



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

VKG ENERGIA PÕHJA SEJ KATLATSEHHI TALITLUSE OPTIMEERIMINE

OPTIMAL OPERATION OF BOILER HOUSE IN VKG ENERGIA NORTHERN
THERMAL POWER STATION

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Arina Hrapko

Üliõpilaskood: 163020AAVM

Juhendaja: emeriitprofessor Heiki Tammoja

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.

“.....” 201.....

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

“.....” 201.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”201... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Elektroenergeetika ja mehatroonika instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Arina Hrapko, 163020AAVM
Õppekava, peeriala: Elektroenergeetika, AAVM02/09
Juhendaja(d): emeriitprofessor Heiki Tammoja, 620 3768

Lõputöö teema:

(eesti keeles) *VKG Energia Põhja SEJ katlatsehi talitluse optimeerimine*

(inglise keeles) *Optimal operation of boiler house in VKG Energia Northern thermal power station*

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Analüüsida jaamast saadud katelde karakteristikud;
2. Võrrelda ja analüüsida tegelikku ning optimaalset koormusjaotust katelde vahel ning välja selgitada, millist efekti see annab;
3. Vaadelda matemaatilist meetodit, mille abil saab optimeerida jaama talitlust piiratud kütusekoguse tingimusel.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Kirjanduse läbitöötamine, andmete kogumine	01.11.2018
2.	Lõputöö koostamine	november – detsember 2018
3.	Töö lõplik versioon	28.12.2018

Töö keel: eesti

Lõputöö esitamise tähtaeg: “.....”201....a

Üliõpilane: “.....”201....a
/allkiri/

Juhendaja: “.....”201....a
/allkiri

SISUKORD

SISSEJUHATUS	6
1. PARALLEELSELT TÖÖTAVATE KATELDE VAHELISE KOORMUSJAOTUSE OPTIMEERIMINE.....	8
1.1 Aurukatel	8
1.2 Aurukatelde karakteristikud	9
1.3 Katla sõltuvuste silumine ja aproksimeerimine (interpolatsioon)	12
1.4 Koormusjaotuse optimeerimine paralleelselt töötavate katelde vahel.....	12
1.4.1 Ülesande püstitus	12
1.4.2 Optimumi tingimused	14
1.4.3 Katelde optimaalse koormusjaotuse tingimused	15
1.4.4 Kasutatavad lahendusmeetodid	17
1.4.5 Langrage'i kordajate iteratsioonimeetod	17
1.4.6 Optimaalkoormuste diagrammi meetod	18
2. VKG ENERGIA PÕHJA SEJ KATELDE KARAKTERISTIKUD	19
2.1 Lähteandmed.....	19
2.2 VKG Energia Põhja SEJ kirjeldus.....	19
2.3 Katelde karakteristikute koostamine ja parameetrite arvutamine	20
2.3.1 Vajalikud arvutused	20
2.3.2 Katel №4	20
2.3.2 Katlad №5, №6, №7 ja №8	22
2.3.2 Katel №9	25
2.4 Katelde karakteristikute analüüs	27
2.4.1 Katel №4	27
2.4.2 Katel №5	29
2.4.3 Katel №9	31
2.4.4 Järeldus	33
3. OPTIMAALNE KOORMUSJAOTUS KATELDE VAHEL.....	34
3.1 Kütusekulude arvutamine katelde võrdsete suhteliste juurdekasvude ja tegelike koormuste puhul	34
3.2 Arvutused	34
3.2.1 Esimene koosseis	34
3.2.2 Teine koosseis.....	37
3.2.3 Kolmas koosseis	38
3.2.2 Neljas koosseis.....	39

3.3 Katlatsehhi optimeerimisest saadud kasum.....	41
4. KOORMUSJAOTUSE OPTIMEERIMINE PIIRATUD KÜTUSEKOGUSE TINGIMUSEL	43
4.1 Üldist.....	43
4.2 Matemaatilise mudeli ülevaade	43
4.3 Lihtsustatud mudel VKG Energia Põhja Soojuselektrijaama jaoks	45
KOKKUVÕTE.....	49
KIRJANDUS.....	51

SISSEJUHATUS

Optimeerimise all mõeldakse mingi protsessi kõige parima variandi valikut kõrgeima efektiivsuse saamiseks. Soojuselektrijaama talitluse optimeerimine on tähtis tehniline ning majanduslik ülesanne. See toob kaasa kütuse kasutamise efektiivsuse tõstmist ja SEJ majanduslikku kasumit soojus- ning elektriturul.

Optimaalse talitluse leidmine koosneb järgmistest etappidest:

1) optimeerimisülesanne püstitamine;

valitakse:

- ajahorisont ja aja vaatlemine pideva või diskreetse parameetrina;
- infoliik;
- sihifunktsioon (sihifunktsioonid) või sihifunktsionaal;
- juhitavad muutujad või protsessid;
- lisatingimused;
- mittejuhitavad muutujad või protsessid.

2) lahendi optimaaltingimuste tuletamine;

3) lahendusmeetodi valimine ja ülesande lahendusalgoritmi koostamine;

4) ülesande optimaalse lahendi leidmine [1], [4].

Soojuselektrijaamade talitluse optimaalse töörežiimi arvutamisel on vajalik lähtuda iga jaama elemendi karakteristikutest, nende eksploateerimise piirangutest, prognoositud tarbijate koormusgraafikutest jms. Samuti tuleb arvestada lisatingimuste (töökindluse nõuded, keskkonnakaitse nõuded, energiakvaliteedinõuded jt.) ja mittejuhitavate faktoritega [4].

Soojuselektrijaamade talitlust on võimalik optimeerida agregadi, elektrijaama, energiasüsteemi ja ühendenergiasüsteemitasandil. Agregadi tasandil optimeeritakse iga katla ja turbiini talitus lokaalsete juhitavate muutujate järgi agregadi mis tahes koormuse juures [1].

Kaasaegne SEJ talitluse optimeerimise ülesannete püstitus omab suurt arvutuslikku keerukust. Optimeerimist ei saa efektiivselt teostada ilma uudse metoodika ja tarkvarata.

Etteantud töös vaadeldakse koormusjaotuse optimeerimist katelde vahel. Kõik vajalikud andmed olid saadud konkreetsest soojuselektrijaamast, milleks on VKG Energia Põhja SEJ. Töö on jagatud neljaks osaks.

Esimeses osas vaadeldakse paralleelselt töötavate katelde vahelise koormusjaotuse optimeerimist kirjanduse alusel. Samas kirjeldatakse katelde karakteristikuid. On antud ülevaade kasutatavatest optimeerimismeetoditest.

Teises osas on toodud katelde karakteristikute arvutused ning saadud karakteristikute analüüs. Lähteandmeteks on VKG Energia Põhja SEJ -st saadud katelde karakteristikud. Arvutused on tehtud kirjandusest leitud valemite ja *Exceli* abil.

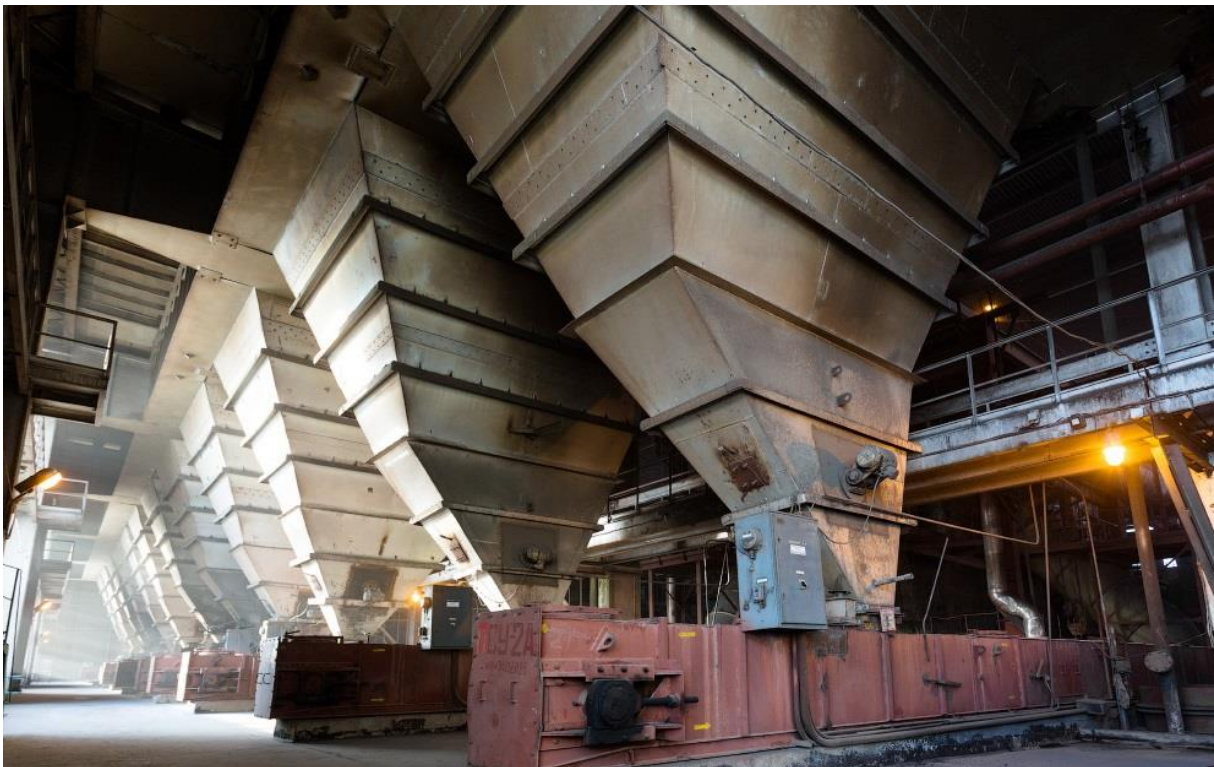
Järgmises osas on toodud katelde kütusekulude arvutused optimaalse koormusjaotuse ja tegelike koormuste puhul. Antud töös vaadeldakse mitu erinevat koosseise: kui mõni katel on tööst välja, kui kaks katelt on tööst välja ning kui kõik katlad töötavad samaaegselt. Samuti on hinnatud jaama optimeerimisest saadud kasum.

