,8	263,5	186,0
155	333,4	283,2	197,3
160	349,5	304,4	209,1
165	370,3	327,1	221,4
170		351,4	234,4
175		377,5	248,0
180			262,2
185			277,0
190			292,5
195			308,7

Graafiliselt ülaltoodud andmed on toodud järgmisel joonisel (Joonis 2.4.1)



Joonis 2.7 Eesti SEJ plokkide kütusekulu karakteristikud

Eesti Elektriijaama plokkide kütuse kulukarakteristikutelt näeme, plokkide sisendi ehk antud juhul katelde kütusekulu sõltuvust plokkide väljund võimsusest ehk generaatorite väljund elektrilisest võimsusest.

Võrreldes teoreetiliste funktsioonidega, ei ole need niivõrd lineaarsed. Erinevus võibolla tingitud kas katsetulemuste ebatäpsusest või plokkide eripärast. Kuna katsetulemusi ei saa hetkel kuidagi mõjutada, siis et arvestame kalde teoreetilistest graafikustest on tingitud plokkide eripärast.

Kuna graafikud ei ole leitud katsetulemusena vaid määratud matemaatiliselt (valem 4.2) abil, siis katsepunktid ei vaja, visuaalse seisukohalt silumist. Funktsioonid on siiski aproksimeeritud 3-astme polünoomidega Exceli abil, et tuvastada saadud graafikute $F(x)$ funktsioonid. $F(x)$ funktsioonid on vaja saada suhtelise juurdekasvu karakteristikute $b_p(P_p)$ välja arvutamiseks. Graafikute silumiseks valitud olid just 4-astme polünoomid, et säilitada tingimust – Kulukarakteristikute funktsioonid peavad olema rangelt kasvavad.

Silumis 4-astme polünoomide funktsioonid on järgmised:

- Plokkid nr.1,2,3,4,7 – $F(x) = 6 * 10^{-7}x^4 - 0,0002x^3 + 0,0295x^2 - 0,0041x + 53,231$
- Plokkid nr.5,6 – $F(x) = 2 * 10^{-7}x^4 + 1 * 10^{-15}x^3 + 0,0001x^2 + 1,0592x + 9 * 10^{-10}$
- Plokk nr.8 – $F(x) = 9 * 10^{-19}x^4 - 3 * 10^{-5}x^3 - 0,0032x^2 + 1,1382x - 14$

2.5 Eesti SEJ suhtelise juurdekasvu karakteristikud

Suhtelise juurdekasvu karakteristik ehk marginaalkulu karakteristik $b_p(P_p)$ on põhiline karakteristik optimaalsus tingimuse täitmiseks. Järgmistes peatükkides, kus uuritakse plokkide vahelist koormusjaotus optimeerimist, ehitatakse koormusjaotus plaani just marginaalkulu väärtusi b_p . Suurus b_p näitab, kui palju suureneb ploki kütusekulu, kui ploki aktiivkoormust P_p suurendada ühe ühiku võrra.

Suhtelise juurdekasvu funktsiooni leitakse kütuse kulu funktsioonide alusel viimase diferentseerimise teel. Seega suhtelise juurdekasvu funktsiooni $b_p(P_p)$ leidmiseks peame võtma kulukarakteristiku funktsioonist $B_p(P_p)$ tuletise aktiivkoormuse järgi ehk:

$$B'_p(P_p) = b_p(P_p).$$

Seega, peame võtma eelmises peatükis saadud plokkide funktsioonidest $F(x)$ tuletise :

- Plokkid nr.1,2,3,4,7 - $F(x) = 6 * 10^{-7}x^4 - 0,0002x^3 + 0,0295x^2 - 0,0041x + 53,231$

Antud kulufunktsiooni tuletis oleks $f(x) = 24 * 10^{-6}x^3 - 0,0006x^2 + 0,59x - 0,0041$

Järgmisena võtame tuletist plokkide nr. 5,6 kütuse kulufunktsioonist:

- Plokid nr.5,6 – $F(x) = 2 * 10^{-7}x^4 + 1 * 10^{-15}x^3 + 0,0001x^2 + 1,0592x + 9 * 10^{-10}$

tuletis - $f(x) = 8 * 10^{-7}x^3 + 3 * 10^{-15}x^2 + 0,0002x + 1,0592$

tuletis plokki nr. 8 kütuse kulufunktsioonist:

- Plokk nr.8 – $F(x) = 9 * 10^{-19}x^4 - 3 * 10^{-5}x^3 - 0,0032x^2 + 1,1382x - 14$

tuletis - $f(x) = 3 * 10^{-18}x^3 + 9 * 10^{-5}x^2 + 0,0064x + 1,1382$

Seega suhtelise juurdekasvu karakteristikute funktsioonid on:

- Plokid nr.1,2,3,4,7 – $f(x) = 24 * 10^{-6}x^3 - 0,0006x^2 + 0,59x - 0,0041$
- Plokid nr.5,6 – $f(x) = 8 * 10^{-7}x^3 + 3 * 10^{-15}x^2 + 0,0002x + 1,0592$
- Plokk nr.8 – $f(x) = 3 * 10^{-18}x^3 + 9 * 10^{-5}x^2 + 0,0064x + 1,1382$
- Saadud $b_p(P_p)$ funktsioonide abil, asendades x väärtused P_p , saame b_p

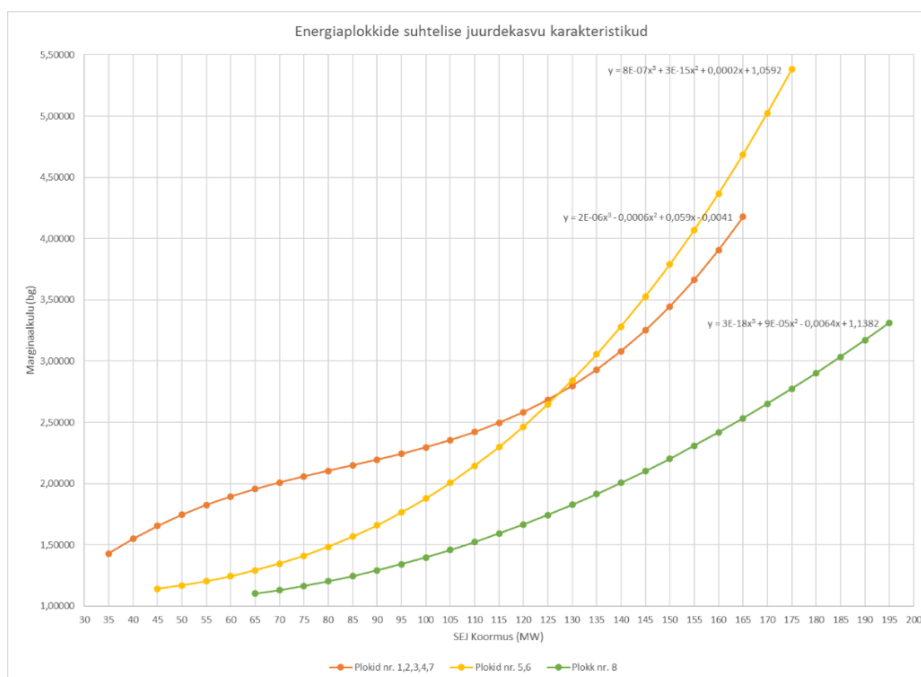
$$b_p(P_p) = 24 * 10^{-6}35^3 - 0,000635^2 + 0,5935 - 0,0041 = 1,43$$

Niimoodi asendades on saadud marginaalkulu väärtused iga ploki koormuse järgi, koormuse P_p väärtused on võetud ploki minimaal koormuse ja maksimaal koormuse vahemikus, astmega 5 MW. Asendades on koostatud tabel (tabel 2.5.1).

Tabel 2.3 Eesti SEJ suhtelise juurdekasvu väärtuste tabel

P(MW)	bk	bk	bk
35	1,42880		
40	1,54950		
45	1,65460	1,1411	
50	1,74590	1,1692	
55	1,82520	1,2033	
60	1,89430	1,2440	
65	1,95500	1,2919	1,1025
70	2,00910	1,3476	1,1312
75	2,05840	1,4117	1,1645
80	2,10470	1,4848	1,2022
85	2,14980	1,5675	1,2445
90	2,19550	1,6604	1,2912
95	2,24360	1,7641	1,3425
100	2,29590	1,8792	1,3982
105	2,35420	2,0063	1,4585
110	2,42030	2,1460	1,5232
115	2,49600	2,2989	1,5925
120	2,58310	2,4656	1,6662
125	2,68340	2,6467	1,7445
130	2,79870	2,8428	1,8272
135	2,93080	3,0545	1,9145
140	3,08150	3,2824	2,0062
145	3,25260	3,5271	2,1025
150	3,44590	3,7892	2,2032
155	3,66320	4,0693	2,3085
160	3,90630	4,3680	2,4182
165	4,17700	4,6859	2,5325
170		5,0236	2,6512
175		5,3817	2,7745
180			2,9022
185			3,0345
190			3,1712
195			3,3125

Tabeli 2.5.1 väärtused illustreerime graafiliselt ning saame järgmised plokkide suhtelisejuurdekasvu karakteristikuid (joonis 2.9.):



Joonis 2.8 Eesti SEJ plokkide suhtelise juurdekasvu karakteristikud

Saadud suhtelise juurdekasvu karakteristikute funktsioonide alusel järgmistes peatükkides vaadeldakse plokkide koormusjaotuse optimeerimise arvutamist ning graafikute alusel on piltlikult näidatud, kuidas toimub optimeerimine.

2.6 Plok nr. 8 karakteristikud segakütusel

2005. aastal Enefit Energy ning Foster Wheeleri koostöös Eesti Elektriijaama valmis uus energia plok nr.8. Antud energiaplokkis on kasutuses katlad, mis põhinevad keevkihtpõletus tehnoloogial. Väljaarvatud keevkiht põletust Foster Wheeleri katla eripäraks on ka see, et katel on disainitud põletama mitmeid kütusi: põlevkivi, Uttegaas, puiduhake. Kuigi katel toimib mitmel kütusel, peakütuseks on siiski põlevkivi, kus teisi kütuseid võib lisada järgmiselt:

1. katlas saab põletada uttegaasi kuni 50% sisenevast primaarenergiast
2. katlas saab põletada uttegaasi kuni 13% sisenevast primaarenergiast
3. puiduhakke kütuseetteannet pole, kuid läbi põlevkivi etteande saaks lisada 10-20%

Seega järgmiselt on vaadeldud kahte stsenaariume:

- a) Kulukarakteristikut segakütusel, millest 10% on puiduhaket
- b) Kulukarakteristikut segakütusel, millest 12% on Uttegaas, kuna teistes tolmukateldes on see uttegaasi maksimaalne lubatud kütusesegu

Antud karakteristikute avaldamiseks tuleb esiteks leida antud kütuste kütteväärtused (Tabel 2.6.1):

Tabel 2.4 Segakütuste kütteväärtused võrdsetes ühikutes

Põlevkivi	Puiduhake	Uttegaas
8000 kJ/kg	12500 kJ/kg	45000 kJ/m ³

Kuna karakteristikute ehitamisel kütuse kulu ühikuks on t/h ning koormuse ühikuks on MW . Siis peame teisendama kõik ühikud ühtseteks ühikuteks. Tabelis 2.6.1 toodud väärtused on toodud järgmise ühikväärtustele MWh/t . Sammuti arvestades, et tegu on segakütusega, kus iga segakütuse puhul saab maksimum vaid pool olla alternatiivkütust on saadud järgmised väärtused:

Tabel 2.5 Segakütuste kütteväärtused võrdsetes ühikutes

Põlevkivi	Puiduhake	Uttegaas
2,2 MWh/t	2,3 MWh/t	42,8 MWh/t

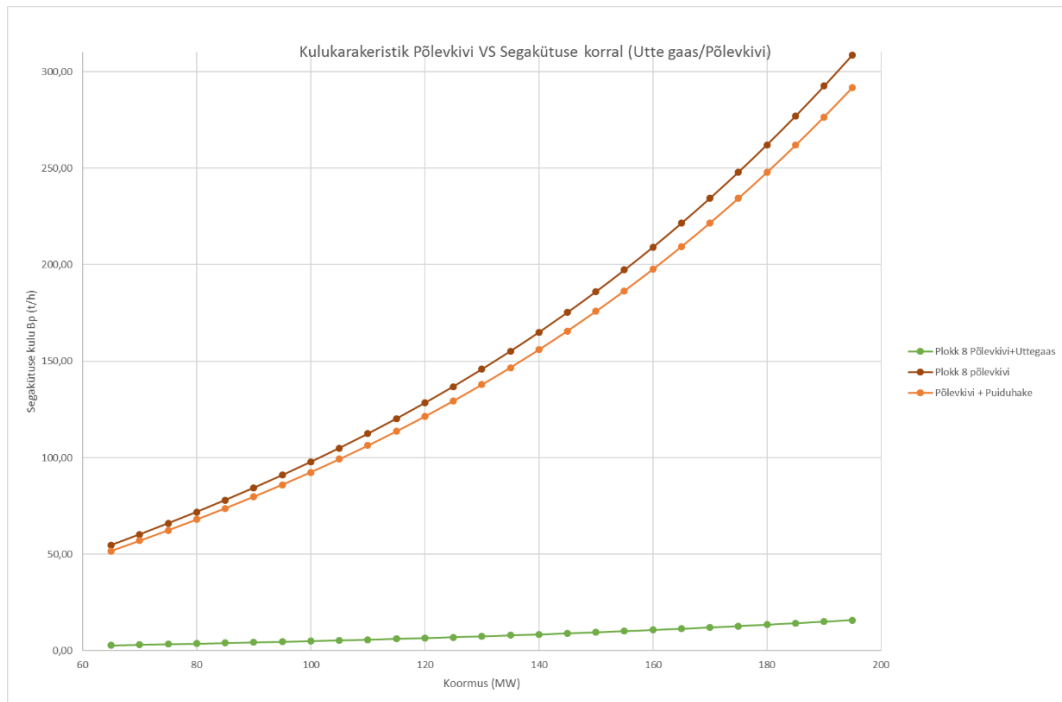
Tabelis 2.6.2 näeme, et Uttegaasi kütteväärtus on oluliselt suuremad võrreldes tahkekütusega. Uttegaasi kütteväärtus on $45 MJ/m^3$ arvestades, et Uttegaasi tihedus on palju väiksem võrreldes tahkekütustega, ühe kilogrammi kütteväärtuseks on saadud $1227 MJ/kg$.

Kasutades peatükis 2.4 valemit (2.4.1, 2.4.2) on saadud järgmised kütuse kulud (Tabel 2.6.3.).