Viimases osas käsitletakse jaama talitluse optimeerimist piiratud kütusekoguse tingimusel. On esitatud matemaatiline mudel, mille abil saab optimeerida koostootmisjaama talitlust. Vaadeldud optimeerimismudel on mõeldud konkreetse jaama jaoks.

1. PARALLEELSELT TÖÖTAVATE KATELDE VAHELISE KOORMUSJAOTUSE OPTIMEERIMINE

1.1 Aurukatel

Aurukatel kujutab endast seadet, mis toodab auru kütuse põletamise arvel. Katlasse antakse eelsoojendatud õhku, toitevett ning kütust. Peale soojusenergiat, mis on saadud kütuse põletamisel koldes, katel võib kasutada elektrienergiat (elektriline katel) või utiliseerida soojust, mis vabaneb teistes seadmetes (utilisaatorkatel).



Joonis 1.1 Aurukatlad

Ühise aurumagistraaliga elektrijaamades katlad on paralleeltöös ning toodavad auru ühisse magistraali. See aurumagistraal on katelde väljundite ja turbiinide sisendite põikühendus. Selline soojuselektrijaam annab rohkem võimalusi talitluse optimeerimiseks, kui näiteks plokkjaam.

Katelde koormused (võimsused) eksploateerimisel tavaliselt iseloomustatakse aurutoodanguga D (t/h). Iga katla jaoks kehtestatakse minimaalset D_{min} ja maksimaalset D_{max} koormust. Nende koormustega katel võib pikaajaliselt ja püsivalt töötada ilma kahjulikke tagajärjedeta (tsirkulatsiooni rikkumine, põletamise püsivuse rikkumine jm.) ning samuti töötada lubatud auru parameetrite piires. Katelde minimaalsed ja maksimaalsed koormused võivad tunduvalt muutuda kütuse liigi ja kvaliteedi ning katla seisundi muutumisel.

Küttegaasil ja -masuutil töötavate katelde minimaalsed koormused moodustavad 40-50 % maksimaalsest koormusest. Söel töötavate katelde minimaalsed koormused moodustavad aga 50-70 % maksimaalsest koormusest.

Tehnilistel ja majanduslikel arvutustel, sealhulgas režiimide optimeerimisel, katelde koormusi kõige tihedamini mõõdetakse soojusühikutes $Q, GJ/h$.

1.2 Aurukatelde karakteristikud

Katla ökonoomsust tavaliselt iseloomustatakse selle brutokasuteguri valemiga [2]:

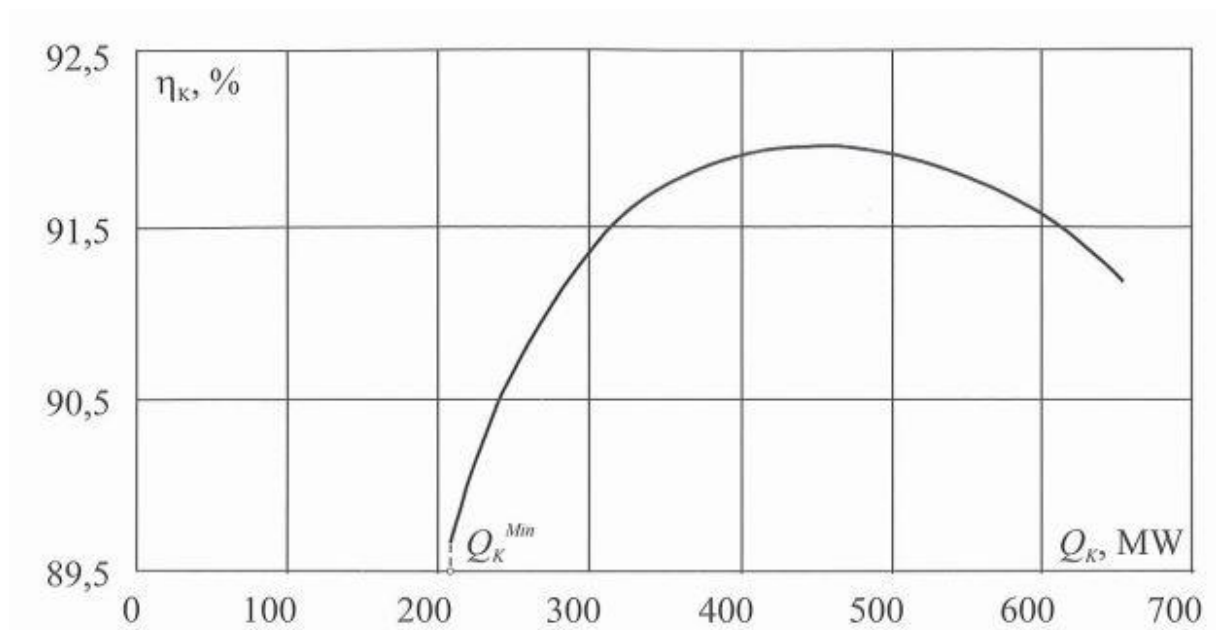
$$\eta = \frac{Q_K}{Q'} = \frac{Q_K}{7B_K} \quad (1.1)$$

kus Q_K – katla soojuskoormus,

Q' – kütusega sisenenud soojus,

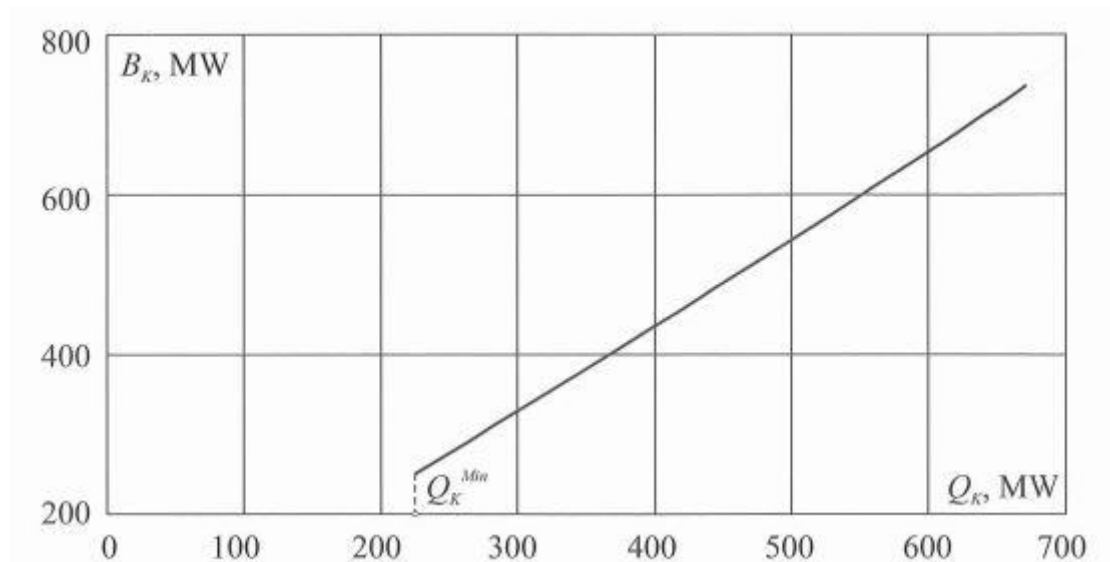
B_K – kütusekulu.

Sõltuvust $\eta(Q_K)$ nimetatakse kasuteguri karakteristikuks ning selle tüüpiline kuju on esitatud joonisel 1.2.



Joonis 1.2 Katla kasuteguri karakteristik [1]

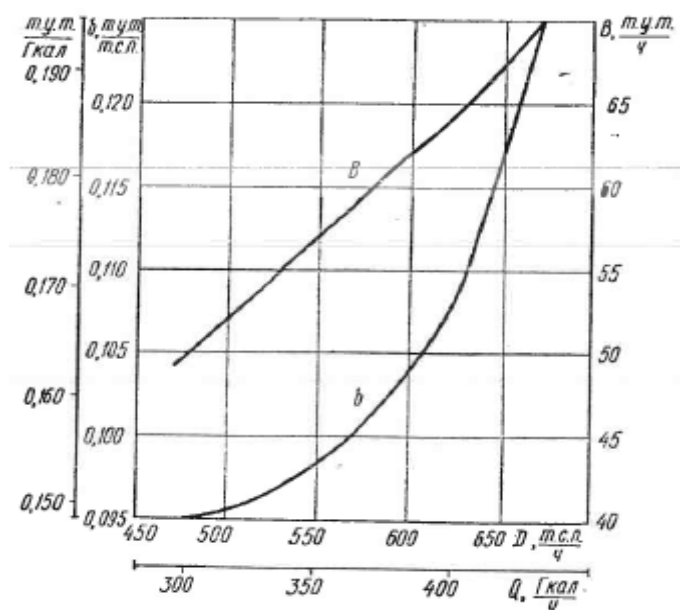
Veel üks tähtsamatest karakteristikutest, mis iseloomustab katlaseadme ökonoomsust, on kulukarakteristik. See kujutab endast seadmesse siseneva energia sõltuvust genereeritavast energiast [11]. Kulukarakteristik on tavaliselt lähedane sirge joonele. Kulukarakteristikute tüüpilised kujud on esitatud joonistel 1.3 ja 1.4.



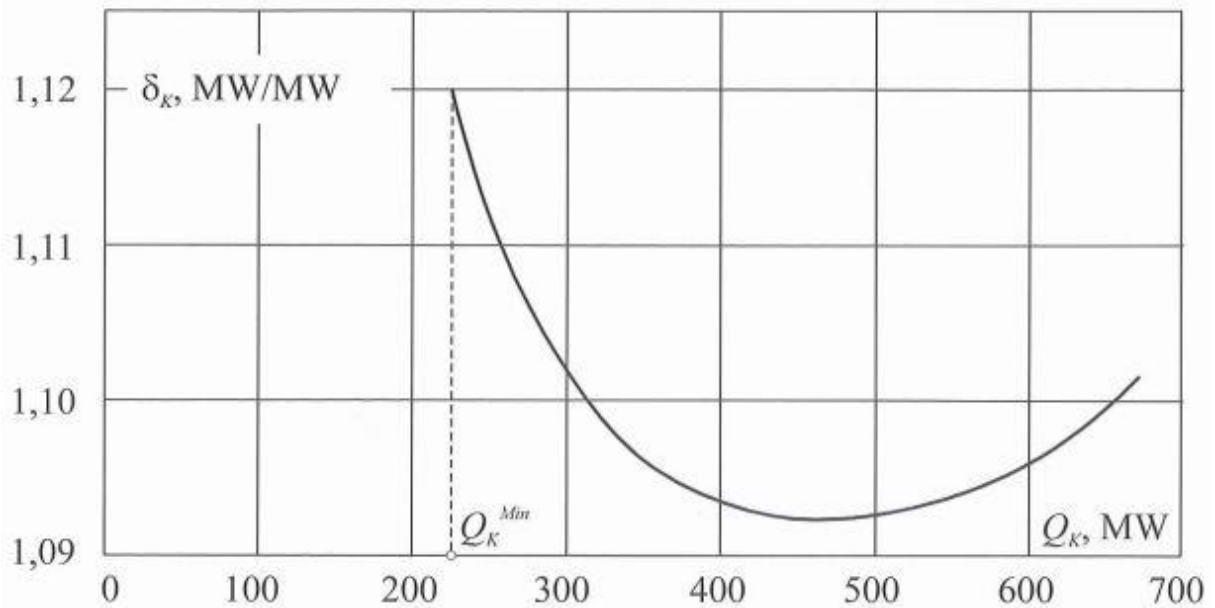
Joonis 1.3 Katla kütusekulu karakteristik [1]

Samuti tihti kasutatakse ka teisi karakteristikuid, sealhulgas:

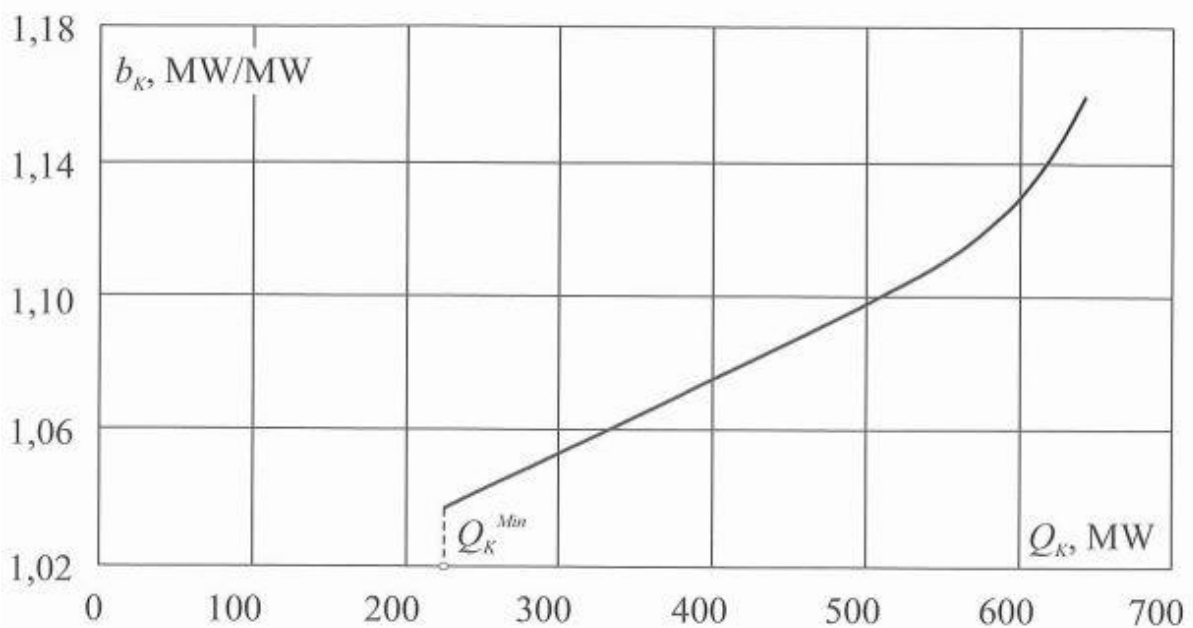
- erikulu karakteristik $\delta = \frac{B}{Q_K} = f(Q_K)$ (joonis 1.4 ja 1.5);
- suhtelise juurdekasvu ehk marginaalkulu karakteristik $b = \frac{dB}{dQ_K} = f(Q_K)$ (joonis 1.6);
- erikao karakteristik $\Delta q = \frac{\Delta Q}{Q_K} = f(Q_K)$.



Joonis 1.4 Katlaseadme majanduslikud karakteristikud (kütuse- ja erikulu karakteristik) [11]



Joonis 1.4 Katla erikulu karakteristik [1]



Joonis 1.5 Katla suhtelise juurdekasvu karakteristik [1]

Katelde karakteristikud võivad olla kõige täpsemalt määratud katsete alusel. Nende puudumisel aluseks võetakse tüüpilisi normeeritud karakteristikuid. Katsete tulemused on tavaliselt ette toodud „punktide“ kujul, mis vastavad koormuse D või Q_K väärtustele, mille juures toimusid katsed. Nende tulemuste põhjal koostatakse siluvaid kõveraid.

Saadud sõltuvusi viiakse sisse katla režiimkaarti ning need on aluseks katla eksploateerimisele, automaatika häälestamisele jms. Peale selle neid võib kasutada paranduste sisse viimiseks katla karakteristikutesse seadme seisundi muutumisel, katla kvaliteedi muutumisel jms.

1.3 Katla sõltuvuste silumine ja aproksimeerimine (interpolatsioon)

Enne loetletud karakteristikutest optimeerimiseks kasutatakse kulu- ja suhtelise juurdekasvu karakteristikuid. Viimane võib olla saadud teiste karakteristikute diferentseerimisel, sealhulgas:

- kulukarakteristik;
- täiskao karakteristik;
- kasuteguri karakteristik [2].

Vältimatud mõõtevead ning kütuse kvaliteedi muutumine põhjustavad katsetel saadud tulemuste laialiminekut. Eriti suur laialimine on tahkekütusel töötavate katelde korral. Nende põhjuste tõttu enne diferentseerimist on vaja siluda katsete tulemusi, see tähendab koostada saadud punktide põhjal siledaid kõveraid.

Enam täpsemaid tulemusi annab kaasaegsete interpolatsiooni meetodite kasutamine. Need seisnevad selles, et siluvat funktsiooni $f(x)$, mille väärtused on esitatud tabeli kujul, asendatakse teise funktsiooniga $\varphi(x)$, mis on avaldatud analüütiliselt (tavaliselt polünoomiga).

1.4 Koormusjaotuse optimeerimine paralleelselt töötavate katelde vahel

1.4.1 Ülesande püstitus

Iga optimeerimisülesanne sisaldab endas kolme komponenti:

- juhitavad ja mittejuhitavad muutujad;
- sihtfunktsioon, mis koosneb nendest muutujatest;
- väärtuste piirangud ja kitsendused.

Koormusjaotuse optimeerimine katelde vahel peab tagama paralleelselt töötavate katelde summaarse kütusekulu minimeerimist. Selles ülesandes katelde elektrilist omatarvet ei arvestata. Eeldusel, et katelde soojuslik omatarve on arvestatud katla karakteristikutes, matemaatiliselt ülesannet püstitatakse järgmiselt [1]:

minimeerida

$$B = \sum_{i=1}^N B_{Ki}(Q_{Ki}) \quad (1.2)$$

lisatingimustel

$$Q_{T\Sigma} - \sum_{i=1}^N Q_{Ki} = 0 \quad (1.3)$$

$$Q_{Ki}^{Min} \leq Q_{Ki} \leq Q_{Ki}^{Max}, \quad i = 1, \dots, N \quad (1.4)$$

kus B – katelde summaarne kütusekulu tunnis,

B_{Ki} – i -nda katla kütusekulu,

Q_{Ki} – i -nda katla soojuskoormus ehk väljundvõimsus,

$B_{Ki}(Q_{Ki})$ – i -nda katla kütusekulu karakteristik,

$Q_{T\Sigma}$ – turbiinide summaarne soojuse tarve,

Q_{Ki}^{Min} – i -nda katla lubatav minimaalne koormus,

Q_{Ki}^{Max} – i -nda katla lubatav maksimaalne koormus.

Lisatingimused (1.3) ja (1.4) on määravad piirid, milles katelde koormused võivad muutuda. Lisatingimus (1.3) on aurumagistraali soojusbilanssi võrrand. Soojusbilanssiga kehtestatakse võrdsust siseneva ja väljuva soojushulka vahel [6]. Selle alusel määratakse kütusekulu, katlaseadme kasuteguri ning töö efektiivsust.

Ülesandes tuleb otsida katelde koormusi, seega on Q_{K1}, \dots, Q_{KN} juhitud muutujad. Mittejuhitavaks muutujateks on katelde sisend-väljund karakteristikud ja nende koosseis, turbiinide summaarne soojustarve ning katelde lubatavad minimaalsed ja maksimaalsed koormused.

Kui kütusekulu karakteristikud on pidevad ning omavad pidevalt kasvavaid tuletisi koormuse Q_{Ki} suurenemisel, siis optimaalse koormusjaotuse ülesande lahendamiseks võib kasutada Langrange'i kordajate meetodit.

Võib öelda, et kui katelde kütusekulu karakteristikud on rangelt kumerad ja eksisteerib vähemalt üks sobiv lahend, mis rahuldab tingimusi (1.3) – (1.4), siis antud ülesandel on ainult üks optimaalne lahend.

1.4.2 Optimumi tingimused

Antud ülesande tarvilikute optimumitingimuste leidmiseks moodustatakse Langrange'i funktsiooni, mis koosneb sihtfunktsiooni ja Langrange'i kordaja ja lisatingimuse korrutise summast. Kui jätta võrratused (1.4) arvestamata, siis Langrange'i funktsioon avaldub kujul:

$$\Phi = \sum_{i=1}^N B_{Ki}(Q_{Ki}) + \mu_K \cdot (Q_{T\Sigma} - \sum_{i=1}^N Q_{Ki}) \quad (1.5)$$

kus μ_K – Langrange'i kordaja.