Tabel 2.6.. Kütusekulu erinevatel stsenaariumitel

Põlevkivi			Põlevkivi + Puiduhake			Põlevkivi + Uttegaas		
P(MW)	Bk(t/h)	Bk(t/h)	P(MW)	Bk(t/h)	Bk(t/h)	P(MW)	Bk(t/h)	Bk(t/h)
35	79,8		35	79,8		35	4,10	
40	88,3		40	88,3		40	4,54	
45	95,9	48,8	45	95,9	48,8	45	4,93	2,51
50	107,7	54,6	50	107,7	54,6	50	5,54	2,81
55	112,6	60,5	55	112,6	60,5	55	5,79	3,11
60	121,1	66,7	60	121,1	66,7	60	6,23	3,43
65	129,6	73,1	65	129,6	73,1	65	6,66	3,76
70	139,6	79,7	70	139,6	79,7	70	7,18	4,10
75	149,1	86,6	75	149,1	86,6	75	7,66	4,45
80	158,5	93,9	80	158,5	93,9	80	8,15	4,83
85	167,9	101,6	85	167,9	101,6	85	8,63	5,22
90	177,4	109,7	90	177,4	109,7	90	9,12	5,64
95	186,8	118,3	95	186,8	118,3	95	9,60	6,08
100	197,8	127,4	100	197,8	127,4	100	10,17	6,55
105	208,1	137,2	105	208,1	137,2	105	10,70	7,05
110	220,1	147,6	110	220,1	147,6	110	11,32	7,59
115	231,6	158,8	115	231,6	158,8	115	11,90	8,16
120	242,3	170,7	120	242,3	170,7	120	12,45	8,78
125	253,1	183,6	125	253,1	183,6	125	13,01	9,44
130	265,0	197,4	130	265,0	197,4	130	13,62	10,14
135	277,1	212,2	135	277,1	212,2	135	14,24	10,91
140	289,3	228,1	140	289,3	228,1	140	14,87	11,72
145	302,7	245,1	145	302,7	245,1	145	15,56	12,60
150	316,8	263,5	150	316,8	263,5	150	16,28	13,54
155	333,4	283,2	155	333,4	283,2	155	17,14	14,56
160	349,5	304,4	160	349,5	304,4	160	17,96	15,65
165	370,3	327,1	165	370,3	327,1	165	19,03	16,81
170	275,0	351,4	170	275,0	351,4	170	14,14	18,06
175	283,1	377,5	175	283,1	377,5	175		19,41
180	291,2	264,6	180	291,2	264,6	180		
185	299,3	272,4	185	299,3	272,4	185		
190		280,2	190		280,2	190		
195		288,0	195		288,0	195		

Tabelis 8 toodud andmete illustreerimiseks on koostatud kulukarakteristiku graafikuid (joonis 2.6.1)



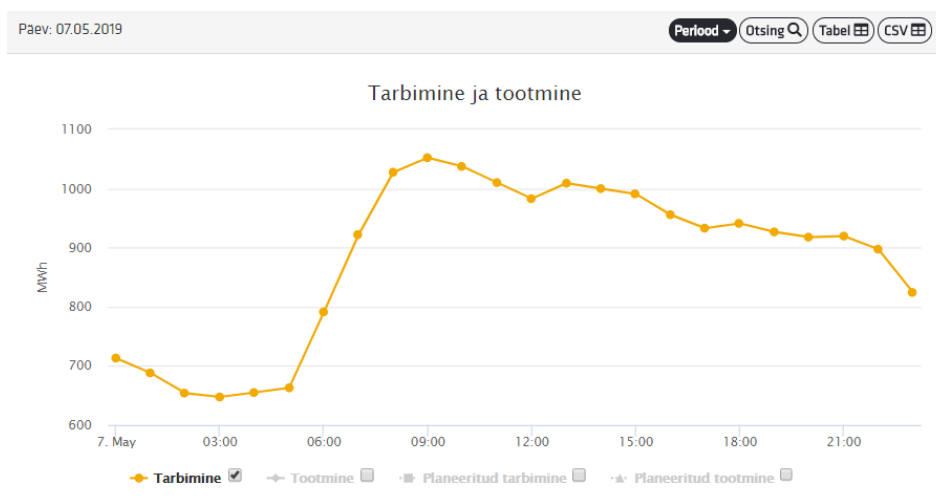
Joonis 2.9 Plokk nr.8 kulukarakteristikud erineva kütuse stsenaariumil.

Jooniselt näeme, et Uttegaasi puhul kulukarakteristik on oluliselt madalam. Suur erinevus tuleneb sellest, et algselt kulu on mõõdetud kohandatult põlevkivile ehk Tonn põlevkivi tunnis (t/h). Mis puhul isegi arvestades, et ainult 12% sisenevast kütusest on Uttegaas on see siiski väga suur kogus. Ilmselt praktikas sellist karakteristikut ei juhtu, kuna arvestades Uttegaasi ning põlevkivi hinda, kulu seisukohalt ei ole ratsionaalne nii suur kogust gaasi põletada. Kui just mitte käivitamisel, sest Uttegaasil on palju kõrgem kütteväärtus ning seetõtu oleks ilmselt kergem katla miinimum töökoormust saavutada.

3. EESTI ELEKTRIAAMA PLOKKIDE KOOSSEISU VALIK

3.1 Sissejuhatus

Kuna Inimeste igapäevaelu üldiselt vaadates on tsükliline, siis ka enamus energia tootmissüsteemidest peavad toimima vastavalt. Vaadates just elektrisüsteemile lähemal, siis üldiselt süsteem on koormatud rohkem päeval ja varaõhtul kui tootmiste koormused on veel kõrged, siis kui alates õhtust koormus langeb varahommikuni kui rahvastik magab. Ja nii kuni tsükkel saab täis. Parema ettekujutuseks alloleval joonisel on toodud Eesti elektritarbimis ööpäeva graafik (3.1)



Joonis 3.1 Eesti ööpäeva elektri tarbimise graafik [21]

Sammuti ei tohi unustada, et graafik on tsükliliselt muutuv mitte ainult ööpäeva lõikes, vaid nädala, kuu, aastaaja ning aastate lõikes.

Kuid miks on see elektritootmise üksustele probleemiks, miks ei või lihtsalt tõsta koormust maksimumini ning hoida see aastaringseks? Probleem on pigem majandusliku seisukohalt mitte tehniliselt. Täpsemalt ei ole see ratsionaalne rahaliselt, sest kui tööst väljaviies plokid mida otseselt ei ole vaja, saab säästa väga suure osa elektritootja kuludest.

Seega antud peatükis on uuritud kuidas valida plokkide koosseisu Eesti Elektri jaama andmete põhjal. Sammuti on see info alginfoks plokkide koormusjaotus optimeerimiseks, sest nagu juba mainitud kõik energiaplokkid ei ole rahaliselt optimaalne alati töös hoida, vaid energia plokkide sisse/välja lülitamisel peaks tuginema tarbimise prognoosile.

Eesti Elektri jaamas on hetkeseisuga 8 energia plokki, mis kasutatud alginfo (plokkide kasuteguri karakteristikud) alusel jagunevad kolme rühma kasuteguri alusel. Antud peatükis on uuritud plokkide koosseisu valikut sõltuvalt elektri jaama väljund võimsusest. Plokkide koosseisu valik on tähtis teada enne plokkide vahel koormusjaotus optimeerimist.

Kooseisuvaliku üks peamistest reeglitest on, et süsteemis kus on mitmeid energia plokke, ei tasu alati kõik töös hoida, tuleb alati üritada minimaalne arv plokke. Ideaalis tuleb võimalusel üritada hoida vaid üks, nendest kõige ökonoomsem. Töös hoidmisel vaid ühte energia plokki on kergem koormata selle nii, et see töötaks oma parima kasuteguriga. Kui aga mitu plokki on töösse viidud optimaalset koormust on juba palju raskem saavutada, kuna koormus on jaotatud ning ilmselt plokkid töötavad kaugemal optimaalsest koormusest. [20]

3.1.1 Plokkide käivituskulud

Kuna alati hoida kõik plokid töös ei ole ratsionaalne kulude seisukohalt, siis antud peatükis on vaadeldud plokkide sisselülitamise järjekorda sõltuvalt elektri jaama koormusest. Selleks, et tuvastada optimaalse plokkide koosseisu, tuleb arvestada mitmete teguritega. Antud peatükis on vaadeldud vaid kahte peamist – Plokkide käivituskulud ning tööshoidmise kulud. Viimase neist tuleb välja kulukarakteristikutest, kuna seal on ülalhoidmise kulud ehk omatarbe kulud juba kulukarakteristikutes sees, kuna kulukarakteristikud on ehitatud väljund võimsuse ning kütuse tarbimise alusel.

Plokkide käivituskulud ei ole sammuti otseselt väljaarvutatud ploki kohta eraldi, vaid on kasutatud Eesti energia poolt saadud. Eesti Energia andmete järgi ühe plokki käivitamisele külmast olekust kulub ligikaudu 93,1 tonni tingkütust. Kuna plokkide käivitamiseks ei kasutata peakütust – põlevkivi, vaid põlevkivi- või muu kütteõli. Seega käivituskulud on toodud tingkütuse ühikutes.

Tingkütuse all mõeldakse kütust, mille ainsaks tunnussuuruseks on tema konstante kütteväärtus 29,31 MJ/kg (ajalooliselt 7000 kcal/kg).

Kütuse tegeliku kulu ümberarvutamiseks tingkütuse kuluks kasutatakse valemit:

$$B_{ting} = B * \frac{Q_a^t}{29,31} \quad (3.1)$$

Kus,

B – kütuse tegelik kulu (kg)

B_{ting} – Tingkütuse kulu (kg)

Q_a^t – Kütuse kütteväärtus (MJ/kg) [19]

Kuna antud juhul tingkütusekulu on meil teada, vaid otsime kütuse tegelik kulu, teisendades eelmist valemit järgmiselt:

$$B = \frac{B_{ting}}{Q_p / 29,31} \quad [3.2]$$

Kus,

B – kütuse tegelik kulu (kg), otsitav

B_{ting} – Tingkütuse kulu (kg), Eesti Energiast saadud – 93 100 kg

Q_p – Põlevkivi kütteväärtus (MJ/kg), 8 MJ/kg

Saame :

$$B = \frac{93100}{8 \div 29,31} = 285\,772,5 \text{ kg} \sim 285,8 \text{ t}$$

Ekh ühe ploki käivituseks Eesti Energial kulub tingkütust mis on võrdne 285,5 tonniga põlevkivi.

Edaspidi vaatleme täpsemalt plokkide koosseisu valiku printsiipe.

3.1.2 Koosseisuvalliku meetodikat

Arvestades tänapäeva optimeerimise aktuaalsust on tuletatud palju erinevaid meetodikaid, kuid enamusest neist toetub siiski järgmiste meetodikatele:

- Prioriteetsus listi meetod (*Priority-list schemes*)
- DP meetod (*Dynamic programming*)
- LR meetod (*Lagrange relaxation*)
- MILP meetod (*Mixed integer linear programming*) [20]

Ülalmainitud DP,LR, MILP meetodit ei kasutata otseselt ainult koosseisu valikule, vaid tulemusena arvutatakse välja ka optimaalne koormus igas plokkis tuletatud koosseisu jaoks. Arvutamiseks kasutatakse programmeerimist, kus arvutusi teeb arvuti. Nende eelisteks on suur täpsus ning arvutamise piirangute vähesus. Seega antud meetodeid täpsemalt ei ole vaadeldu antud uurimustöös. Suurem rõhk on toodud aga prioriteetsus listi meetodil, mis on kasutatud antud uurimustöös koosseisu valikul.

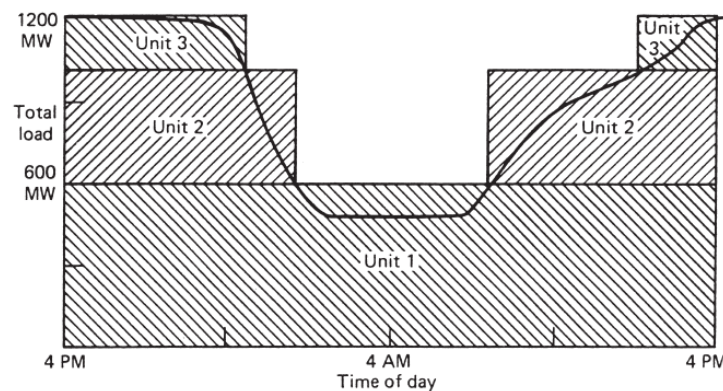
Prioriteetsus listi meetod

Prioriteetsus listi meetod on ülalmainitud meetoditest kõige lihtsam, mis põhineb prioriteetsu listi koostamisel. Ka antud uurimustöös arvestades sisend-info hulga kasutatud just seda meetodit.

Antud meetodi järgi esimese sammuna tuleks järjestada plokkid, iga plokki erikulu järgi. Edaspidi kui prioriteetsus list on koostatud tuleb järgida järgida algoritmi:

- a) Kui iga tunni järgselt koormus langeb, enne plokki tööst väljaviimist tuleb tuvastada, kas -1 plokkiga koormus on piisav.
- b) Tuleb tuvastada kui mitmeks tunniks (t) antud koormus on madalal tasemel. Üldiselt käib see prognoosi alusel
- c) Kui (t) arv on väiksem kui plokki peatus/käivitus aeg, tuleks see hoida sees. Kui suurem, siis alustada väljalülitus protsess
- d) Tuleb läbi viia kulu arvutus antud plokkiga süsteemis ning -1 süsteemis arvestades plokki peatamis- ning käivitamis kuludega.
- e) Korda eelmainitud sammud ka teiste plokkidega enne sisse-/väljalülitamist

Lõppkokkuvõttes graafilisel kujul lahendus peaks välja nägema järgmiselt (Joonis 3.1.2):



Joonis 3.2 Plokkide sisse/väljalülitus skeemi näidis. [21]

Näiteks on võetud Elektriijaama kolme energiaplokkiga ja maksimaal koormusega 1200MW ning koormuse muutumiseks ühe ööpäeva.

Näeme, et plokkidele on valitud maksimaalsed koormused ning järjestatud vastavalt. Vastavalt näidis koosseisu valikule Plokk nr.1 on alati töös ning Plokk nr.2 viiakse töösse kui koormus ületab 600MW ning Plokk nr.3 kui koormus ületab 1000MW. Sama järjestust tuleks ka kasutada, kui koormus langeb.[21]

3.1.3 Plokkide erikulukarakteristik

Arvestades olemasolevat sisendinfot on valitud reastada plokkide sisselülitamist koormuse kasvamisel nende erikulu alusel.

Toetudes peatükis 2 toodud teooriale leiame Eesti Elektri jaama kütuseerikulu iga ploki kohta.