Sellega on võimalik lahendada optimaalse koormusjaotuse ülesande Langrange'i funktsiooni (1.5) ekstreemumpunktide leidmise abil.

Kui piiravaid võrratusi on rohkem, siis Langrange'i funktsioonil on järgmine kuju [7]:

$$\Phi = \sum_{i=1}^N B_{Ki}(Q_{Ki}) + \sum \mu_K \cdot (Q_{T\Sigma} - \sum_{i=1}^N Q_{Ki}) \quad (1.6)$$

Funktsioon (1.5) omab ainult ühe statsionaarse punkti ning, et saada selle punkti tarvilikke tingimusi, tuleb võtta Langrange'i funktsioonist osatuletisi otsitavate järgi ja võrrutada neid nulliga:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial Q_{Ki}} = \frac{\partial B_{Ki}}{\partial Q_{Ki}} - \mu_K = 0, \quad i = \dots, N \quad (1.7)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \mu_K} = Q_{T\Sigma} - \sum_{i=1}^N Q_{Ki} = 0 \quad (1.8)$$

Võrrandid (1.7) – (1.8) on samal ajal ka koormusjaotuse optimeerimisülesande tarvilikud ja piisavad optimaalsustingimused.

i -nda katla kütusekulu osatuleti $\frac{\partial B_{Ki}}{\partial Q_{Ki}}$ on i -nda katla kütusekulu suhteline juurdekasv (marginaalkulu) katla koormuse järgi, mida tähistatakse b_{Ki} . Kütusekulu suhteline juurdekasv näitab, kuidas muutub agregaat kütusekulu, kui selle koormus suureneb.

Minimaalse kütusekulu tagamiseks on vajalik niisugune koormusjaotus agregaatide vahel, et iga ajahetkel nende agregaatide suhtelised juurdekasvud oleksid võrdsed või teiste sõnadega, et oleks täidetud suhteliste juurdekasvude võrdsuse nõue. Võrrand (1.7) ongi suhteliste juurdekasvude võrdsuse nõue ning seda kirjutatakse tavaliselt järgmisel kujul [1]:

$$b_{K1} = b_{K2} = \dots = b_{KN} = \mu_K \quad (1.9)$$

Suhteliste juurdekasvude võrdsuse printsiibi abil lahendatakse paljud koormusjaotuse optimeerimise ülesandeid. Niisuguse optimeerimise meetodi aluseks on agregaatide suhteliste juurdekasvude karakteristikute võrdlemine. Neid karakteristikuid saadakse kulukarakteristikute diferentseerimisel ja neid nimetatakse samuti diferentsiaalseteks energeetilisteks karakteristikuteks [3]. Sellist meetodit võib kasutada ainult siis, kui katelde kulukarakteristikud on pidevad allapoole kumerad funktsioonid.

Katelde kütusekulu suhteliste juurdekasvude karakteristikud $b_{Ki}(Q_{Ki})$ tuleb modifitseerida nii, et katla minimaalse koormuse puhul karakteristik langeks otse alla, aga maksimaalse koormuse puhul tõuseks otse üles [1]. Teiste sõnadega võib öelda, et kui katla koormus on minimaalne, siis suhtelise juurdekasvu karakteristiku väärtuseks võib olla juhuslik väärtus intervallis $b_{Ki} \geq b_{Ki}(Q_{Ki}^{Max})$. Karakteristikute modifitseerimisega tagatakse, et juhuslikult valitud μ_K puhul katlad töötavad lubatavate koormuste piirides.

Tuleb märgata, et modifitseeritud kütusekulu suhteliste juurdekasvude karakteristikute puhul on täidetud suhteliste juurdekasvude võrdsuse nõue ka lisatingimuse (1.4) puhul, mis oli jäetud arvestamata Lagrange'i funktsiooni moodustamisel. Seega, printsiip kehtib ka siis, kui on arvestatud kitsendused, mis on esitatud võrratuste kujul.

1.4.3 Katelde optimaalse koormusjaotuse tingimused

Kui katelde kütusekulu suhteliste juurdekasvude karakteristikud on pidevad rangelt kasvavad ja eeltoodud viisil modifitseeritud funktsioonid ning, kui katelde koormused on sellised, et on täidetud suhteliste juurdekasvude võrdsuse nõue (1.8), ja μ_K on valitud selline, et on rahuldatud soojusbilansi tingimus, siis võib öelda, et katlad on koormatud optimaalselt.

Seejuures katlad, mille $b_{Ki}(Q_{Ki}^{Min}) \geq \mu_K$, peaksid töötama minimaalse koormusega ja katlad, mille $b_{Ki}(Q_{Ki}^{Max}) \leq \mu_K$, peaksid töötama maksimaalse koormusega [1].

Kui arvestada võrratuskujulise kitsenduse (1.4), siis eeltoodud optimeerimisülesande tarvilikuteks ja piisavateks tingimusteks on [1]:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial Q_{Ki}} = 0, \text{ kui } Q_{Ki}^{Min} \leq Q_{Ki}^0 \leq Q_{Ki}^{Max} \quad (1.9)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial Q_{Ki}} \geq 0, \text{ kui } Q_{Ki}^0 = Q_{Ki}^{Min} \quad (1.10)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial Q_{Ki}} \leq 0, \text{ kui } Q_{Ki}^0 = Q_{Ki}^{Max} \quad (1.11)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \mu_K} = Q_{T\Sigma} - \sum_{i=1}^N Q_{Ki}^0 = 0 \quad (1.12)$$

$$Q_{Ki}^{Min} \leq Q_{Ki}^0 \leq Q_{Ki}^{Max}, \quad i = 1, \dots, N \quad (1.13)$$

kus Q_{Ki}^0 – i -nda katla optimaalne koormus.

Kirjutades neid avaldise lahti ning kasutades mõningaid matemaatilisi tehteid, saame tingimuste (1.9) – (1.13) asemel järgmised võrrandid ja võrratused [1]:

$$b_{Ki} = \mu_K^0, \text{ kui } Q_{Ki}^{Min} \leq Q_{Ki}^0 \leq Q_{Ki}^{Max}, \quad i = 1, \dots, N \quad (1.14)$$

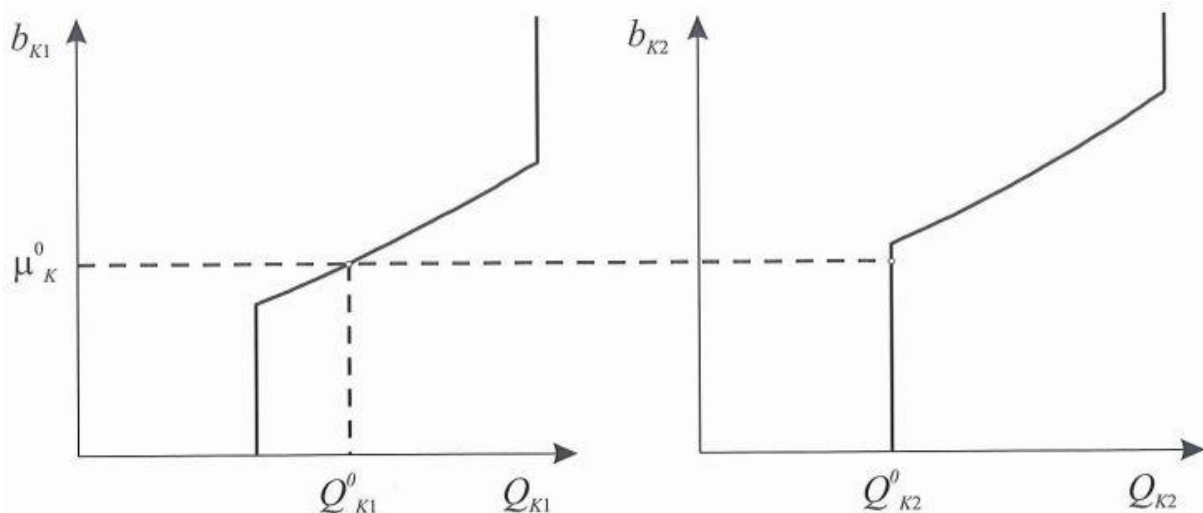
$$b_{Ki} \geq \mu_K^0, \text{ kui } Q_{Ki}^0 = Q_{Ki}^{Min}, \quad i = 1, \dots, N \quad (1.15)$$

$$b_{Ki} \leq \mu_K^0, \text{ kui } Q_{Ki}^0 = Q_{Ki}^{Max}, \quad i = 1, \dots, N \quad (1.16)$$

Kui katelde kütusekulukarakteristikud on allapoole rangelt kumerad funktsioonid [4], siis tuleb neid koormata nii, et oleks täidetud tingimus (1.8), ning valida niisugune μ_K^0 väärtus, et oleks täidetud soojusbilansi tingimus (1.3). Kui tingimuse (1.8) täitmine pole võimalik, siis esimesena tuleb koormata katelt, mille kütusekulu suhteline juurdekasv on kõige väiksem jne.

Katlad, mille kütusekulu suhteline juurdekasv minimaalsel lubataval koormusel on suurem kui μ_K , peavad töötama minimaalse koormusega ja katlad, mille kütusekulu suhteline juurdekasv maksimaalsel lubataval koormusel on väiksem kui μ_K , peavad töötama maksimaalse koormusega [1].

Optimaalne koormusjaotus katelde vahel on toodud joonisel 1.6. Q_{K1}^0 ja Q_{K2}^0 on optimaalsed koormused. μ_K^0 on kateldegrupi kütusekulu suhteline juurdekasv optimaalse koormusjaotuse puhul.