Kasutades varem leitud kütusekulu karakteristikute andmed, leiame erikulu karakteristikuid järgmiselt:

$$\delta_P(P_P) = \frac{B_P(P_P)}{P_P} \quad (3.3)$$

Kus,

$\delta_P(P_P)$ – erikulu antud koormusel (t/MW)

$B_P(P_P)$ – Kütusekulu antud koormusel (t/h)

P_P – ploki koormus (MW)

Seega, kui võtame ploki nr.8 kütusekulu minimaalsel koormusel 65MW saame:

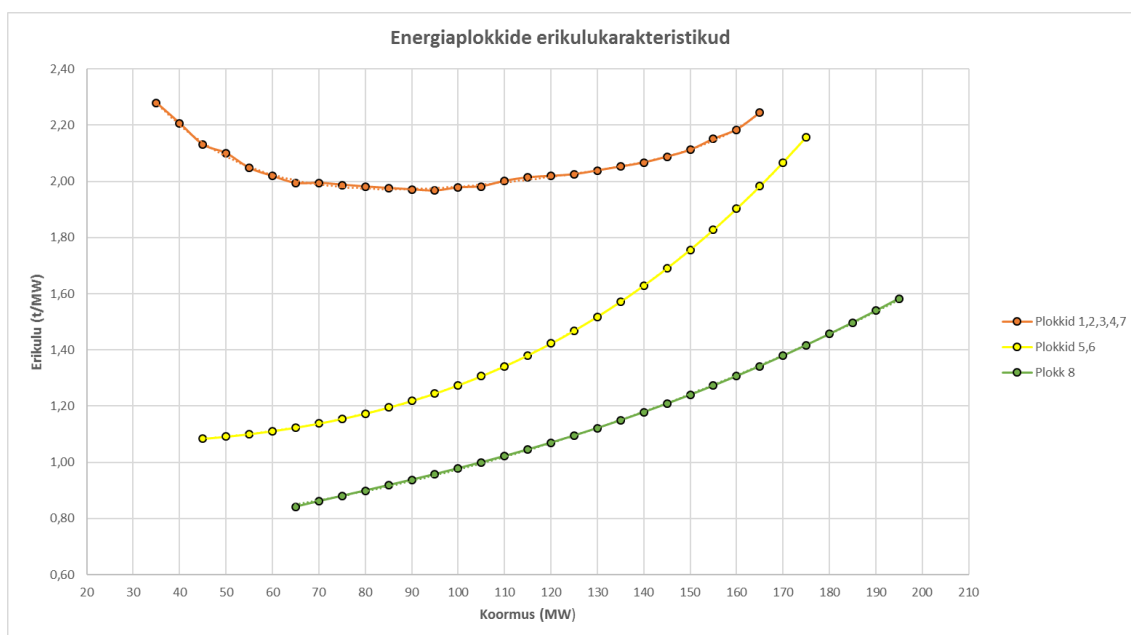
$$\delta_P(P_P) = \frac{79,8}{65} = 2,28 \left(\frac{t}{MW}\right)$$

Niiviisi läbi arvutades iga ploki erikulu väärtus antud koormusel, kus koormuse sammuks on 5MW, on saadud järgmine tabel (Tabel 3.1).

Tabel 3.1 Plokkide erikulu valitud koormustel

Heri(Q)			
P(MW)	Erikulu (t/MW)	Erikulu (t/MW)	Erikulu (t/MW)
35	2,28		
40	2,21		
45	2,13	1,08	
50	2,10	1,09	
55	2,05	1,10	
60	2,02	1,11	
65	1,99	1,12	0,84
70	1,99	1,14	0,86
75	1,99	1,15	0,88
80	1,98	1,17	0,90
85	1,98	1,19	0,92
90	1,97	1,22	0,94
95	1,97	1,24	0,96
100	1,98	1,27	0,98
105	1,98	1,31	1,00
110	2,00	1,34	1,02
115	2,01	1,38	1,05
120	2,02	1,42	1,07
125	2,02	1,47	1,09
130	2,04	1,52	1,12
135	2,05	1,57	1,15
140	2,07	1,63	1,18
145	2,09	1,69	1,21
150	2,11	1,76	1,24
155	2,15	1,83	1,27
160	2,18	1,90	1,31
165	2,24	1,98	1,34
170		2,07	1,38
175		2,16	1,42
180			1,46
185			1,50
190			1,54
195			1,58

Andmete illustreerimiseks on need viidud graafilisele kujule ning tood alloleval joonisel. (joonis 3.3)



Joonis 3.3 Plokkide erikulukarakteristikud

Nüüd kui erikulukarakteristik on avaldatud saame jätkata plokkide koosseisu valikuga.

3.1.4 Plokkide koosseisu valik

Antud lõputöös plokkide koosseisu valikul on otsustatud kasutada prioriteetsus listi meetodit. Selleks et valida plokkide koosseisu on järjestatud plokid erikulu järgi kasvamisjärjekorras elektrijaama koormuse suurenemisel.

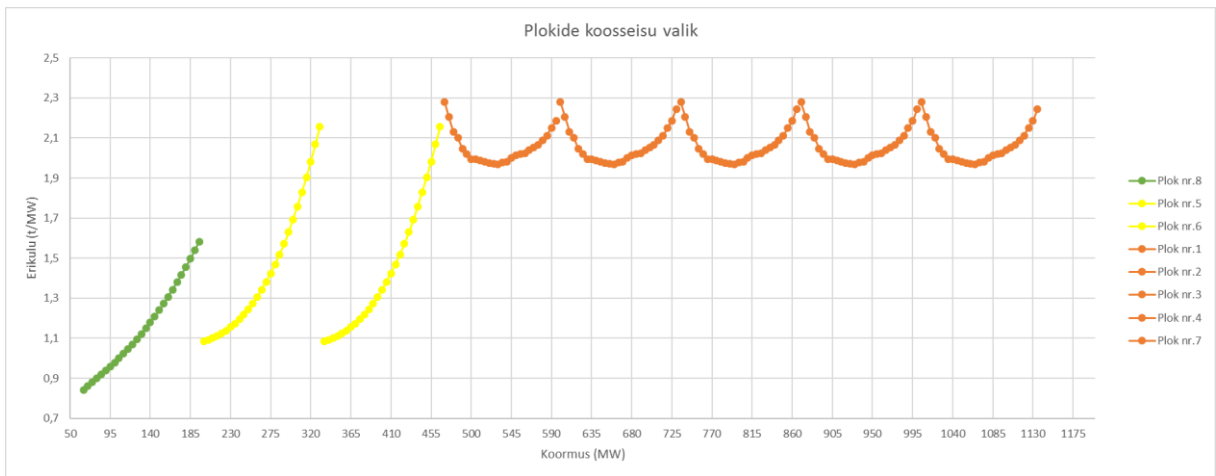
Eelmises peatükis toodud ploki kütusekulu külmast olekust käivitamisel suuruse arvestamisel. On ratsionaalne mitte jagada plokki sammudeks, vaid koormata plokkide algusest lõpuni lähtudes plokkide erikuluga. Antud meetodi järgi plokid tuleb koormata nende erikulu järgi kasvamise järjekorras.

Teades Iga energiaploki erikulu väärtust igal koormusel, Plokkid on järjestatud kasvamise järjekorras erikuluväärtuste suhtes järgmiselt:

Tabel 3.2 Plokkide sisselülitamise järjestus erikulu järgi

P(MW)	65-195 MW		195-330 MW		330-465 MW		465-595 MW		595-730 MW		730-865 MW		865-1000 MW		1000-1135 MW	
	Plok nr.	Erikulu	Plok nr.	Erikulu	Plok nr.	Erikulu	Plok nr.	Erikulu	Plok nr.	Erikulu	Plok nr.	Erikulu	Plok nr.	Erikulu	Plok nr.	Erikulu
		0,841565		1,084175		1,084175		2,279129		2,279129		2,279129		2,279129		2,279129
		0,8612		1,0917		1,0917		2,206612		2,206612		2,206612		2,206612		2,206612
		0,880283		1,100725		1,100725		2,130873		2,130873		2,130873		2,130873		2,130873
		0,8992		1,1114		1,1114		2,1		2,1		2,1		2,1		2,1
		0,918244		1,123875		1,123875		2,047348		2,047348		2,047348		2,047348		2,047348
		0,937644		1,1383		1,1383		2,018553		2,018553		2,018553		2,018553		2,018553
		0,957582		1,154825		1,154825		1,993702		1,993702		1,993702		1,993702		1,993702
		0,9782		1,1736		1,1736		1,994205		1,994205		1,994205		1,994205		1,994205
		0,999617		1,194775		1,194775		1,987384		1,987384		1,987384		1,987384		1,987384
		1,021927		1,2185		1,2185		1,981252		1,981252		1,981252		1,981252		1,981252
		1,045211		1,244925		1,244925		1,975787		1,975787		1,975787		1,975787		1,975787
		1,069533		1,2742		1,2742		1,970964		1,970964		1,970964		1,970964		1,970964
		1,09495		1,306475		1,306475		1,966763		1,966763		1,966763		1,966763		1,966763
		1,121508		1,3419		1,3419		1,977869		1,977869		1,977869		1,977869		1,977869
		1,149246		1,380625		1,380625		1,982004		1,982004		1,982004		1,982004		1,982004
		1,1782		1,4228		1,4228		2,001352		2,001352		2,001352		2,001352		2,001352
		1,208398		1,468575		1,468575		2,013721		2,013721		2,013721		2,013721		2,013721
		1,239867		1,5181		1,5181		2,019051		2,019051		2,019051		2,019051		2,019051
		1,272627		1,571525		1,571525		2,024801		2,024801		2,024801		2,024801		2,024801
		1,3067		1,629		1,629		2,038347		2,038347		2,038347		2,038347		2,038347
		1,342102		1,690675		1,690675		2,052289		2,052289		2,052289		2,052289		2,052289
		1,378847		1,7567		1,7567		2,066623		2,066623		2,066623		2,066623		2,066623
		1,411695		1,827225		1,827225		2,087639		2,087639		2,087639		2,087639		2,087639
		1,456422		1,9024		1,9024		2,112013		2,112013		2,112013		2,112013		2,112013
		1,497274		1,982375		1,982375		2,150922		2,150922		2,150922		2,150922		2,150922
		1,539516		2,0673		2,0673		2,184245		2,184245		2,184245		2,184245		2,184245
	8	1,583158	5	2,157325	6	2,157325	1	2,244258	2	2,244258	3	2,244258	4	2,244258	7	2,244258

Vastavalt eelmises peatükis toodud erikulu karakteristikutele esiteks tuleb koormata plokk nr.8, siis plokkid nr. 5 ja 6 ning alates koormusest 465MW tuleks kordamööda töösse viia plokkid nr.1,2,3,4,7. Andmete illustreerimiseks on koostatud järgmine graafik:



Joonis 3.4 Plokkide sisse-, väljalülitamise järjekord sõltuvalt elektrijaama koormusest.

4. PLOKK-KONDENSATSIOONJAAMADE KORMUSJAOTUS

OPTIMEERIMINE

Soojuselektrijaama optimeerimise peamiseks eesmärgiks on üldjuhul elektrijaama kütusekulu minimeerimine, kuna summaarse kütusekulu minimeerimine vähendab ühtlasi ka kütusega seotud kulutusi ja kõikide keskkonda paisatavate gaaside emissioone ning sammuti pikendab ka agregaatide tööiga. Antud peatükis on vaadeldud kondensatsioonijaama optimeerimise osa, täpsemalt plokkide koostöö koormusjaotust.

4.1 Optimeerimisülesanne püstitus

Oletame, et elektrijaamas töötab v energiaplokki. Vaatleme energiaplokkide koormuste optimeerimise ülesannet etteantud elektrijaama netokoormuste korral. Eeldame, et iga ploki kohta on antud vajalikud karakteristikud. Ülesande eesmärgiks on minimeerida elektrijaama summaarset kütusekulu etteantud koormusel läbi optimaalse koormusjaotuse elektrijaama energia plokkide vahel. Selles ülesandes plokkide elektrilist omatarvet ei arvestata. Eeldusel, et plokkide omatarve on arvestatud plokkide karakteristikutes ning et energiaploki kütusekulu karakteristikud on pidevad, siledad, mittelineaarsed, rangelt kasvavad ja rangelt kumerad funktsioonid, matemaatilise ülesande püstitatakse järgmiselt [6]:

Minimeerida

$$B = \sum_{e=1}^v B_{pe}(P_{pe}) \quad (4.1)$$

Järgmistel lisatingimustel

$$P - \sum_{e=1}^v P_{pe} = 0 \quad (4.2)$$

$$P_{pe}^{Min} \leq P_{pe} \leq P_{pe}^{Max}, \quad e = 1, \dots, v \quad (4.3)$$

Kus

B – plokkide summaarne kütusekulu tunnis

$B_{pe}(P_{pe})$ – e-nda ploki kütusekulu karakteristik

P_{pe}^{Min} – e-nda ploki minimaalne lubatav koormus

P_{pe}^{Max} – e-nda ploki maksimaalne lubatav koormus

Lisatingimustega (4.2) ja (4.3) on määratud ploki lubatavate võimsuste piirkonnaga. Lisatingimus (4.2) on elektriijaama aktiivvõimsuste bilansi tingimus. Antud bilanssi täitmine tagab, et elektriijaama netokoormus ehk neto genereeritav võimsus oleks P [6].

4.2 Optimaalsustingimus

Optimaalsustingimuse leidmiseks moodustatakse Lagrange'i funktsiooni, mis koosneb sihtfunktsiooni, Lagrange'i kordaja (μ_p) ning lisatingimuse korrutise summast. Antud optimaalsustingimused kuuluvad klassikaliste optimaalsustingimuste hulka. Klassikalisteks nimetatakse selliseid optimaalsustingimusi, kus arvestatakse ainult võrrandkujulist lisatingimust (4.2), kuid võrratuskuulised kitsendused (4.3) arvestatakse energiablokkide kütusekulu suhtelise juurdekasvu karakteristikutes. [6]

Seega Lagrange'i funktsioon avaldub järgmiselt:

$$\Phi(P_p, \mu) = \sum_{e=1}^v B_{pe}(P_{pe}) + \sum_{e=1}^v \mu_p \cdot (P - \sum_{e=1}^v P_{pe}) \quad (4.4)$$

Kus

μ – Lagrange'i kordaja

P_p – plokkide netokoormus vektor

Langrange'i funktsioon $\Phi(P_p, \mu)$ võimaldab ülesande (5.1)-(5.3) otsese lahendamist asendada optimaalse lahendi otsimisega funktsiooni $\Phi(P_p, \mu)$ statsionaarsete punktide hulgast. Kuna vaadeldaval juhul Lagrange'i funktsioon on rangelt kumer allapoole ploki netokoormuste suhtes ja ülesande (5.1)-(5.3) lubatavate lahendite hulk on kumer hulk, siis omab funktsioon $\Phi(P_p, \mu)$ ainult ühe statsionaarse punkti, mis ongi vaadeldava ülesande optimaalne lahend. [6]

4.3 Kondensatsioonplokkide koormuste optimeerimise klassikaline reegel

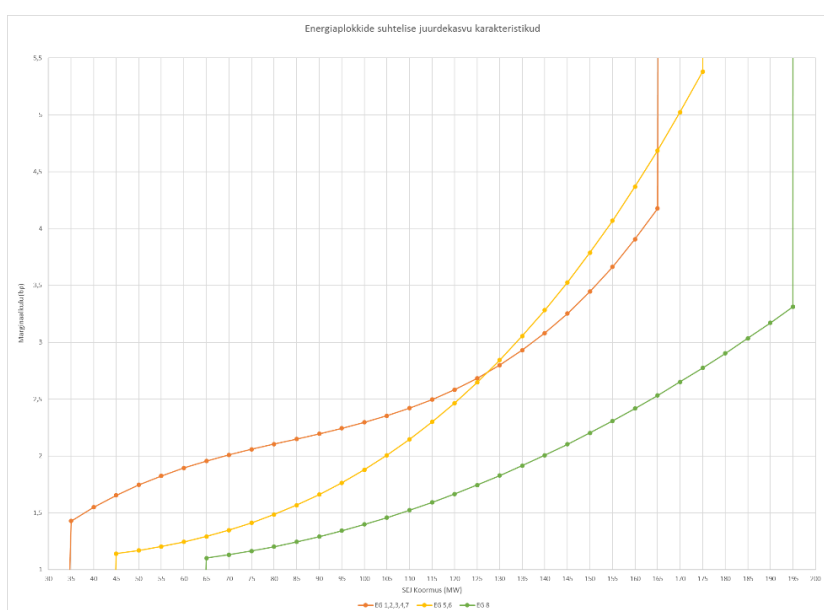
Kondensatsioonplokkide koormuste optimeerimise klassikaline reegel väidab, et kui plokkide kütusekulu suhtelise juurdekasvu karakteristikud ploki netokoormuse järgi või nendega ekvivalentse karakteristikud on esitatud modifitseeritud kujul, siis tuleb energiablokke koormata kütusekulu suhtelise juurdekasvude võrdsuse põhimõttel. Kui see ei ole võimalik, siis koormatakse energiablokke kütusekulu suhtelise juurdekasvude kasvamise järjekorras. [6]

Seega plokkide kütusekulu suhtelise juurdekasvude võrdsuse tingimus Eesti Elektriijaama näitel peab olema järgmine:

$$b_{p1,2,3,4,7} = b_{p5,6} = b_{p8} = \mu \quad (4.5)$$

Kuna tuletatud Eesti SEJ plokkide kütusekulu suhtelise juurdekasvu karakteristikud asuvad erinevatel tasanditel marginaalkulu skaala suhtes, (y-telg) (joonis 4.3.1) peame neid modifitseerima, nii, et oleks võimalik energiaplokke koormata kütusekulu suhtelise juurdekasvude võrdsuse põhimõttel. Seega modifitseerime plokkide $b_P(P_p)$ graafikuid nii, et plokkide minimaalselt lubatava koormuse juures suhtelise juurdekasvu karakteristik läheb vertikaalselt allapoole ning maksimaalselt lubatava koormuse juures aga vertikaalselt üles.

Juhul kui graafikut ei ole pidevad, ehk esinevad katkemiskohad, siis sammuti peame need kohad asendama vertikaalsete lõikudega. Graafiliselt modifitseeritud kütusekulu juurdekasvukarakteristikud näevad välja järgmiselt:



Joonis 4.1 Eesti SEJ plokkide kütusekulu suhtelise juurdekasvu karakteristikud modifitseeritud kujul

4.4 Elektrienergia ekvivalentsete karakteristikute lahendusmeetod

Antud peatükis on vaadeldud koormusjaotusoptimeerimise ülesande nii teoreetiline lahendusmeetod kui ka praktiline lahendus Eesti Elektrienergia tuletatud karakteristikute alusel, arvestades eelmistes peatükkides toodud optimaalsustingimusi.

Esiteks on vaja leida elektrienergia sisend-väljundkarakteristikud mis, on määratud konkreetse agregaadiga koostise jaoks, milleks antud töös on energiaplokkid, koormuste optimaalsustingimuste alusel. Seejuures eeldatakse, et plokid töötavadki optimaalsete koormustega iga μ väärtuse puhul.[6]

Antud meetodi aluseks on elektrienergia kütusekulu suhtelise juurdekasvu karakteristiku funktsioon:

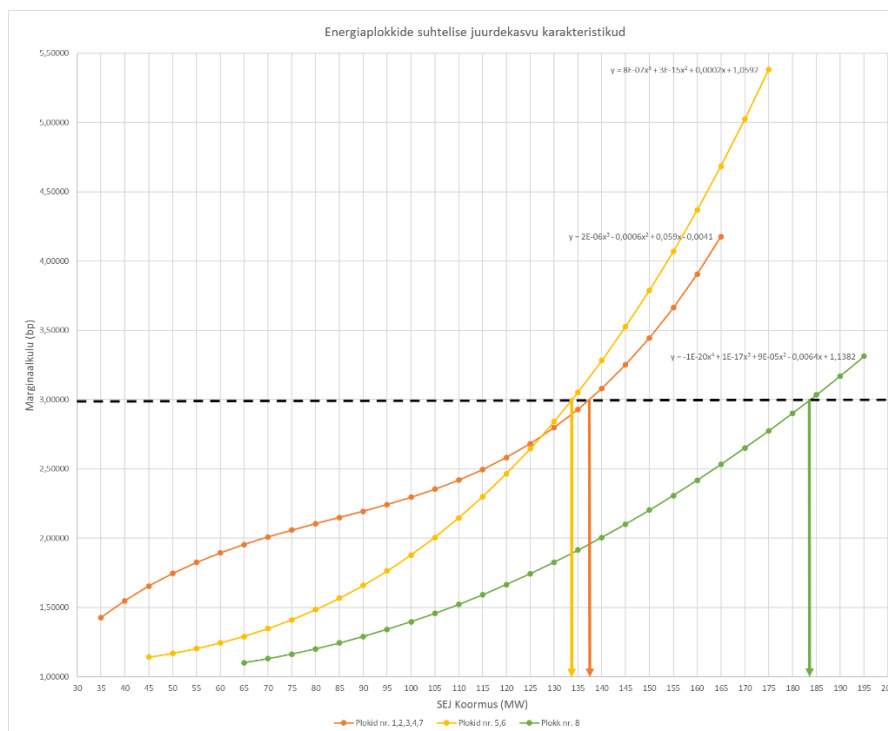
$$b(p) = \frac{\partial B_P}{\partial P_P} = \mu(p) \quad (4.6)$$

Elektrijaama ekvivalentne kütusekulu suhtelise juurdekasvu karakteristik arvutatakse punktide kaupa järgmiselt:

- 1) Antakse ette μ väärtus
- 2) Leitakse optimaalne koormusjaotus elektrijaama sees ja määratakse μ -le vastav elektrikoormus P .
- 3) Valitakse järgmine μ väärtus. Tagasi punkti 2.
- 4) Arvutust korratakse valitud sammuga, kuni μ suurendamine enam P ei suurenda.

Viimaseks punktiks saadud võimsuste P tulemuste abil määratakse plokkide summaarne kütusekulu plokkide kütusekulu karakteristikute $B(P)$ abil.

Joonisel 4.4.1. on graafiliselt näidatud punktid 1 ja 2 ekvivalentse kütusekulu suhtelise juurdekasvu karakteristikute tuletamise printsiip.



Joonis 4.2 Ekvivalentse karakteristikute arvutuse printsiip

Jooniselt näeme, et μ väärtuseks on valitud 3. Seega ülesanne on leida kõikide plokkide optimaalsed väljund netovõimsused etteantud μ väärtusel. Arvestades, et plokkide marginaalkulukarakteristikutes marginaalkulu väärtus on võrdne μ väärtusega $b_p(P) = \mu(P)$ ning optimaalsustingimust – Suhtelise juurdekasvude võrdsuse printsiibil,

saame tõmmata horisontaalse punktiirjoone valitud μ väärtuse kõrgusel. Plokkide väljundvõimsuse P tuvastame projektseerides punktiirjoone ning marginaalkulu funktsiooni ristumiskoha X -teljele kust saame plokki väljundvõimsuse väärtuse megavattides. Antud meetod on äärmiselt lihtne, kuid

suhteliselt ebatäpne. Seega edaspidi tuletame Eesti Elektri jaama ekvivalentse kütusekulu suhtelise juurdekasvu karakteristikute väärtused funktsioonide võrrandi arvutamise teel.

4.4.1 Plokkide koormuste ning võimsuste arvutamine plokkide võrdsete suhteliste juurdekasvude printsiibil

Eelmises alapeatükis (4.4) on toodud võimsuste määramismeetodi lahendus graafilisel teel. Siin punktis aga tuuakse nii võimsuste, kui ka koormuste määramist suhtelise juurdekasvu ning kulukarakteristikute funktsiooni võrrandite lahenduse teel. Kuna töös μ Lagrange'i kordaja muudetakse ning kogu arvutus protsess kordub iga uue μ korral, ekvivalentsed karakteristikute väärtused on arvatud programmi Exceli abil. Vaatamata sellele kirjutame välja koormuste ning kütusekulu arvutamist iga ploki karakteristikute korral kasutades näitena $\mu = 3$ Lagrange'i kordajat.

Plokk nr.1,2,3,4,7

Plokkid 1,2,3,4 ja 7 on koondatud ühte, kuna nende karakteristikud on identsed.

plokkide suhtelise juurdekasvu karakteristikute aproksimeerimisel kolmanda astme polünoomiga oli saadud funktsioon:

$$y = 24 * 10^{-6}x^3 - 0,0006x^2 + 0,59x - 0,0041$$

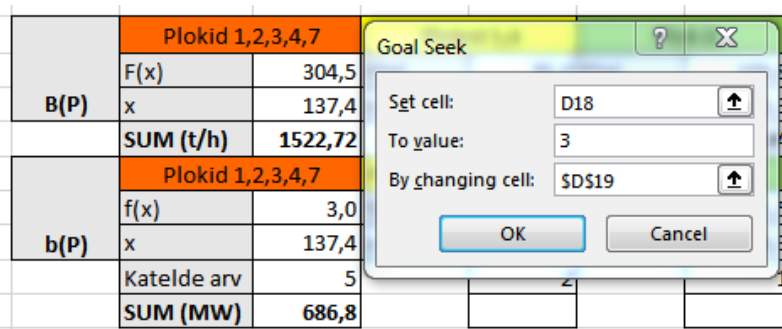
Seega asendades y tundmatud $\mu = 3$ saame:

$$24 * 10^{-6}x^3 - 0,0006x^2 + 0,59x - 0,0041 = 3$$

Kus võrdlusest avaldatud x väärtus on

$$x = 137,4 \text{ MW}$$

Arvutusvea elimineerimiseks võrrandid on sammuti lahendatud Exceli, alamprogrammiga Goal Seek. (Joonis 4.4.2)



Joonis 4.3 Ekvivalentsete karakteristikute väärtuste arvutusprogramm (plokkid 1,2,3,4,7)

Seega $\mu = 3$ väärtusel Plokkide väljund võimsus on 137,4 MW ploki kohta. Arvestades, et antud funktsiooniga plokkide arv on 5, siis programm arvutab automaatselt antud tüüpi plokkide summaarse väljund võimsuse. Tulemuseks on **686,8 MW**.

Teades plokki koormust ning sama plokki kütusekulu karakteristikut $B(P)$ võrrandi. Plok kütuse kulu avaldub järgmiselt :

$$B(P)_{1,2,3,4,7} = 6 * 10^{-7}x^4 - 0,0002x^3 + 0,0295x^2 - 0,0041x + 53,231$$

Teades, et $\mu = 3$ plokkide koosseisus antud ploki koormus P on 137,4 MW, saame asendada antud koormus ploki kütusekulu karakteristikutu võrrandisse ning saame:

$$B(P)_{1,2,3,4,7} = 6 * 10^{-7} * (137,4)^4 - 0,0002 * (137,4)^3 + 0,0295 * (137,4)^2 - 0,0041 * (137,4) + 53,231 = 304,5 \text{ t/h}$$

Kuna antud võrrandiga on meil 5 plokki, summaarne kütusekulu on avaldatud järgmiselt:

$$B(P)_{1,2,3,4,7} = B(P)_n * n = 304,5 * 5 = \mathbf{1522,72 \text{ t/h}}$$

Plokid nr. 5,6

Plokid 5 ja 6 on koondatud ühte, kuna nende karakteristikud on identsed.

plakkide suhtelise juurdekasvu karakteristikutu aproksimeerimisel kolmanda astme polünoomiga oli saadud funktsioon:

$$y = 8 * 10^{-7}x^3 + 3 * 10^{-15}x^2 + 0,0002x + 1,0592$$

Seega asendades y tundmatud $\mu = 3$ saame:

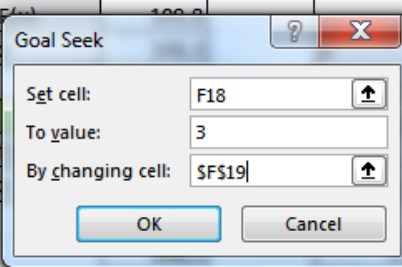
$$8 * 10^{-7}x^3 + 3 * 10^{-15}x^2 + 0,0002x + 1,0592 = 3$$

Kus võrdlusest avaldatud x väärtus on

$$x = 133,7 \text{ MW}$$

Arvutusvea elimineerimiseks võrrandid on sammuti lahendatud Exceli, alamprogrammiga Goal Seek. (Joonis 4.4.3)

	Plokid 1,2,3,4,7	Plokid 5,6	Plok 8	
B(P)	F(x)	304,5	F(x)	207,5
	x	137,4	x	133,7
	SUM (t/h)	1522,72		414,91
	Plokid 1,2,3,4,7	Plokid 5,6		
b(P)	f(x)	3,0	f(x)	3,0000
	x	137,4	x	133,7
	Katelde arv	5		2
	SUM (MW)	686,8		267,5



Joonis 4.4 Ekvivalentsete karakteristikute väärtuste arvutusprogramm (plokid 5,6)

Seega $\mu = 3$ väärtusel Plokkide väljund võimsus on 133,7 MW ploki kohta. Arvestades, et antud funktsiooniga plokkide arv on 2, siis programm arvutab automaatselt antud tüüpi plokkide summaarse väljund võimsuse. Tulemuseks on **267,5 MW**.

Teades plokki koormust ning sama ploki kütusekulu karakteristikut $B(P)$ võrrandi. Plokkide kütusekulu avaldub järgmiselt :

$$B(P)_{5,6} = 2 * 10^{-7}x^4 + 1 * 10^{-15}x^3 + 0,0001x^2 + 1,0592x + 9 * 10^{-10}$$

Teades, et $\mu = 3$ plokkide koosseisus antud ploki koormus P on 133,7 MW, saame asendada antud koormust ploki kütusekulu karakteristikut võrrandisse ning saame:

$$B(P)_{5,6} = 2 * 10^{-7} * 133,7^4 + 1 * 10^{-15} * 133,7^3 + 0,0001 * 133,7^2 + 1,0592 * 133,7 + 9 * 10^{-10} = 207,5 \text{ t/h}$$

Kuna antud võrrandiga on meil 2 plokki, summaarne kütusekulu on avaldatud järgmiselt:

$$B(P)_{5,6} = B(P)_n * n = 207,5 * 2 = \mathbf{415 \text{ t/h}}$$

Plokk nr. 8

Ploki suhtelise juurdekasvu karakteristikut aproksimeerimisel kolmanda astme polünoomiga oli saadud funktsioon:

$$y = 3 * 10^{-18}x^3 + 9 * 10^{-5}x^2 + 0,0064x + 1,1382$$

Seega asendades y tundmatud $\mu = 3$ saame:

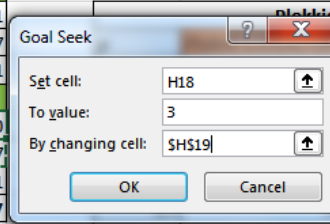
$$3 * 10^{-18}x^3 + 9 * 10^{-5}x^2 + 0,0064x + 1,1382 = 3$$

Kus võrdlusest avaldatud x väärtus on

$$x = \mathbf{183,7 \text{ MW}}$$

Arvutusvea elimineerimiseks võrrandid on sammuti lahendatud Exceli, alamprogrammiga Goal Seek. (Joonis 4.4.4)

	Plokid 1,2,3,4,7	Plokid 5,6	Plok 8			
B(P)	F(x)	304,5	F(x)	207,5	F(x)	273,1
	x	137,4	x	133,7	x	183,7
	SUM (t/h)	1522,72		414,91		273,11
	Plokid 1,2,3,4,7	Plokid 5,6	Plok 8			
b(P)	f(x)	3,0	f(x)	3,0000	f(x)	3,0
	x	137,4	x	133,7	x	183,7
	Katelde arv	5		2		1
	SUM (MW)	686,8		267,5		183,7



Joonis 4.5 Ekvivalentsete karakteristikute väärtuste arvutusprogramm (plokk nr. 8)

Seega $\mu = 3$ väärtusel plokkide väljund võimsus on 183,7 MW ploki kohta. Arvestades, et antud funktsiooniga plokkide arv on 1, siis programm arvutab automaatselt antud tüüpi plokkide summaarse väljund võimsuse. Tulemuseks on **183,7 MW**.