Joonis 1.6 Kahe katla vahelise optimaalse koormusjaotuse määramine [1]

1.4.4 Kasutatavad lahendusmeetodid

Koormusjaotuse optimeerimine paralleelselt töötavate katelde vahel nõuab, et oleks teada järgmised andmed:

- katelde kütusekulu ja kütuse suhtelise juurdekasvu karakteristikud $B_{Ki}(Q_{Ki})$ $b_{Ki}(Q_{Ki})$,
 $i = 1, \dots, N$
- katelde koormuste lubatavad maksimaalsed ja minimaalsed väärtused Q_{Ki}^{Min} , Q_{Ki}^{Max} , $i = 1, \dots, N$
- turbiinide summaarne soojusetarve $Q_{T\Sigma}$.

Optimeerimisülesannete lahendusmeetodid võib jaotada kahte gruppi:

- kaudsed meetodid – lahend leitakse optimaalsuse tingimuste lahendamise teel;
- otsesed meetodid – gradientmeetodid jt [4].

Kõige enamlevinud meetodid on suhteliste juurdekasvude meetod ehk Langrage'i kordajate iteratsioonimeetod ning optimaalkoormuste diagrammi meetod. Meetodid, mis nõuavad sihtfunktsiooni diferentseerimist, omavad suurt eeldust, mis seisneb selles, et on võimalik suure täpsusega ekstreemumpunktide leidmine ebatäpsete lähteandmete puhul [9].

1.4.5 Langrage'i kordajate iteratsioonimeetod

Langrage'i kordajate iteratsioonimeetodi lahendit leitakse optimaalsuse tingimuste lahendamise teel.

Langrage'i kordajate optimaalsed väärtused valitakse iteratiivsel teel.

Ülesande lahenduskäik [1]:

1. valida Langrage'i kordaja μ_K algväärtus
2. optimaalsustingimuste ja katelde karakteristikute $b_{Ki}(Q_{Ki})$ alusel määrata μ_K -le vastavad b_{Ki} ja Q_{Ki} , $i = 1, \dots, N$
3. arvutada aurumagistraali soojuse eabilanss:

$$\Delta Q_K = Q_{T\Sigma} - \sum_{i=1}^N Q_{Ki} \quad (1.17)$$

4. kontrollida, kas ΔQ_K on piisavalt väike:

$$|\Delta Q_K| \leq \beta \quad (1.18)$$

kus β – lubatud tolerants.

„Jah“ korral → punkt 6

„Ei“ korral → punkt 5

5. korrigeerida μ_K väärtust

$$\mu_K = \mu_K + S \cdot \Delta Q_K \quad (1.19)$$

kus S – korrigeerimissamm.

Kordaja μ_K korrigeerimiseks võib kasutada mitmesuguseid meetodeid.

Edasi punkt 2

6. lõpp: tulemuste väljastamine.

1.4.6 Optimaalkoormuste diagrammi meetod

Meetod seisneb selles, et antud töösolevate katelde koosseisu jaoks koostatakse vastav optimaalkoormuste diagramm funktsioonina μ_K väärtusest. Selleks võetakse Langrage'i kordaja erinevaid väärtusi ja arvutatakse neile vastavad $Q_{T\Sigma}$ ja katelde optimaalsete koormuste Q_{K1}, \dots, Q_{KN} väärtuste tabel ehk diagramm [1]. Iga summaarse soojustarvele vastav optimaalne koormusjaotus leitakse optimaalkoormuse diagrammist interpoleerimise teel.

See meetod on kõige täpsem ja lihtsam käsiarvutustel [2]. Kateldegrupi optimaalkoormuste diagramm sisaldab sõltuvust $\mu_K(Q_{T\Sigma})$ või $\mu_K(Q_{K\Sigma})$. Kui soojuskadusid jäetakse arvestamata, siis $Q_{K\Sigma} = Q_{T\Sigma}$.

2. VKG ENERGIA PÕHJA SEJ KATELDE KARAKTERISTIKUD

2.1 Lähteandmed

Käesoleva töö lähteandmeteks on VKG Energia OÜ Põhja SEJ katelde karakteristikud. Jaamast olid saadud katelde №4, №5 ja №9 kasuteguri η sõltuvused aurutoodangust D . On teada, et katelde №6, №7 ja №8 karakteristikud on samad nagu katla №5 oma. Katelde kütuseks on poolkoks- ja generaatorgaasi segu.

2.2 VKG Energia Põhja SEJ kirjeldus

Antud töös vaadeldav soojuselektrijaam on VKG Energia Põhja SEJ. VKG Energia on suuruselt teine elektritootmis- ja jaotusettevõtte Eestis [8]. VKG Energia peamiseks tegevusalaks on energeetika, kus tegevusvaldkonnad on järgmised:

- Elektrienergia tootmine;
- Elektrienergia ost ja müük suurtarbijatele, rohkem kui 1 GWh;
- Soojusenergia tootmine;
- Tööstusettevõtete varustamine tööstusliku auruga [8].

Põhja Soojuselektrijaamal antud hetkel töötavad 6 katelt ning 5 auruturbiini, mis on ühendatud omavahel ühise aurumagistraaliga. Soojus- ja elektrienergia tootmiseks ning Kohtla-Järve ja Jõhvi piirkonna küttega varustamiseks kasutatakse jaamas generaatori-, poolkoks- ja maagasi, mis on toodetud VKG Oil-is (Petroter jne.).

2.3 Katelde karakteristikute koostamine ja parameetrite arvutamine

2.3.1 Vajalikud arvutused

Optimaalne koormusjaotus katelde vahel nõuab iga katla vajalikke parameetrite arvutust. Etteantud töös tuli leida katelde eri- ja kütusekulusid ning kütuse suhtelist juurdekasvu. Arvutused on tehtud valemitega [1]:

$$B_k = \delta_k Q_k \quad (2.1)$$

kus B_k – katla kütusekulu, t/h,

δ_k – katla erikulu, t/h,

Q_k – katla aurutoodang, t/h.

Kütusekulu arvutamisel tuli katla koormused D_k viia soojusühikutele. Selleks katelde koormused olid korrutatud 0,6-ga. Tegur 0,6 on auru ja toitevee entalpiaate vahe.

$$\delta_k = \frac{C}{7\eta_k} \quad (2.2)$$

kus C – tegur, mis sõltub valitud ühikutest (antud juhul $C = 10^5$).

Tegur 7 tuleneb sellest, et 7 kcal/t on tingkütuse küteväärus. Seega saadud kütuse kulud on tingkütused.

$$b_k = 0,1935 - 0,0493 \cdot \frac{\eta_k}{100} + (0,3234 - 0,3289 \cdot \frac{\eta_k}{100}) \cdot \left(\frac{D}{D_{nimi}}\right)^3 \quad (2.3)$$

kus b_k – kütuse suhteline juurdekasv, t/h,

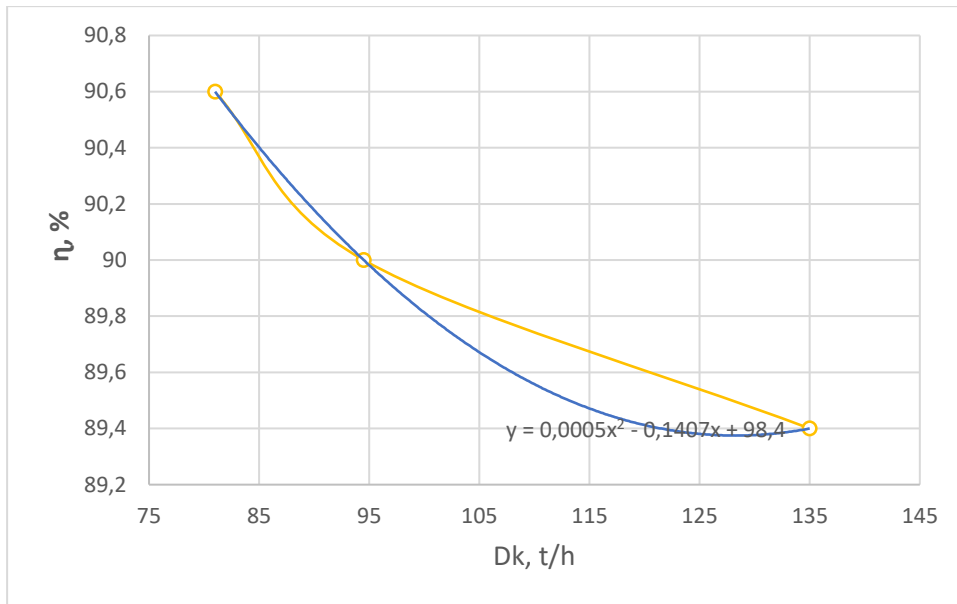
D_{nimi} – katla nimiaurutoodang.

2.3.2 Katel №4

Katla №4 kasuteguri karakteristik on toodud tabelis 2.1 ning näidatud joonisel 2.2.

Tabel 2.1 Katla №4 kasuteguri karakteristik $\eta(D_k, Q_k)$

η , %	D_k , t/h	Q_k , Gcal/h
90,6	81,0	48,6
90,0	94,5	56,7
89,4	135,0	81,0



Joonis 2.2 Katla №4 kasuteguri karakteristik $\eta(D_k)$

Antud katla väljaarvutatud eri- ja kütusekulud ning suhtelised juurdekasvud on koondatud tabelisse 2.2.