Teades ploki koormust ning sama ploki kütusekulu karakteristikut $B(P)$ võrrandi. Plokkide kütusekulu avaldub järgmiselt :

$$B(P)_8 = 9 * 10^{-19}x^4 - 3 * 10^{-5}x^3 - 0,0032x^2 + 1,1382x - 14$$

Teades, et $\mu = 3$ plokkide koosseisus antud ploki koormus P on 183,7 MW, saame asendada antud koormust ploki kütusekulu karakteristikuga võrrandisse ning saame:

$$\begin{aligned} B(P)_8 &= 9 * 10^{-19} * 183,7^4 - 3 * 10^{-5} * 183,7^3 - 0,0032 * 183,7^2 + 1,1382 * 183,7 - 14 \\ &= 273,1 \text{ t/h} \end{aligned}$$

Kuna antud võrrandiga on meil ainult 1 plokk, summaarne kütusekulu on avaldatud järgmiselt:

$$B(P)_8 = B(P)_n * n = 273,1 * 1 = \mathbf{273,1 \text{ t/h}}$$

4.4.2 Plokkide koormuste arvutus erinevatel μ väärtustel

Vastavalt ekvivalentsete karakteristikute lahendusmeetodile, plokkide koormuste ning kulu arvutatakse suhtelise juurdekasvu võrdsuse printsiibil, kus μ väärtusi pidevalt muudetakse alates minimum väärtusest ning suurendades, kuni μ suurendamine enam ei suurenda elektrijaama summaarset väljund võimsust.

Lahenduse meetodi toimimise põhiliseks eelduseks on suhtelise juurdekasvu karakteristikute modifitseerimine, vastavalt peatükk 4.3 toodud teooriale.

Esiteks tuleks määrata suhtelise juurdekasvude miinimum ning maksimum väärtused. Eesti Elektrijaama tuletatud $b(P)$ funktsioonide ühine μ miinimum on 1,1 ning maksimumiks on 5,38. Antud nähtust saab näha ka peatükk 4.3 joonisel (Joonis 4.4.5).

Kui μ väärtuste vahemik on leitud, valime μ kasvu sammu. Teoreetiliselt ekvivalentse karakteristiku graafilise määramiseks piisab 3st punktist, kuid siis ekvivalentse karakteristikuga graafik võib olla

ebatäpne. Ekvivalentse graafiku kõrgema täpsuse saavutamiseks μ väärtuse kasvamine sammuks on valitud 0,5.

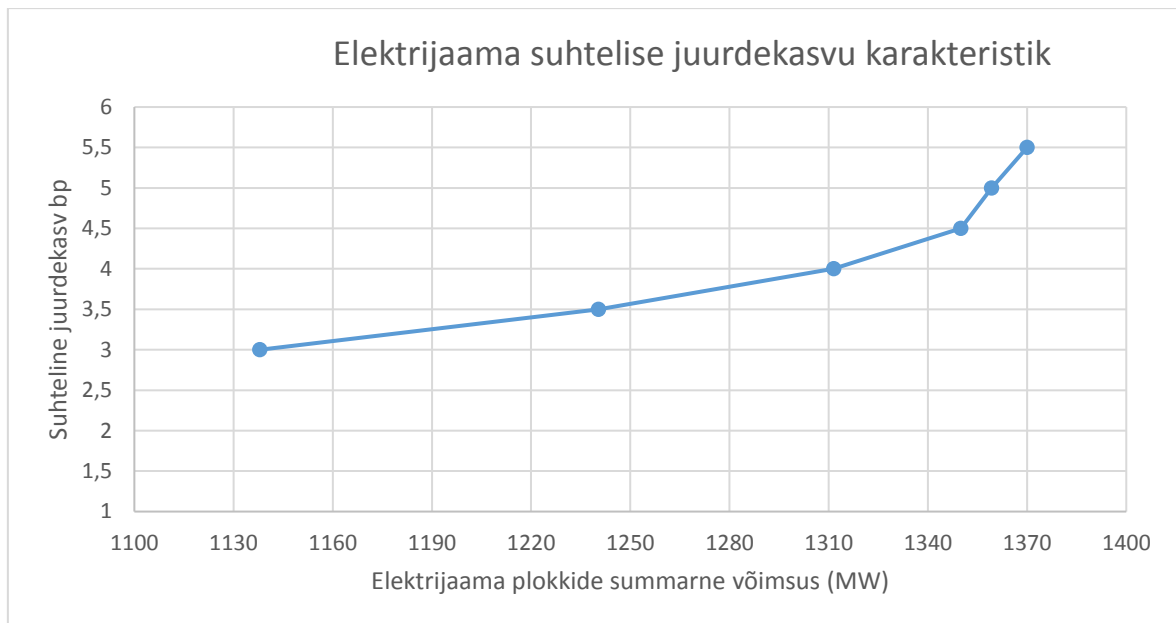
Kuigi Suhtelise juurdekasvu μ väärtuseks miinimum on 1,1 edaspidi on miinimumiks kasutatud 3, sest alates sellest on kõik 8 plokki sisselülitatud. Vastasel juhul antud meetodi kõrval peaksime sammuti arvestama plokkide koosseisu. Igakord kui seesolevate plokkide arv muutub tuleb läbi teha uus iteratsioon ehk muutub ka μ väärtus.

Järgnevalt programmiga Excel ning selle alaprogrammiga Goal Seek on välja arvatud Ekvivalentse karakteristiku koormused ning antud koormustel elektrijaama plokkide summaarne kulu. Kulu ja väljund võimsuse väärtused on koondatud tabelisse (4.1)

Tabel 4.1 Ekvivalentse suhtelise juurdekasvu karakteristiku väärtused

Plokkide summaarne ekvivalentne P				
μ	Plokid 1,2,3,4,7 (MW)	Plokid 5,6 (MW)	Plok 8 (MW)	SUM P (MW)
3	686,8	267,5	184,6	1138,9
3,5	756,5	288,9	195	1240,4
4	808,9	307,6	195	1311,5
4,5	825	324,2	195	1344,2
5	825	339,3	195	1359,3
5,5	825	350	195	1370

Antud tabeli väärtuste alusel saame ehitada Eesti Elektriijaama kütusekulu suhtelise juurdekasvu ekvivalentse karakteristiku graafiku. Selliseid karakteristikuid edaspidi kasutatakse kogu energiasüsteemide talitluse optimeerimisel, mis ei kuulu antud uurimustöö töömahtu. Elektriijaama ekvivalentne suhtelise juurdekasvu karakteristik on toodud all joonisel (joonis 4.4.5.)



Joonis 4.6 Elektrijaama plokkide summaarne suhtelise juurdekasvu karakteristik

Antud suhtelise juurdekasvu ekvivalentse karakteristik näitab, mis on plokkide summaarne väljund netovõimsus, antud μ väärtusel, eeldusel et koormusjaotus kondensatsioon plokkide vahel on optimaalne. Koormusjaotus optimaalsus on saavutatud plokkide suhtelise juurdekasvude võrdsuse printsiibi abil.

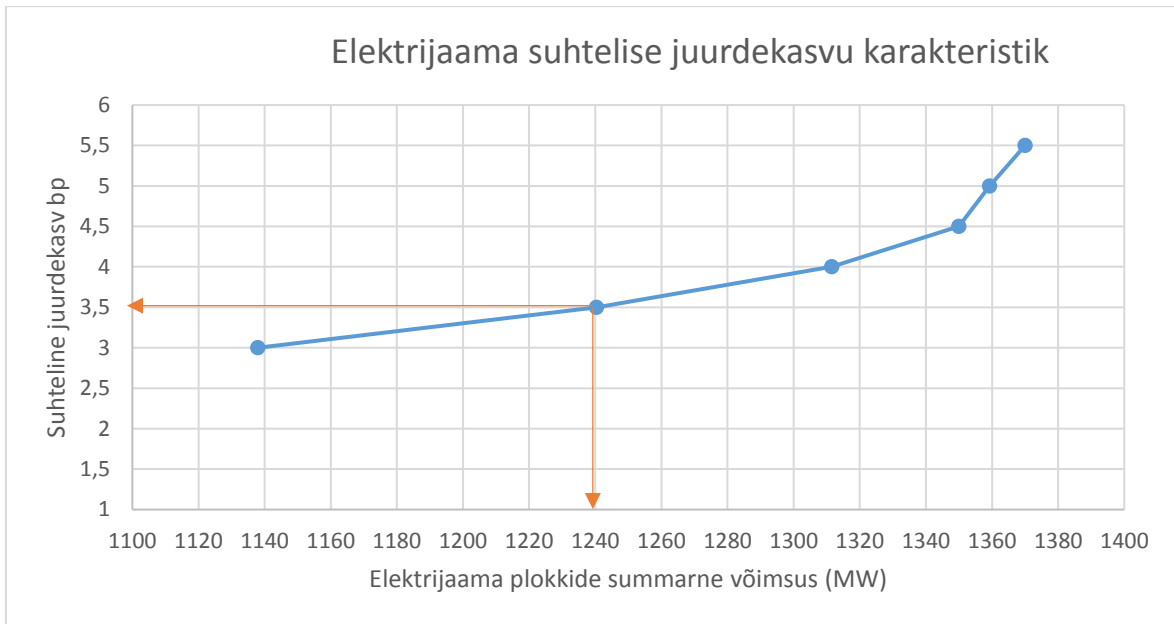
4.5 Eesti SEJ optimeeritud koormusjaotus

Eelmise peatüki tulemusena oli saadud Eesti Elektrijaama ekvivalentne suhtelise juurdekasvu karakteristik (Joonis 4.4.5). Mille abil saab valida plokkide optimaalset koormusjaotust. Küll aga ekvivalentse karakteristik miinuseks on, et karakteristikule otsa vaadates, ei saa kohe aru kuidas koormata plokkide omavahel, nii et oleks koormusjaotus optimaalne. Seega järgmisena tuleb ekvivalentse karakteristik ning optimaalse koormusjaotuse seose ning printsiibi selgitus.

4.5.1 Ekvivalentne suhtelise juurdekasvu karakteristik

Ekvivalentne suhtelise juurdekasvu karakteristik (4.4.5) näitab seost plokkide summaarse väljund netovõimsust ja suhtelise juurdekasvu väärtuse (μ) vahel. Seega plokkide vaheline koormusjaotus ette antud väljund netovõimsusel toimub järgmiselt:

- 1) Esiteks vaja teada netovõimsust, mida Eesti Elektrijaam peab genereerima.
Oletame, et energiasüsteem vajab 1240 MW.
- 2) Järgmiselt peame siduma nõutud elektri võimsust μ väärtusega ehk ploki suhtelise juurdekasvuga. Toome näide graafiliselt:



Joonis 4.7 Koormusjaotus optimeerimise graafilise selgitus

Antud joonisel on graafiliselt näidatud kuidas seotakse elektrijaama koormust väärtusega μ . Seega, kui nõutud koormus on 1240 MW, siis sellele vastab suhteline juurdekasv väärtusega 3,5.

Arvutamiseks saame μ väärtuse leida asendades x ekvivalentse karakteristikute funktsiooni võrrandisse järgmiselt:

$$y = 2 * 10^{-11}x^4 + 6 * 10^{-8}x^3 + 7 * 10^{-5}x^2 - 0,0251x + 4,3483$$

$$y = 2 * 10^{-11} * 1240^4 + 6 * 10^{-8} * 1240^3 + 7 * 10^{-5} * 1240^2 - 0,0251 * 980 + 4,3483$$

Asendades x ning lahendades võrrandi saame, et $y = \mu = 3,5$

- 1) Teades μ väärtuse - $\mu = 3,5$. Vaatame ekvivalentse karakteristikute koostamisel arvutatud tabelisse (Tabel 4.2):

Tabel 4.2 Eesti SEJ plokkide optimeeritud koormusjaotus

Plokkide summaarne ekvivalentne P				
μ	Plokkid 1,2,3,4,7 (MW)	Plokkid 5,6 (MW)	Plok 8 (MW)	SUM P (MW)
1,1	175	90	65	330
1,5	189,3	161,9	107,8	459
2	345,2	209,5	139,6	694,3
2,5	576	241,9	163,2	981,1
3	686,8	267,5	184,6	1138,9
3,5	756,5	288,9	195	1240,4
4	808,9	307,6	195	1311,5
4,5	825	324,2	195	1344,2
5	825	339,3	195	1359,3
5,5	825	350	195	1370

Tabelist optimaalse koormusjaotuse valimine oleks kõige lihtsam ning kiirem viis koormusjaotuse plokkide vahel valikul. Vastasel juhul peab igakord lahendama x-astme suhtelise juurdekasvu funktsioonide võrrandid iga ploki kohta eraldi. Kuid teades μ väärtuse on see siiski võimalik ning võrrandid toodud all:

a) Plokid nr.1,2,3,4,7 : $y = 24 * 10^{-6}x^3 - 0,0006x^2 + 0,59x - 0,0041$

b) Plokid nr.5,6 : $y = 8 * 10^{-7}x^3 + 3 * 10^{-15}x^2 + 0,0002x + 1,0592$

c) Plokk nr.8 : $y = 3 * 10^{-18}x^3 + 9 * 10^{-5}x^2 + 0,0064x + 1,1382$

Tabeli väärtustes korrektse koormuse saavutamiseks peame väärtuseid jagama Plokkide arvuga, mis on koondatud ühte karakteristikusse.

Eesti SEJ puhul me teame, et meil on 3 karakteristikut, kuid kokku plokkide on 8. Seega peame jaha koormusjaotus plokkide arvuga järgmiselt

a) Plokid nr.1,2,3,4,7 : $y = 24 * 10^{-6}x^3 - 0,0006x^2 + 0,59x - 0,0041$

Kus

$$24 * 10^{-6}x^3 - 0,0006x^2 + 0,59x - 0,0041 = 3,5$$

Kus x_n väärtuseks on saadud 756,5 MW peame jagama n, ehk plokkide arvuga. Teades, et plokkide arv $n = 5$ saame,

$$P_{opt} = \frac{756,5}{n} = \frac{756,5}{5} = 151,3 \text{ (MW/plokk)}$$

b) Plokid nr.5,6 : $y = 8 * 10^{-7}x^3 + 3 * 10^{-15}x^2 + 0,0002x + 1,0592$

Kus

$$8 * 10^{-7}x^3 + 3 * 10^{-15}x^2 + 0,0002x + 1,0592 = 3,5$$

Kus x_n väärtuseks on saadud 288,9 MW peame jagama n, ehk plokkide arvuga. Teades, et plokkide arv $n = 2$ saame,

$$P_{opt} = \frac{288,9}{n} = \frac{288,9}{2} = 144,5 \text{ (MW/plokk)}$$

c) Plokk nr.8 : $y = 3 * 10^{-18}x^3 + 9 * 10^{-5}x^2 + 0,0064x + 1,1382$

Kus

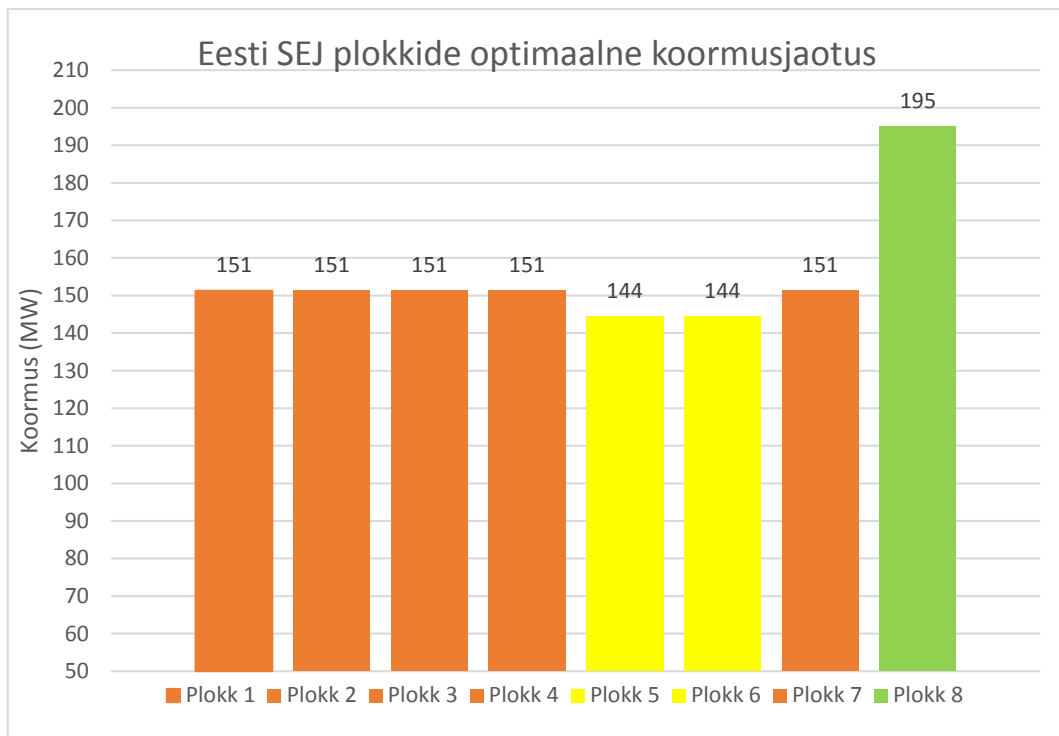
$$3 * 10^{-18}x^3 + 9 * 10^{-5}x^2 + 0,0064x + 1,1382 = 3,5$$

Kus x_n väärtuseks on saadud 184,6 MW peame jagama n , ehk plokkide arvuga. Teades, et plokkide arv $n = 1$ saame,

$$P_{opt} = \frac{195}{n} = \frac{195}{1} = 195 \text{ (MW/plokk)}$$

Viimase sammu võib vahele jätta, kui Elektriijaamas iga karakteristikule vastab ainult 1 energia plokk.

Seega Eesti SEJ plokkide vaheline optimaalne koormusjaotus, koormusel 1240MW oleks järgmine (Joonis 4.8).



Joonis 4.8 Eesti SEJ Optimaalne koormusjaotus ($P_{SUM} = 1240$ MW)

4.6 Koormusjaotuse optimeerimismeetodi kontroll

Eelmistes alapeatükkides oli lahti selgitatud meetodi printsiip ning konkreetsel Elektriijaama koormusel oli toodud koormusjaotuse optimeerimise tulemus. Antud alapeatükis aga leiame elektriijaama summaarse kütusekulu optimeeritud režiimil ning võrdleme neid reaalsete Eesti Elektriijaama 2017. aasta koormusjaotus andmetega.

4.6.1 Optimaalse koormusjaotuse režiimi kütusekulu

Selleks, et edaspidi saaks kontrollida koormusjaotuse optimeerimismeetodi efektiivsust tuleb leida iga μ korral Elektriijaama kütusekulu.

Teades plokki kütusekulu karakteristikut ning teades koormust ehk väljund netovõimsuse saame avaldada kütusekulu ploki kohta järgmiselt:

Esiteks tuletame meelde plokkide kütusekulu karakteristikute võrrandid:

$$\text{Plokid nr.1,2,3,4,7} - F(x) = 6 * 10^{-7}x^4 - 0,0002x^3 + 0,0295x^2 - 0,0041x + 53,231$$

$$\text{Plokid nr.5,6} - F(x) = 2 * 10^{-7}x^4 + 1 * 10^{-15}x^3 + 0,0001x^2 + 1,0592x + 9 * 10^{-10}$$

$$\text{Plokk nr.8} - F(x) = 9 * 10^{-19}x^4 - 3 * 10^{-5}x^3 - 0,0032x^2 + 1,1382x - 14$$

Kütusekulu väärtus on antud võrrandites on $F(x)_{1,2,3,4,7}$, $F(x)_{5,6}$ ja $F(x)_8$ ning x on antud karakteristikutes koormused. Seega asendades iga karakteristikute võrrandites x , eelmises peatükis koormused leiame kütusekulu väärtused. Kontrollimiseks võtame μ väärtuseks 3.

Plokid nr.1,2,3,4,7

$$\text{Plokkide karakteristikute võrrand on} - F(x) = 6 * 10^{-7}x^4 - 0,0002x^3 + 0,0295x^2 - 0,0041x + 53,231$$

Teades et antud plokkide summaarne koormus on 686,8MW, saame :

$$F(x) = 6 * 10^{-7} * 686,8^4 - 0,0002 * 686,8^3 + 0,0295 * 686,8^2 - 0,0041 * 686,8 + 53,231 = \mathbf{1522,74 \text{ t/h}}$$

Plokid nr. 5,6

$$\text{Plokkide karakteristikute võrrand on} - F(x) = 2 * 10^{-7}x^4 + 1 * 10^{-15}x^3 + 0,0001x^2 + 1,0592x + 9 * 10^{-10}$$

Teades et antud plokkide summaarne koormus on 267,5 MW, saame :

$$F(x) = 2 * 10^{-7} * 267,5^4 + 1 * 10^{-15} * 267,5^3 + 0,0001 * 267,5^2 + 1,0592 * 267,5 + 9 * 10^{-10} = \mathbf{414,91 \text{ t/h}}$$

Plokk nr. 8

$$\text{Plokkide karakteristikute võrrand on} - F(x) = 9 * 10^{-19}x^4 - 3 * 10^{-5}x^3 - 0,0032x^2 + 1,1382x - 14$$

Teades et antud ploki koormus on 183,7 MW, saame :

$$F(x) = 9 * 10^{-19} * 183,7^4 - 3 * 10^{-5} * 183,7^3 - 0,0032 * 183,7^2 + 1,1382 * 183,7 - 14 = \mathbf{273,11 \text{ t/h}}$$

Summaarne Eesti SEJ kütusekulu optimaalse koormusjaotusel koormusel 980MW avaldub:

$$F(576)_{1,2,3,4,7} + F(242)_{5,6} + F(163,2)_8 = 737 \text{ t/h}$$

4.6.2 Eesti SEJ optimeerimata koormusjaotuse kütusekulu

Enefit'i poolt edastatud 2017.a koormusjaotus andmetes leidsime koormusjaotust 1138 MW elektrijaama koormusel (Tabel 4.3) :

Tabel 4.3 Eesti SEJ plokkide koormusandmed[12]

Date	Mü	1G	2G	3G	4G	5G	6G	7G	8G	EEJ	EJ koosseis
6.01.2017 4:00	3	170	181	182	77	49	191	73	214	1137	8

Nagu näeme 06.01.2017 04:00 oli Eesti Elektriijaama summaarne netoväljundvõimsus oli 1137MW.

Antud hetke kütusekulu meie ei tea, kuid asendades antud võimsused antud uurimustöös tuletatud plokkide kulukarakteristikute võrranditesse, saame võrrelda neid arvutatud optimeeritud kuluga.

1G:

$$F(x) = 6 * 10^{-7} * 170^4 - 0,0002 * 170^3 + 0,0295 * 170^2 - 0,0041 * 170 + 53,231 = \mathbf{423,6 \text{ t/h}}$$

2G:

$$F(x) = 6 * 10^{-7} * 181^4 - 0,0002 * 181^3 + 0,0295 * 181^2 - 0,0041 * 181 + 53,231 = \mathbf{477 \text{ t/h}}$$

3G:

$$F(x) = 6 * 10^{-7} * 182^4 - 0,0002 * 182^3 + 0,0295 * 182^2 - 0,0041 * 182 + 53,231 = \mathbf{482,2 \text{ t/h}}$$

4G:

$$F(x) = 6 * 10^{-7} * 77^4 - 0,0002 * 77^3 + 0,0295 * 77^2 - 0,0041 * 77 + 53,231 = \mathbf{157,6 \text{ t/h}}$$

5G:

$$F(x) = 2 * 10^{-7} * 49^4 + 1 * 10^{-15} * 49^3 + 0,0001 * 49^2 + 1,0592 * 49 + 9 * 10^{-10} = \mathbf{53,3 \text{ t/h}}$$

6G:

$$F(x) = 2 * 10^{-7} * 191^4 + 1 * 10^{-15} * 191^3 + 0,0001 * 191^2 + 1,0592 * 191 + 9 * 10^{-10} = \mathbf{472,1 \text{ t/h}}$$

7G:

$$F(x) = 6 * 10^{-7} * 73^4 - 0,0002 * 73^3 + 0,0295 * 73^2 - 0,0041 * 73 + 53,231 = \mathbf{149,4 \text{ t/h}}$$

8G:

$$F(x) = 9 * 10^{-20} * 214^4 - 0,00003 * 214^3 - 0,0032 * 214^2 + 1,1382 * 214 - 14 = \mathbf{377 \text{ t/h}}$$

Summaarne kütusekulu = 423,6 + 477 + 482,2 + 157,6 + 53,3 + 472,1 + 149,4 + 377 = **2592,2 t/h**

Sarnaselt on välja arvatud kütuse kulud optimaalse koormusjaotuse puhul kõikide eelmainitud μ väärtuste puhul varem näidatud programmi abil. Kütusekulud on toodud järgmises tabelis (Tabel 4.4).

Tabel 4.4 Optimaalrežiimi elektrijaama kütusekulud

Plokkide summaarne ekvivalentene B				
μ	Plokid 1,2,3,4,7 (t/h)	Plokid 5,6 (t/h)	Plok 8 (t/h)	SUM B (t/h)
3	1522,6	414,9	275,8	2213,3
3,5	1748,1	484,4	308,7	2541,2
4	1944,3	554,3	308,7	2807,3
4,5	2009,9	624,9	308,7	2943,6
5	2009,9	696,6	308,7	3015,2

Summaarne kütuse kulu annab küll hea ülevaade optimeerimismeetodist, kuid siiski hinnang jääb pigem pealiskaudseks. Selleks, et hinnata optimeerimismeetodi efektiivsust, kütusekulud olid arvatud reaalse koormusjaotustele Eesti Elektri jaamas, kus koormusteks olid võetud reaalsed 2017.a. Enefit'i andmed.

Võrdlus on toodud järgmises tabelis (Tabel 4.5)

Tabel 4.5 Eesti SEJ kütusekulu erinevatel koormusjaotusel (2017.a andmed / optimeeritud)

Date	Mü	1G	2G	3G	4G	5G	6G	7G	8G	EEJ	EJ koosseis	kulu	Opt kulu	
6.01.2017 4:00	3	170	181	182	77	49	191	73	214	1137	8	2592,2	2213,3	
27.02.2017 19:00	3,5	165	182	180	171	88	182	171	99	1238	8	2579,0	2345,7	
17.08.2017 9:00	4	174	170	180	177	188	170	163	94	1316	8	2875,0	2807,3	
6.01.2017 20:00	4,5	185	179	157	182	160	194	79	214	1350	8	3082,0	2943,6	
4.08.2017 15:00	5	184	184	180	182	174	177	182	95	1358	8	3027,0	3015,2	
												SUM (t/h)	14155,2	13325,1
												Delta %	-5,86%	

Võrdlustabelist on näha, et antud uurimustöös kasutatud meetod töötab ning keskmine kütusekulu sääst Eesti Elektri jaamas oleks 5,86%. Seega meetodit ning tehtud arvutusi võib lugeda edukaks.

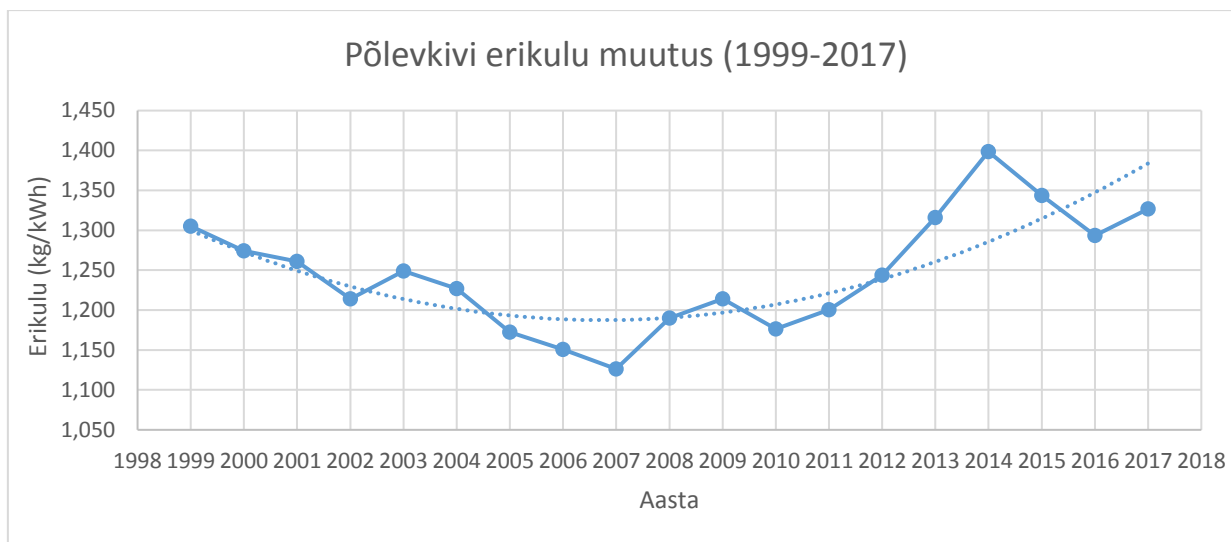
5. PÕLEVKIVI ERIKULU ANALÜÜS

Statistikaameti poolt väljaantud aastane majandusstatistika alusel on koostatud tabel, kus vaadeldakse Eestis põlevkiviga toodetud elektrienergia ning selle tootmiseks kulu.