Taabel 2.2 Katla №4 parameetrid

$D_k, \text{ t/h}$	81,0	94,5	135,0
$Q_k, \text{ Gcal/h}$	48,6	56,7	135,0
$\delta_k, \text{ t/h}$	157,679	158,730	159,795
$B_k, \text{ t/h}$	7,663	9,000	12,943
$b_k, \text{ t/h}$	0,154	0,159	0,179

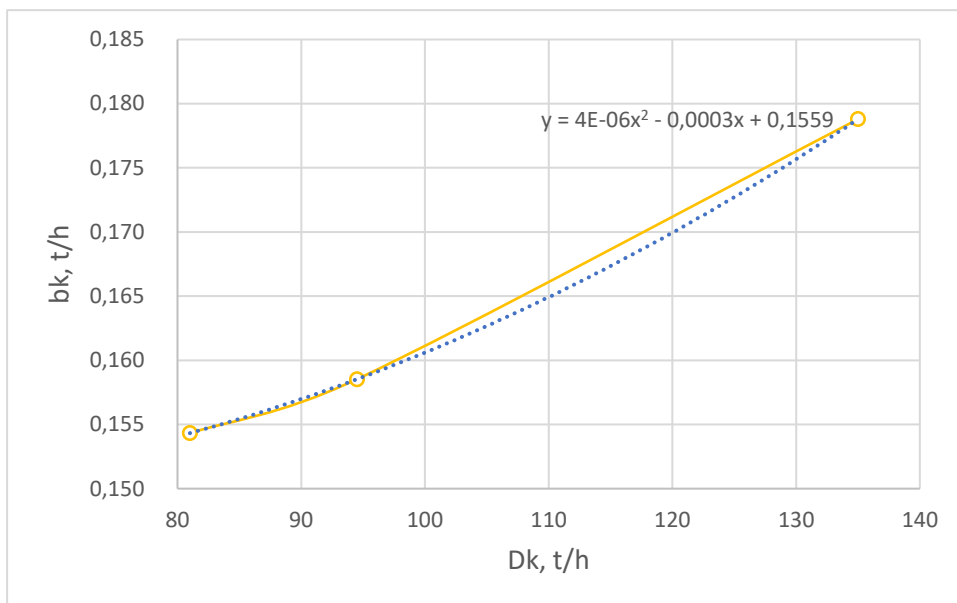
Allpool on näidatud arvutused katla №4 aurutoodangu $D_k = 81,0$ puhul ning nende tulemused.

$$\delta_k = \frac{10^5}{7 \cdot 90,6} = 157,679 \text{ t/h}$$

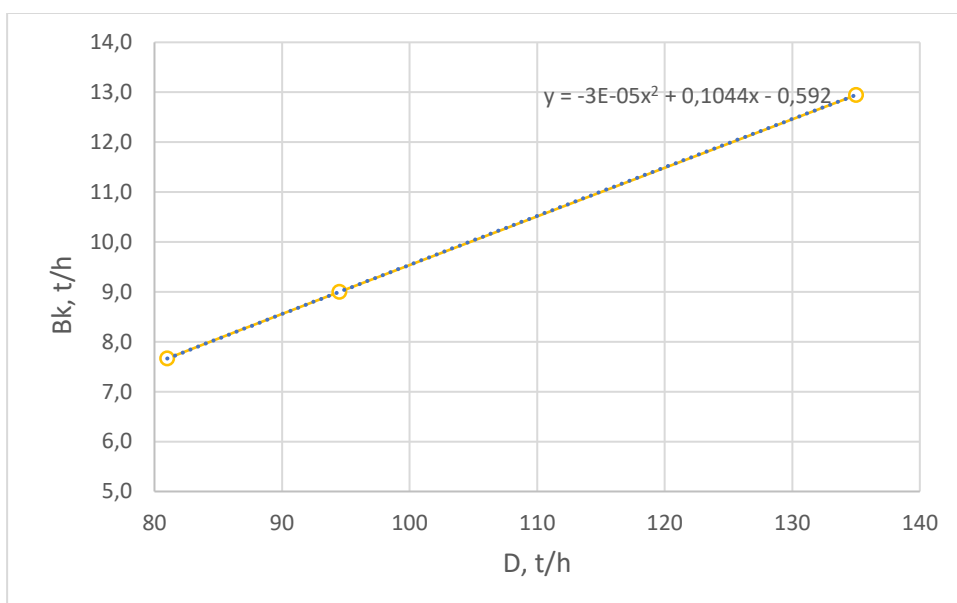
$$B_k = \frac{157,679 \cdot 48,6}{1000} = 7,663 \text{ t/h}$$

$$b_k = 0,1935 - 0,0493 \cdot \frac{90,6}{100} + \left(0,3234 - 0,3289 \cdot \frac{90,6}{100}\right) \cdot \left(\frac{81}{135}\right)^3 = 0,154 \text{ t/h}$$

Saadud tulemuste põhjal saab graafiliselt kujutada antud katla kütusekulu suhtelise juurdekasvu karakteristikut ja kulukarakteristikut, mis on toodud vastavalt joonisel 2.2 ja joonisel 2.3.



Joonis 2.3 Katla №4 kütusekulu suhtelise juurdekasvu karakteristik $b_k(D_k)$



Joonis 2.4 Katla №4 kütusekulu kulukarakteristik $B_k(D_k)$

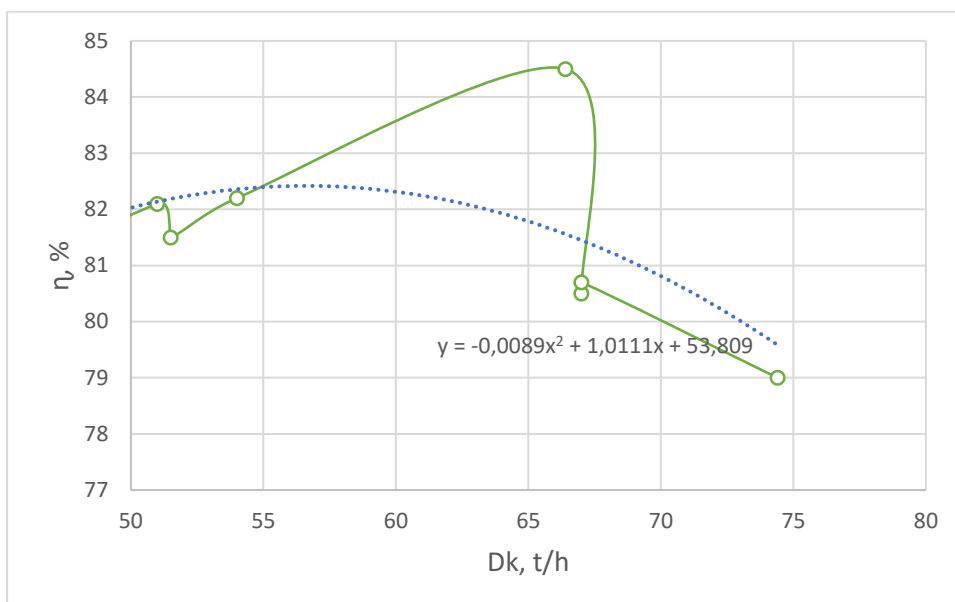
2.3.2 Katlad №5, №6, №7 ja №8

Katla №5 kasuteguri karakteristik on toodud tabelis 2.3 ning näidatud joonisel 2.5.

Tabel 2.3 Katla №5 kasuteguri karakteristik $\eta(D_k, Q_k)$

η %	D_k , t/h	Q_k , Gcal/h
78,4	34,8	20,88
82,1	51,0	30,60
81,5	51,5	30,90

82,2	54,0	32,40
84,5	66,4	39,84
80,5	67,0	40,20
80,7	67,0	40,20
79,0	74,4	44,64



Joonis 2.5 Katla №5 kasuteguri karakteristik $\eta(D_k)$

Antud katla väljaarvutatud eri- ja kütusekulud ning suhtelised juurdekasvud on koondatud tabelisse 2.4.

Taabel 2.4 Katla №5 parameetrid

D_k, t/h	34,8	51,0	51,5	54,0	66,4	67,0	67,0	74,4
Q_k, Gcal/h	20,9	30,6	30,9	32,4	39,8	40,2	40,2	44,6
δ_k, t/h	182,216	174,004	175,285	173,792	169,062	177,462	177,022	180,832
B_k, t/h	3,805	5,325	5,416	5,631	6,735	7,134	7,116	8,072
b_k, t/h	0,161	0,170	0,171	0,173	0,183	0,196	0,195	0,217

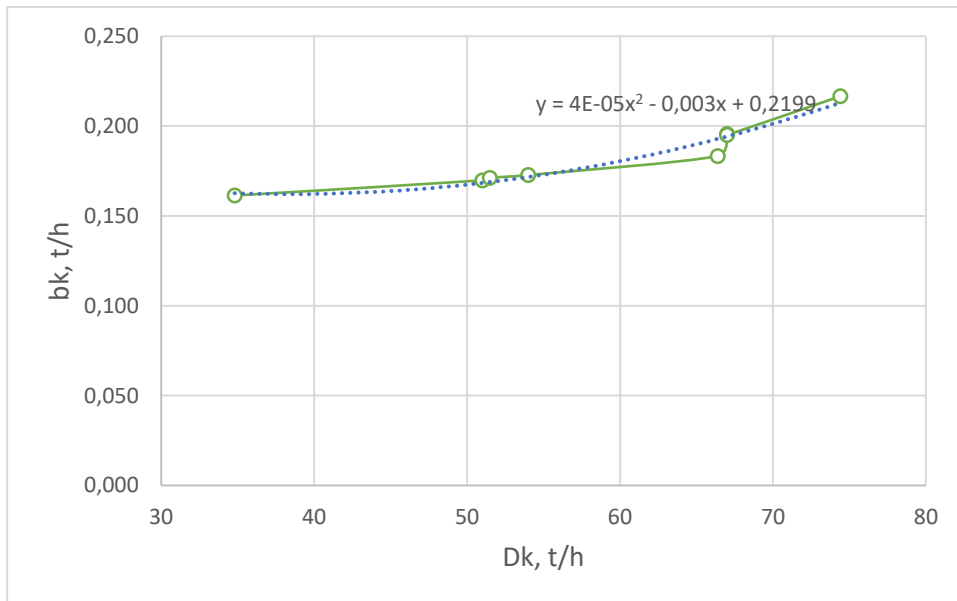
Allpool on näidatud arvutused katla №5 aurutoodangu $D_k = 54,0$ puhul ning nende tulemused.