Tabel 5.1 Põlevkivi erikulu (1999-2017) [17]

	Tarbimine		Tootmine				
2017	13212	kt	9958	GWh		Erikulu	1,327 kg/kWh
	13212000000	kg	9958000000	kWh			
2016	12328	kt	9532	GWh		Erikulu	1,293 kg/kWh
	12328000000	kg	9532000000	kWh			
2015	10450	kt	7778	GWh		Erikulu	1,344 kg/kWh
	10450000000	kg	7778000000	kWh			
2014	14330	kt	10246	GWh		Erikulu	1,399 kg/kWh
	14330000000	kg	10246000000	kWh			
2013	14975	kt	11380	GWh		Erikulu	1,316 kg/kWh
	14975000000	kg	11380000000	kWh			
2012	12053	kt	9691	GWh		Erikulu	1,244 kg/kWh
	12053000000	kg	9691000000	kWh			
2011	13075	kt	10890	GWh		Erikulu	1,201 kg/kWh
	13075000000	kg	10890000000	kWh			
2010	12974	kt	11028	GWh		Erikulu	1,176 kg/kWh
	12974000000	kg	11028000000	kWh			
2009	9302	kt	7663	GWh		Erikulu	1,214 kg/kWh
	9302000000	kg	7663000000	kWh			
2008	11446	kt	9618	GWh		Erikulu	1,190 kg/kWh
	11446000000	kg	9618000000	kWh			
2007	12825	kt	11387	GWh		Erikulu	1,126 kg/kWh
	12825000000	kg	11387000000	kWh			
2006	10095	kt	8772	GWh		Erikulu	1,151 kg/kWh
	10095000000	kg	8772000000	kWh			
2005	10892	kt	9289	GWh		Erikulu	1,173 kg/kWh
	10892000000	kg	9289000000	kWh			
2004	11661	kt	9505	GWh		Erikulu	1,227 kg/kWh
	11661000000	kg	9505000000	kWh			
2003	11691	kt	9360	GWh		Erikulu	1,249 kg/kWh
	11691000000	kg	9360000000	kWh			
2002	9383	kt	7729	GWh		Erikulu	1,214 kg/kWh
	9383000000	kg	7729000000	kWh			
2001	9630	kt	7636	GWh		Erikulu	1,261 kg/kWh
	9630000000	kg	7636000000	kWh			
2000	9829	kt	7714	GWh		Erikulu	1,274 kg/kWh
	9829000000	kg	7714000000	kWh			
1999	9956	kt	7628	GWh		Erikulu	1,305 kg/kWh
	9956000000	kg	7628000000	kWh			

Parema ettekujutuse on koostatud erikulu graafik, kus näeme antud perioodi erikulu muutust.



Joonis 5.1 Põlevkivi erikulu muutus 1999-2017a. Perioodil [17]

Erikulu graafikult on näha, et alates 2007. aastast on erikulu on kasvanud, kus 2014. aastal oli põlevkivi summaarne erikulu maksimum, kus 1kWh elektrienergia tootmiseks kulus 1,4 kg põlevkivi, võrreldes 2007. aastaga oli erikulu 1,126 kg/kWh.

Arvestades tehnoloogilist pidevat arengut antud tendents on pigem negatiivne. EEES 2015 infopäevaaval R.Odirami poolt oli toodud kaks peamist tegurit:

- Tuuleenergeetika kiire areng
- Elektrituru avanemine

Mõlemad tegurid on toonud Eesti elektrienergia süsteemile ebatasakaalustatud elektritarbimist, mis väidetavalt omakorda suurendab põlevkivi elektriijaamade plokkide sisse-väljalülitamist kasvu. Seega antud teooria põhiselt erikulu kasv on seotud plokkide sisselülitustega, kuna plokki külmast olekust käivitamine on väga kulukas.[18]

Teooria kontrolliks Eesti Energia poolt on küsitud viimaste viie aasta käivitused. Turbiinide käivitused aastate lõikes on toodud all:

Tabel 5.1 Eesti SEJ plokkide sisselülituste arv ning EE erikulu

Aasta	2014	2015	2016	2017
Plokkide sisselülituste arv	59	121	141	175
P.kivist toodud El.Energia (GWh)	10246	7778	9532	9958
Tarbitud kütus (kilotonn)	14330	10450	12328	13212
Erikulu	1,399	1,344	1,293	1,327

Nagu näha Erikulu ei ole otseselt seotud plokkide käivituste numbriga. 2014. aastal kui Eesti Elektri jaamas oli kõige vähem sisselülitusi, Eesti keskmine põlevkivi erikulu oli maksimaalne. Seega leitud andmete põhjal on pigem vastuolus eeltoodud teooriaga.

Kuigi sammuti tuleks arvestada, et Eesti energia poolt edastatud energia plokkide sisselülituste arv (tabel 5.1) hõlmab vaid vaid turbiini ja ühe katla käivitusi. Seega edastatud andmetes puudub info teise plokki käivitused, mis on sammuti oluline lõpliku otsuse tegemisel, kuna tegu on duubelplokkidega, kus olenevalt energia plokki koormusest töösse viiakse kas üks või katelt ühe turbiini kohta.

Tuues paralleeli 2012 aastal oli Eesti elektri jaamas 478 katelde käivitusi [22]. Võrreldes Eesti energia poolt saadud andmetega 2012. aastal oli Energia plokkide lülitusi vaid 88. Seega vahe on ligikaudu viiekordne.

Selleks et täpsemalt uurida plokkide olemas olevaid energia plokkide sisselülituste arvu ning nende mõju põlevkivi kulule järgnevalt leiame käivituste kulu osakaalu Eesti kogu põlevkivi kulust.

Enamus Eesti põlevkivi kulust on põletatud nii Eesti Elektri jaamas kui ka Balti Elektri jaamas. Kahjuks Balti Elektri jaama plokkide sisselülituste arvu ei ole teada, ainult Eesti elektri jaama omad. Seega edaspidi on võrreldud ainult Eesti Elektri jaama sisselülituste arvu mõju kogu Eesti põlevkivi kuluga.

Alapeatükis 3.1.1 on toodud Eesti Elektri jaama plokkide keskmine käivituskulu – 93,1 tonni tingkütust. Seega selleks, et võrrelda kogu põlevkivi kulu, Eesti aastased põlevkivi kuluga, peame taandame tonni põlevkivi kulu sammuti tingkütuse kuluks.

Teades tingkütuse taandamis valemi:

$$B_{ting} = B * \frac{Q_a^t}{29,31}$$

Kus,

B – kütuse tegelik kulu (t)

B_{ting} – Tingkütuse kulu (t)

Q_a^t – Kütuse kütteväärtus (MJ/t) [19]

Antud valemis B saame tabelist (tabel 13) kus kulu on toodud kilotonnides. Ehk peame korrutame iga aasta väärtused 1000 võrra. Põlevkivi kütteväärtus Q_a^t on sammuti meil varem leitud – 8000 MJ/t. Seega järgnevalt läbi arvutades iga aasta põlevkivi kulu saame:

$$B_{ting,2014} = 14330000 * \frac{8000}{29310} = 3\,911\,293 \text{ (tonni tingkütust)}$$

Sammuti rehkendades iga aasta kohta on saadud järgmine tabel (tabel 5.2)

Tabel 5.2 Eesti põlevkivi kulu tonn tingkütuste ühikutes

Aasta	Tarbitud Kütus (t)	Tarbitud tingkütus (t)
2014	14330000	3911293
2015	10450000	2852269
2016	12328000	3364858
2017	13212000	3606141

Edaspidi selleks, et saada käivituskulu osakaal kogu kütuse kulust leiame Eesti Elektriijaama tingkütusekulu käivitustele. Selleks on läbi korrutatud käivituste arv iga käivituskuluga. Andmed on koondatud järgmises tabelis.

Tabel 5.3 Käivituskulu osakaal kogu aasta kütusekulust

Käivitus kulu (tonn tingkütust)	Aasta	käiv.arv	Tingkütuse kulu käivitustele aastas (t)	Tarbitud Kütus (t)	käivituste kulu osakaal
93,1	2014	59	5492,9	14330000	0,14%
	2015	121	11265,1	10450000	0,39%
	2016	141	13127,1	12328000	0,39%
	2017	175	16292,5	13212000	0,45%

Seega vaatamata, et Balti Elektriijaama käivituste arvu ei ole eelmistes arvutustes arvesse võetud, võib väita, et Eesti põlevkivi erikulu järsk kasv ei ole otseselt seotud käivituste arvu suurenemisega, kuna käivituskulude osakaal kogu tarbitud põlevkivi kulust on märgatavalt alla 1% aasta lõikes.

Seega erikulu järsu kasvu alates 2007. aastast põhjus antud arvutuste põhjal on millegi muus, näiteks toodetud põlevkivi kvaliteedist või katelde ebaefektiivses talitluses.

Vaatamata sellele üks tendents jäis siiski uurimata. Kui lähemalt vaadata tabelile 16. siis näeme, et käivituste arv iga aastaga kasvab. Käivituste arvu suurenemise peamiseks põhjuseks on avatud elektriturg ning selle ebastabiilsus, mis omakorda seotud „roheline“ energia kiire arenguga Euroopas.

Kuna Elektri hind on ebastabiilne ning hind tihti langeb nii madalale, et ratsionaalsem on plokkid tööst välja viia, Eesti Elektriijaamas kasvab plokkide sisse- ja väljalülitamiste arv, toetudes prognoosile. Selle kontrollimiseks Eesti Elektriijaama koosseisu ning koormust tuleb võrrelda samal ajal oleva Elektri börsi hinnaga.

Elektrihinna statistika on saadud Nordpool spoti statistikast [23] ning võrrelda see Eesti energialt saadud koormus statistikaga. Võrdluseks on koostatud järgmine tabel (5.4).

Tabel 5.4 Eesti Elektriijaama koormus ning Elektri hind [23]

Kuupäev	1G	2G	3G	4G	5G	6G	7G	8G	EEJ summaarne (MW)	EEJ koosseis	Börsi elektri hind (EUR)
17.06.2017 4:00	0	160	0	0	0	65	0	95	320	3	21,91 €
22.04.2017 6:00	0	0	0	151	100	61	0	205	517	4	26,97 €
2.09.2017 9:00	0	168	81	181	181	0	0	95	706	5	34,03 €
19.06.2017 19:00	153	153	0	170	180	180	0	95	931	6	31,28 €
27.04.2017 3:00	189	181	184	181	165	190	0	204	1294	7	39,36 €

NordPool spoti hind oli võetud täpsemal samal ajal, kuid ühe tunni nihkega, kuna Nordpool statistika on toodud Rootsi aja järgi GMT +2. Saadud tabeli alusel on näha, et mida madalam on elektri hind, seda vähem on Eesti Elektriijaama koormus, seega seda vähem ka energiaplokke on töös. Välja arvatud üks päev (19.06.2017), ilmselt tol hetkel olid Eesti Elektriijaamal teised põhjused hoida rohkem energiaplokke töös.

6. TULEMUSTE ANALÜÜS

Antud peatükis on lähemalt uuritud toodud koormusjaotuse optimeerimise meetodi efektiivsust. Optimeerimise aluseks oli võetud Eesti Elektriijaama plokkide kasuteguri karakteristikut, mis näitab ploki kasuteguri väärtust ploki väljund neto võimsuse suhet. Kasuteguri karakteristikute alusel olid leitud plokkide kütusekulu juurdekasvu karakteristikud. Juurdekasvu karakteristikute alusel sai edaspidi rakendada μ ehk suhtelisejuurdekasvude võrdsuse printsiibi ning koostada juurdekasvu ekvivalentne karakteristikute meetodit kasutades optimaalse koormusjaotuse tabel ning graafik.

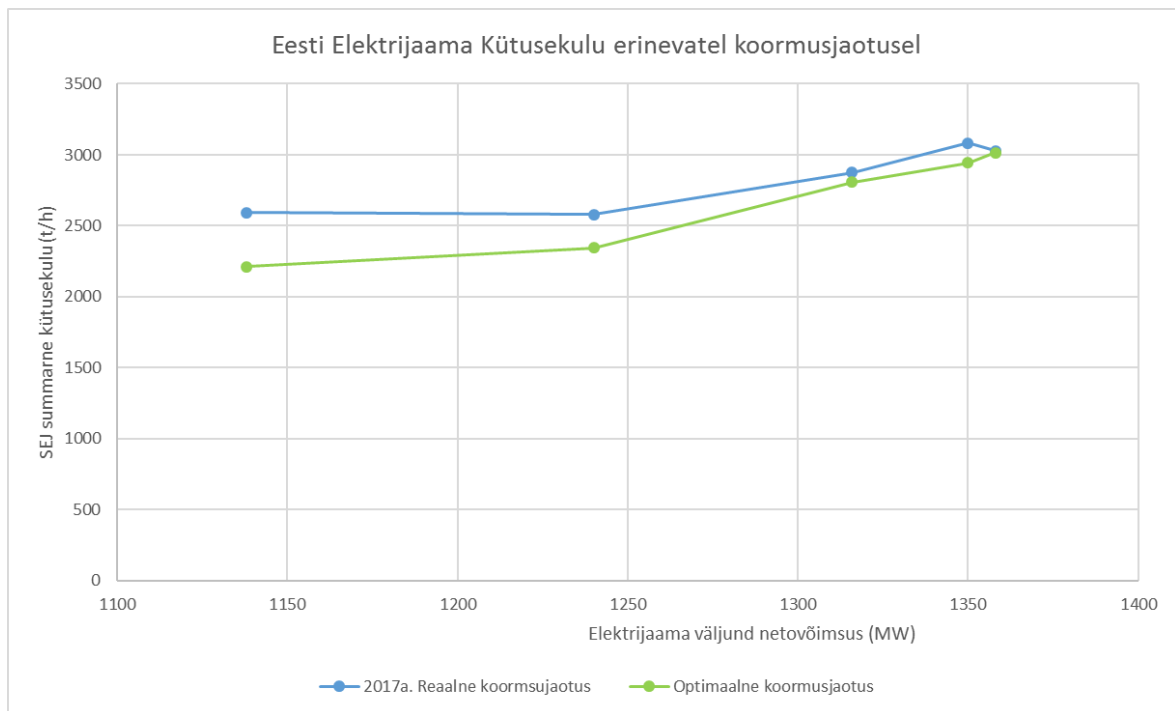
Optimeerimise meetodi efektiivsuse mõõtmiseks on esiteks võrreldud Eesti Elektriijaama 2017.a koormusjaotuse andmed ning väljaarvutatud optimaalset koormusjaotust (Tabel 4.2). Nii reaalse kui ka optimeeritud koormusjaotuse puhul on välja arvutatud summaarsed kütusekulud (Tabel 6.1).

Optimeerimise ülesanne antud uurimusöös oli säästa elektriijaama summaarne kütusekulu iga koormusel. Alljärgnevas tabelis on toodud kütusekulud, parema ülevaatuks reaalse kütusekuluga tabelis (Tabel 6.1) on väljaarvutatud kütusekulu keskmine erinevus, milleks saadi 5,86%. Seega antud meetodi efektiivsuse näitaja on 5,86% Eesti SEJ kütusekulu sääst läbi optimaalse koormusjaotuse.

Tabel 6.1 Koormusjaotuse võrdlustabel (2017 andmed / optimaalne)

Date	Mü	1G	2G	3G	4G	5G	6G	7G	8G	EEJ (MW)	EJ koosseis	kulu
6.01.2017 4:00		170	181	182	77	49	191	73	214	1137	8	2592
Optimaalne	3	137	137	137	137	134	134	136	184	1138	8	2213
27.02.2017 19:00		85	96	92	90	52	140	42	98	1238	8	2579
Optimaalne	3,5	151	151	151	151	144	144	151	195	1240	8	2346
17.08.2017 9:00		153	152	180	81	175	78	162	0	1316	8	2875
Optimaalne	4	162	162	162	162	156	156	162	195	1316	8	2807
6.01.2017 20:00		185	179	157	182	160	194	79	214	1350	8	3082
Optimaalne	4,5	165	165	165	165	165	165	165	195	1350	8	2944
4.08.2017 15:00		166	183	180	171	88	182	171	99	1358	8	3027
Optimaalne	5	165	165	165	165	170	170	165	195	1360	8	3015

Antud tabeli alusel saame sammuti koostada Eesti Elektriijaama kütusekulu karakteristikut (Joonis 6.1).



Joonis 6.1 Eesti Elektriijaama Kütusekulu erinevate koormusjaotuste puhul

Antud graafikust näeme, et optimaalse koormusjaotuse vahe on suurim elektriijaama keskmisel koormusel (1140 – 1250MW), antud vahemikkus optimeerimine mängib suurimat rolli. Lähenedes elektriijaama maksimaal koormusele koormusjaotuse optimeerimine aga mängib väiksemat rolli, sest igal juhul kõik 8 ploki peavad töötama maksimaalse koormuse läheduses.

Kokkuvõttes tulemusi arvestades võib öelda, et optimeerimis ülesanne õnnestus ning määratud optimaalse koormusjaotuse kasutades Eesti Elektriijaamas, suudaks elektriijaam summaarselt säästa 5,86% ainult kütusekulu pealt, antud säästu protsent kasvab veelgi, kui arvesse võtta elektriijaama keskkonna väljaheidet, sest ka need langevad võrdeliselt kütusekulule.

KOKKUVÕTE

Meie energiasüsteemi elektritootmises tänapäeval mängivad suurimat rolli soojuselektrijaamad. Eestis üle 95% elektrienergiat on genereeritud soojuselektrijaamade abil, seejuures 90% neist on just põlevkivi põletavad elektrijaamad. Talitluse optimeerimine toob kaasa kütuse kasutamise efektiivsust, mis omakorda pikendab ka elektrijaama agregaatide eluiga ning toob majanduslikku kasumit soojus- ning elektriturul.

Arvestades teema aktuaalsust, käesoleva magistritöö peaesmärgiks oli uurida valitud Elektrijaama olemasolevat talitlust koormusjaotuse poolelt ning üritada see optimeerida. Katse Soojuselektrijaamaks antud uurimustöös oli valitud Eesti suurim soojuselektrijaam – Eesti Elektrijaam kuna suurtel koormustel on kergem tuvastada efektiivsust ning optimeerimismeetodi mõju.

Kirjanduse läbitöötamisel selgus, et täiusliku optimeerimisülesande lahendamiseks on nõutud suur kogus sisendinfot, millest suurem osa on saadaval vaid katsetusmeetodil. Arvestades piiratud sisendinfot, uurimustöö käigus on kasutatud kohandatud optimeerimismeetodi, mis omakorda põhineb Lagrange'i iteratsioon meetodil. Koormusjaotusoptimeerimise sisend infoks on kasutatud vaid ühte -Eesti Elektrijaama energiablokkide kasuteguri karakteristikut. Seega arvutuste esimese sammuna on tuletatud kõik ülejäänud, optimeerimisülesande jaoks vajalikud energiablokkide karakteristikud. Mingil määral saadud kasuteguri kasutegurikarakteristik lihtsustas edaspidi optimeerimis ülesannet, kuna antud karakteristiku sõltuvuses on kasutatud Energiabloki väljund neto võimsus, seega järgmistes arvutustes võis välja jätta kõik omatarbe kulud.

Optimeerimisülesande lahendamisel on sammuti uuritud energiablokkide koosseisu valikut sõltuvalt koormusest kuna see on väga tähtis osa elektrijaama talitlusel. Sammuti peaesmärgiga paralleelselt on uuritud Energiablokkide käitumist põletades segakütust ning Eesti Energia palvel on analüüsitud Eesti põlevkivi kulu Eesti Elektrijaama andmetel ning Eesti Statistika andmebaasil.

Energia plokkide koosseisu valik on sammuti tähtis osa koormusjaotuse optimeerimisülesandes. Koosseisu valiku tulemusena saime teada, mis järjekorras ning mis ploid tuleks töösse viia sõltuvalt koormusest. Tähtis on õige kogus plokkide töösse viia, kuna madalatel Elektrijaama koormustel ei ole ratsionaalne kõik kaheksa energia plokkide töö hoida. See tooks kaasa vaid üleliigsed kütuse kulud Elektrijaamale.

Eesti põlevkivi kulu on uuritud küll paralleelselt uurimus töö peaesmärgile, kuid ka see on tähtis osa Eesti Elektrijaama talitluse analüüsil. Viimaste aastate jooksul alates 2007-2017 põlevkivi erikulu on kasvanud nagu näha ka joonisel 5.1. Kahjuks olemasolevate sisend andmete alusel lõpliku

põhjust ei ole tuvastatud, ilmselt on neid mitu. Käivituskulu võrdlusele kogu Eesti põlevkivi kuluga, tuldi järeldusele, et otsene seos puudub, kuna käivituskulude osakaal oli märgatavalt alla 1% kogu kulust.

Koormusjaotuse optimeerimise tulemust on võrreldud Enefiti poolt edastatud 2017 aasta käiduandmetega. Võrreldud on teoreetilist ning reaalselt kütusekulu. Tulemuse analüüsi käigus selgus, et optimeeritud koormusjaotusega on kütuse kulu 5,86% madalam.

Tulemuste analüüsi käigus selgus, et antud meetod õnnestus. Saadud säästu tulemus on realistlik ning sobib täiendatud kujul rakendamiseks Eesti Elektriijaama koormusjaotusse järgmistel tingimustel:

- Enefit'i edastatud kasuteguri karakteristik on õige ning piisavalt täpne
- Kasutatakse ainult põlevkivi plokkide kütuseks, kaasaratud plokk nr. 8, Kui plokkis nr. 8 kasutatakse puidu haket koos põlevkiviga ehk segakütust, siis tuleb avaldada kütuse keskmist kütteväärtust toetudes praktikale. Sammuti tuleb arvestada, et sellisel juhul muutub ka 8.plokki karakteristik, ehk optimeerimise protsess tuleb uuesti läbi teha asendades 8. plokki karakteristikut uue funktsiooni võrrandiga.
- Paralleelselt on töös kõik 8 energia plokki
Väiksematel koormustel tuleb energiaplokkid töösse vastavalt peatükis 3 toodud teooriale ning siis uuesti läbi arvutada koormusjaotust.

Kokkuvõttes, püstitatud ülesande täitmist võib pidada õnnestunuks, kuna kõikide paralleelselt töötavate plokkide korral optimeeritud koormusjaotusmeetod tooks kaasa keskmiselt 5,86% madalamad kulud. Kütusekulu erinevus on toodud just aritmeetilise keskmisena, kuna optimaalrežiimi sääst ei ole lineaarne, vaid muutub koormuse muutmisel.

SUMMARY

Thermal power plants play a major role in our energysystem. In Estonia, over 95% of electricity is generated by thermal power plants, where 90% of them are shale-fired power plants. Operation optimization leads to increased fuel consumption efficiency, which in turn extends the lifetime of power plant aggregates and brings economic benefits in the heat and electricity markets.

Considering the relevancy of the topic, the main goal of this Master's thesis was to analyze the existing operation of the selected Power Plant from the loadshare distribution perspective and to try to optimize it. As a test Power Plant in this study was selected Estonia's largest thermal power plant - Estonia Powerplant, as the higher the loads are the easier it is to identify the effect of the the optimization method.

Literature based methods requires large amount of input information, most of which can be only available by real testing. Taking into account limited input information, the research has used a custom optimization method based on the Lagrange iteration method. Estonia Powerplant energy units efficiency characteristic is used as input information. Thus, as a first step in the calculations, all the characteristics of the energy blocks required for the rest of the optimization task are derived. At the same time as efficiency characteristics are based on neto output values the whole process is simplified, so all the cost of own consumptions may have been omitted in the following calculations.

Beside the main task – loadshare optimization, energy unit commitment was also analyzed based on the Powerplant load scale. Additionally in paralleel with the main objective, the behavior of the Energy Units has been studied by burning mixed fuel, and at the request of Eesti Energia, the cost of Estonian oil shale has been analyzed according to the data of the Estonian Power Plant and the Estonian Statistical Database.

Unit Commitment topic is an important part of the load share optimization process, as choosing the energy blocks composition is important base info, which has to be considered prior to load share distribution calculations. As a result of the unit commitment, we will know what order and which blocks should be committed depending on the load. It is important to commit the right amount of blocks into operation, because at low power plant loads it is not rational to keep all eight energy blocks in operation. This would only result to unnecessary fuel costs for the power plant.

The cost of Estonian oil shale has been studied in parallel with the main goal of the study, but it is also an important part of the analysis of the operation of Eesti Power Plant. In recent years, from 2007-2017, the specific fuel cost has increased as seen in Figure 5.1. Unfortunately based on the existing input data the final reason was not defined. Nevertheless comparing the start-up cost to

the total oil-shale consumption in Estonia, it was concluded that there is no direct connection between, as the share of start-up costs was significantly below 1% of the total cost.

The result of optimization of loadshare distribution has been compared with the 2017 loadshare data provided by Enefit. Theoretical and real fuel consumptions were compared. The result of the analysis showed that with optimized loadshare distribution, fuel consumption is 5.86% lower than real one back in 2017.

The results of analysis showed that this method was successful. The results of the savings is realistic and is suitable in improved form for the application of the load distribution of the Eesti Power Plant under the following conditions:

- Enefit's performance characteristics are correct and accurate enough
- Only oilshale shall be used as fuel, including energy unit no. 8.

In case mix of biofuel and oilshale will be used the characteristics will change accordingly, so the optimization calculation must be re-performed by replacing the characteristics of unit no.8 with the new function equation.

- All 8 energy units must work in parallel.

At lower loads Energy units shall be recommitted in accordance with the theory in Chapter 3, and then new load distribution must be recalculated

Overall the goal set in the beginning can be considered successful, as the optimized loadshare distribution method for all units committed in parallel would result in average of 5.86% lower costs. The difference in fuel consumption is given as an arithmetic average, as the optimal mode saving is not linear but changes as soon as load is changed.

KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] „Maailma ressursside aruanne“ 2016. Saadaval: <https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2016/10/World-Energy-Resources-Full-report-2016.10.03.pdf> [Kasutatud 03.11.2018]
- [2] „ Fossiilkütuste globaalne ülevaade“ 2018. Saadaval: <https://ourworldindata.org/fossil-fuels> [Kasutatud 03.11.2018]
- [3] „Eesti Soojuselektrijaam“ Saadaval: http://www.wikiwand.com/et/Eesti_soojuselektrijaam [Kasutatud 12.11.2018]
- [4] „Elektri tarbimine ja tootmine“ Saadaval: <https://elering.ee/elektri-tarbimine-ja-tootmine> [Kasutatud 12.11.2018]
- [5] „Uttegaasi kasutusvõimalused“ Saadaval: https://energiatalgud.ee/img_auth.php/4/4f/Konist,_A._P%C3%B5levkivi%C3%B5li_tootmisel%20_tekkiva_uttegaasi_kasutusv%C3%B5imaluste_uuring.pdf [Kasutatud 04.12.2018]
- [6] Valdma.M., Tammoja,H., Keel,M.“Soojuselektrijaamade talitluse optimeerimine, Tallinn 2008.
- [7] „Eesti Elektrijaam 2015“ Saadaval : <https://en.wikipedia.org/wiki/File:PowerStation3.svg>. [Kasutatud 04.12.2018]
- [8] „Katlatehnika “ [Soojustehnika instituudi konspekt] Saadaval: <http://www.ttu.ee/public/m/Mehaanikateaduskond/Instituudid/soojustehnikainstituut/Katlatehnika.pdf> [Kasutatud 05.12.18]
- [9] Tammoja.H. „Elektrijaamad“ [Elektroenergeetika instituudi loengukonspekt] Tallinn 2012.
- [10] Marina Bachmann, Reilika Ilp, Kaja Kilk, Monika Kopti, Eno Leies, Katriin Loorents, Tiit Metusala, Merlis Nõgene, Katrin Sipelgas, Enna Sirkel, Tuuli Sokmann, Erki Tammiksaar, Eliis Vennik. Aapo Ilves, David Vseviiov „Kukersiit ja konnatahvel, Meie energia lugu“, Tallinn 2014
- [11] „Tootmis piisavuse aruanne 2015“ Saadaval: https://elering.ee/sites/default/files/public/Tootmispiisavuse_aruanne_2015.pdf [Kasutatud 10.12.18]
- [12] Eesti Elektrijaam tunni koormused – Enefit ET 2017 [Eesti Energia materjal] [Kasutatud 22.04.19]
- [13] Talantsev L. „Enefit Energiateotmise ettevõtte talitluse optimeerimine muutuvates tingimustes“ [Magistritöö] Tallinn Taltech 2018

- [14] .Ф. Родатис, А.Н.Полтарецкий „Справочник по котельным установкам малой производительности“ Saadav :
https://www.proektant.org/books/1989/1989_Roddatis_K_F_Poltareckii_A_N_Spravochnik_po_kotelnyh_ustanovkam_maloi_proizvoditelnosti.pdf [Kasutatud 09.01.19]
- [15] Maslakov A. „Heitgaasi väävlipuhastusseade“ TTÜ, 2010
- [16] Vainola A. “Põlevkivi kaevandamise arenguäljavaated” TTÜ 2015.
- [17] “Energia tarbimine ja tootmine” [Eesti Statistika andmed] Saadav: http://pub.stat.ee/px-web.2001/Database/Majandus/02Energeetika/02Energia_tarbimine_ja_tootmine/01Aastastatistika/01Aastastatistika.asp [Kasutatud 04.03.19]
- [18] R.Oidram "Tuuleenergeetika kasvuhuonegaaside kontekstis" [EEES infopäev 2015] Tallinn
- [19] „TTÜ Mehaanikateaduskonna loengumaterjal“ Saadav :
https://energiatalgud.ee/img_auth.php/7/76/TT%C3%9C._Mehaanikateaduskond._K%C3%BCtus.pdf [Kasutatud 21.04.19]
- [20] Allen J. Wood, Bruce F. Wollenberg, Gerald B. Sheble "Power Generation, Operation, and Control Third edition. New Jersey 2014
- [21] „Eleringi tarbimise ja tootmise statistika“ saadaval :
<https://dashboard.elering.ee/et/system/production-and-consumption?period=day&show=graph>
[Kasutatud 07.05.19]
- [22] Smirnova D. „Eesti ja Auvere elektrijaamade võrdlus“ [Bakalaureuse lõputöö], Tallinn, TTÜ 2013
- [23] „Nordpool Spot Elekrihinna statistika“ Saadaval : <https://www.nordpoolgroup.com/historical-market-data/> [Kasutatud 01.05.19]