$$\delta_k = \frac{10^5}{7 \cdot 82,2} = 173,792 \text{ t/h}$$

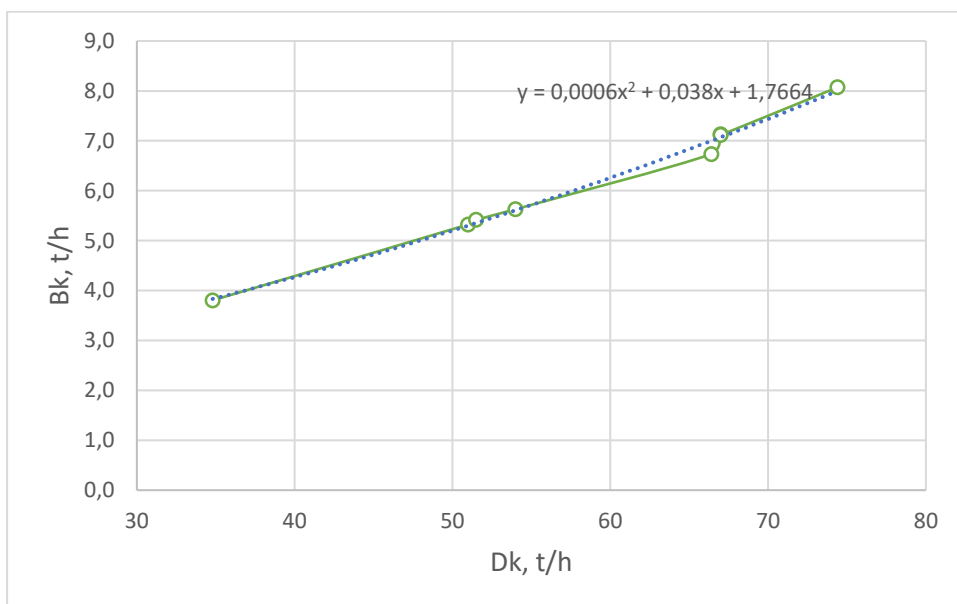
$$B_k = \frac{173,792 \cdot 32,4}{1000} = 5,631 \text{ t/h}$$

$$b_k = 0,1935 - 0,0493 \cdot \frac{82,2}{100} + \left(0,3234 - 0,3289 \cdot \frac{82,2}{100}\right) \cdot \left(\frac{54}{75}\right)^3 = 0,173 \text{ t/h}$$

Saadud tulemuste põhjal saab graafiliselt kujutada antud katla kütusekulu suhtelise juurdekasvu karakteristikut ja kulukarakteristikut, mis on toodud vastavalt joonisel 2.6 ja joonisel 2.7.



Joonis 2.6 Katla №5 kütusekulu suhtelise juurdekasvu karakteristik $b_k(D_k)$



Joonis 2.7 Katla №5 kütusekulu kulukarakteristik $B_k(D_k)$

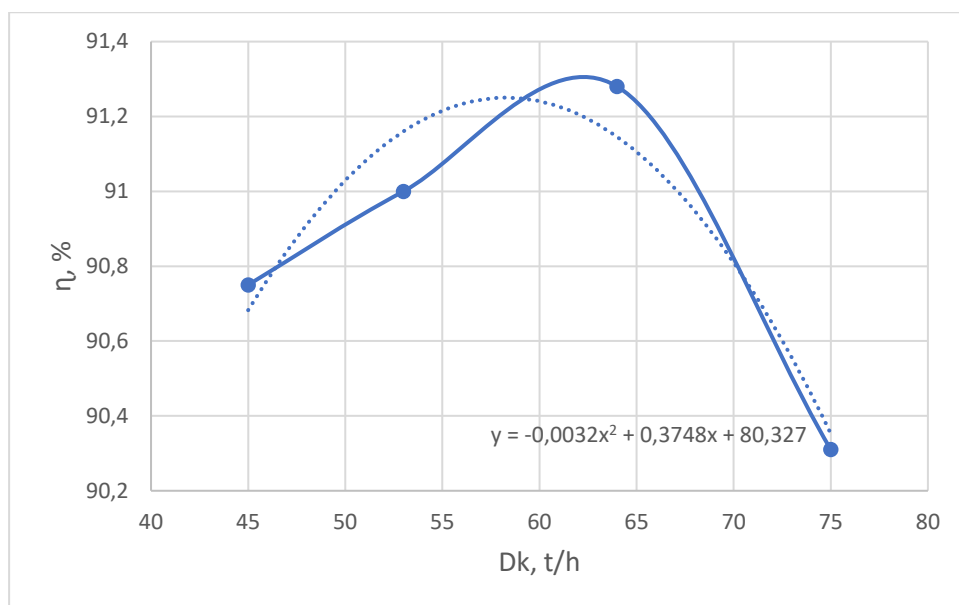
Nagu eespool mainitud, vaadeldud jaama katelde №6, №7 ja №8 karakteristikud on samad nagu katla №5 omad.

2.3.2 Katel №9

Katla №9 kasuteguri karakteristik on toodud tabelis 2.5 ning näidatud joonisel 2.8.

Tabel 2.5 Katla №9 kasuteguri karakteristik $\eta(D_k, Q_k)$

$\eta, \%$	$D_k, \text{t/h}$	$Q_k, \text{Gcal/h}$
90,75	45,0	27,0
91,0	53,0	31,8
91,28	64,0	38,4
90,31	75,0	45,0



Joonis 2.8 Katla №9 kasuteguri karakteristik $\eta(D_k)$

Antud katla väljaarvutatud eri- ja kütusekulud ning suhtelised juurdekasvud on koondatud tabelisse 2.6.

Tabel 2.6 Katla №9 parameetrid

$D_k, \text{t/h}$	45,0	53,0	64,0	75,0
$Q_k, \text{Gcal/h}$	27,0	31,8	38,4	45,0
$\delta_k, \text{t/h}$	157,418	156,986	156,504	158,185
$B_k, \text{t/h}$	4,250	4,992	6,010	7,118
$b_k, \text{t/h}$	0,153	0,156	0,160	0,171

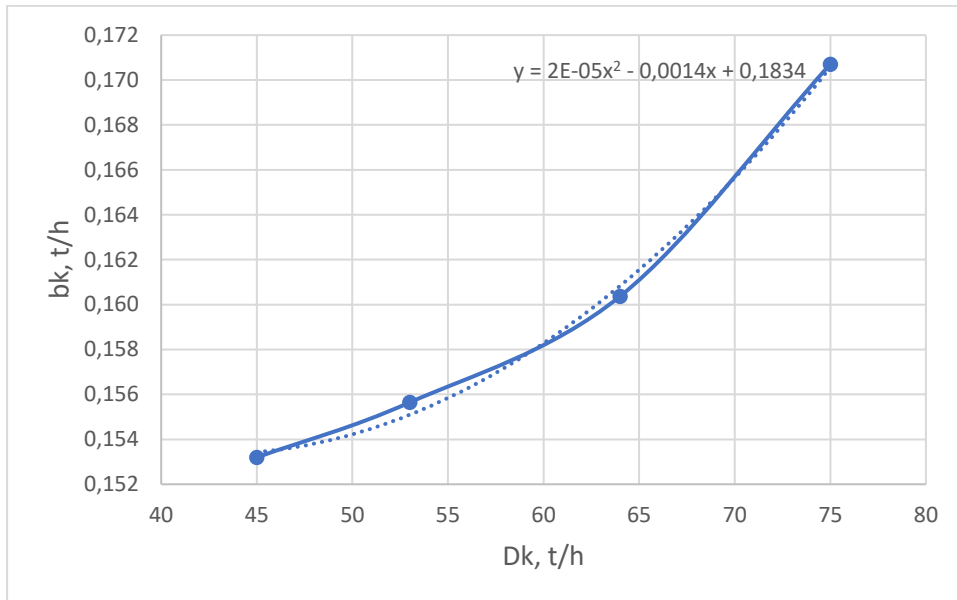
Allpool on näidatud arvutused katla №9 aurutoodangu $D_k = 75,0$ puhul ning nende tulemused.

$$\delta_k = \frac{10^5}{7 \cdot 90,31} = 158,185 \text{ t/h}$$

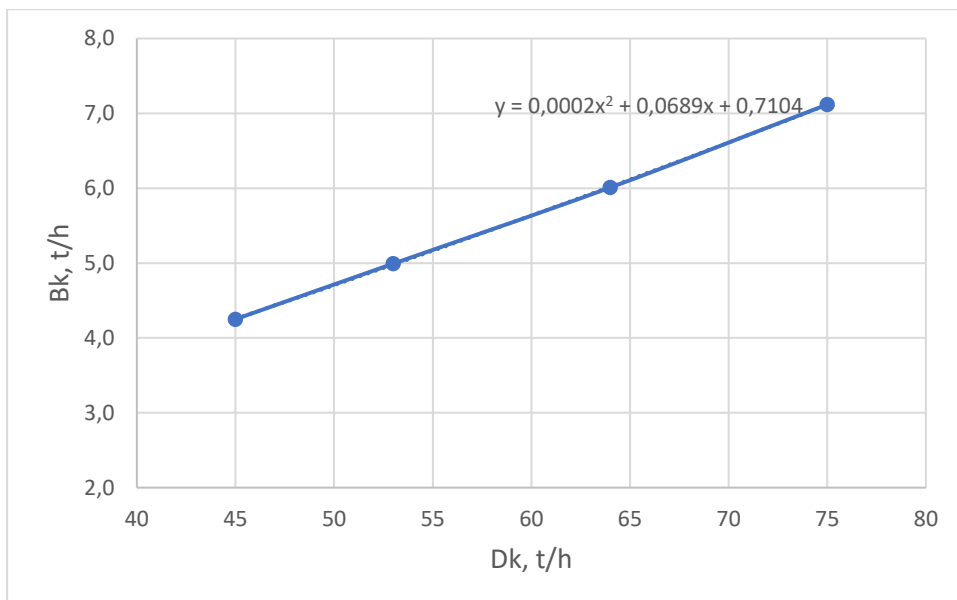
$$B_k = \frac{158,185 \cdot 45}{1000} = 7,118 \text{ t/h}$$

$$b_k = 0,1935 - 0,0493 \cdot \frac{90,31}{100} + \left(0,3234 - 0,3289 \cdot \frac{90,31}{100}\right) \cdot \left(\frac{75}{80}\right)^3 = 0,171 \text{ t/h}$$

Saadud tulemuste põhjal saab graafiliselt kujutada antud katla kütusekulu suhtelise juurdekasvu karakteristikut ja kulukarakteristikut, mis on toodud vastavalt joonisel 2.9 ja joonisel 2.10.



Joonis 2.9 Katla №9 kütusekulu suhtelise juurdekasvu karakteristik $b_k(D_k)$

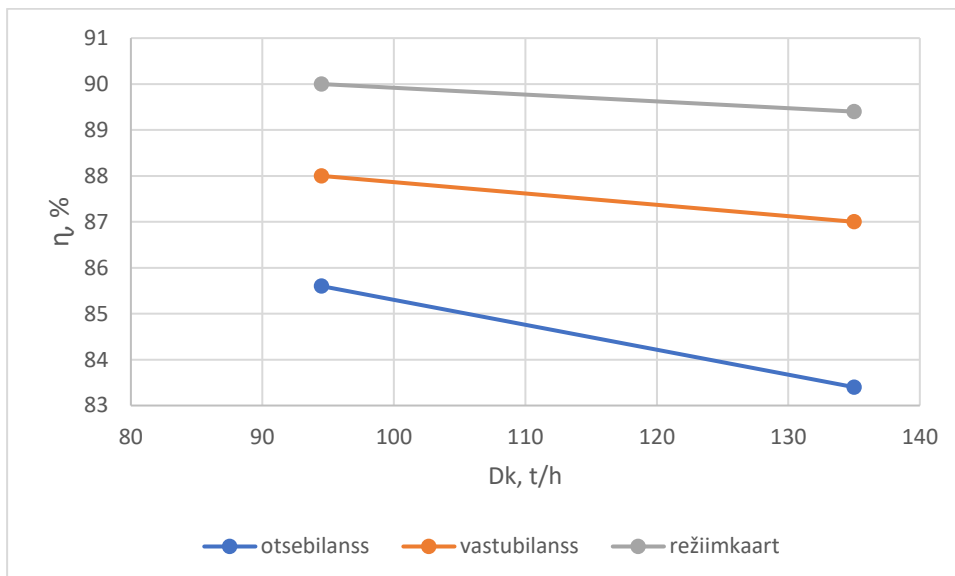


Joonis 2.10 Katla №9 kütusekulu kulukarakteristik $B_k(D_k)$

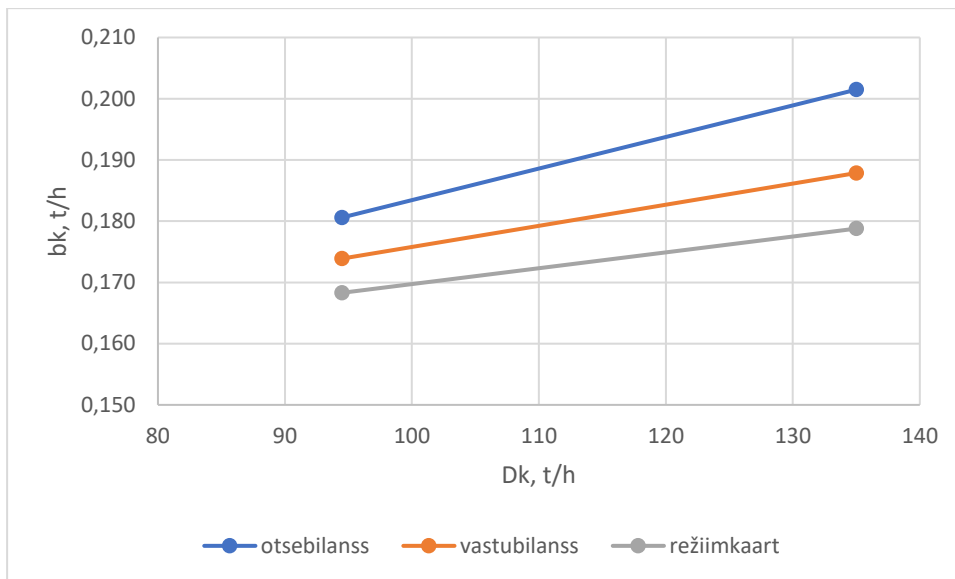
2.4 Katelde karakteristikute analüüs

Antud punktis võrreldakse omavahel katelde kasutegurite ja marginaalkulude karakteristikud, mis on saadud erineval viisil. Katla №4 puhul vaadeldakse karakteristikuid, mis on saadud, kasutades väärtuseid, mis on antud katla režiimkaardis, ning karakteristikuid, mis on saadud, kasutades kasuteguri väärtuseid, mis olid arvutatud otsese ning vastubilanssi järgi. Katla №5 puhul võrreldakse erinevatel kuupäevade käiduandmetelt saadud karakteristikuid. Samas vaadeldakse, kuidas erinevad funktsioonid, kui katel töötab, kasutades põletamiseks vaid poolkoksgaasi ning vaid generaatorigaasi. Katla №9 puhul võrreldakse karakteristikuid, mis on saadud režiimkaardi väärtuste alusel, ning karakteristikuid, mis on saadud käiduandmetelt.

2.4.1 Katel №4



Joonis 2.11 Katla №4 kasuteguri karakteristik $\eta(D_k)$ erineval viisil saadud andmete puhul

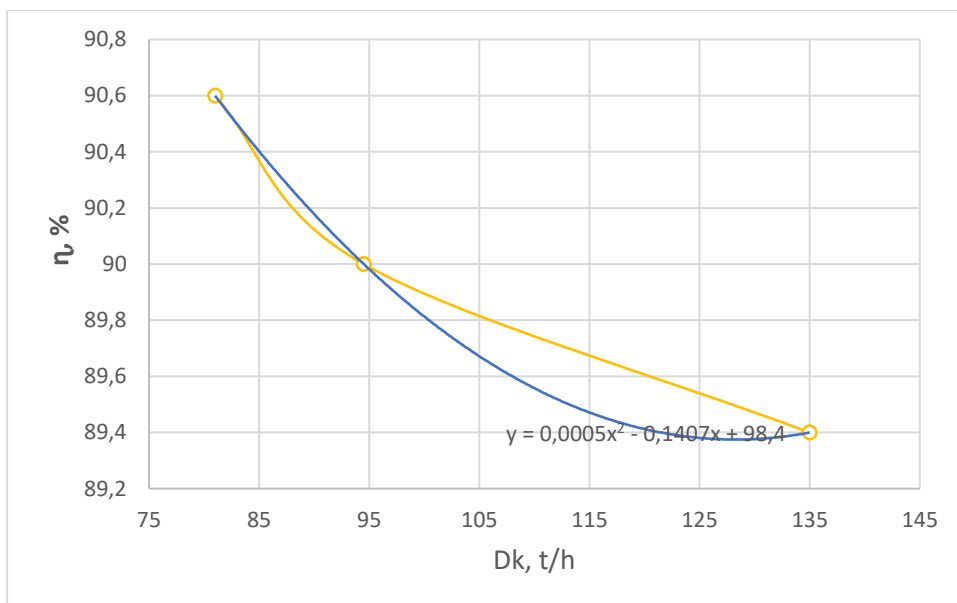


Joonis 2.12 Katla №4 kütusekulu suhtelise juurdekasvu karakteristik $b_k(D_k)$ erineval viisil saadud andmete puhul

Katla kasutegurit saab välja arvutada, kasutades otsebilanssi või vastubilanssi. Otsebilanss kujutab endast katla aurutoodangu ja kütuse soojuse suhet. Kasutegurit vastubilanssi järgi leitakse soojuskadude kaudu. Viimane meetod omab suuremat täpsust.

Joonistelt 2.11 ja 2.12 on näha, et katla sama koormuste juures kasutegurite ja marginaalkulude väärtused erinevad üksteisest päris suurel määral. Aurutoodangu 135 t/h juures režiimkaardis esitatud kasuteguri väärtus on 89,4%, otsebilanssi alusel arvatud väärtus – 83,4% ning vastubilanssi alusel arvatud väärtus – 87%. Marginaalkulude väärtused sama arutoodangu juures erinevad üksteisest vahemikus 0,179 – 0,201 t/h. Sealjuures kõik funktsioonid omavad sarnast kuju.

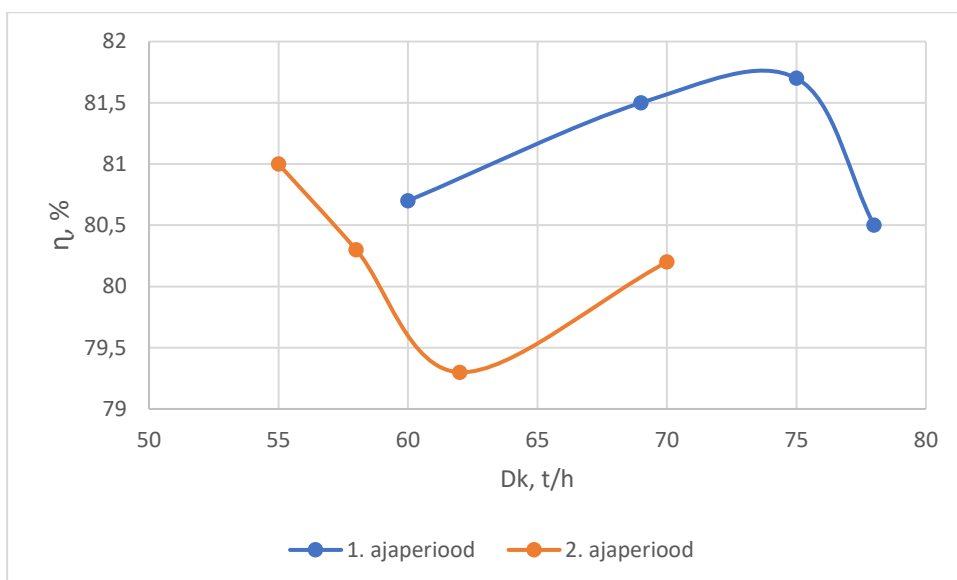
Kui vaadata katla kasuteguri karakteristiku graafikut, mis on esitatud joonisel 2.13, võib märgata, et maksimaalset kasutegurit saavutatakse minimaalse koormuse juures. See tähendab, et katel peaks töötama tühijooksul, mis on ebareaalne.



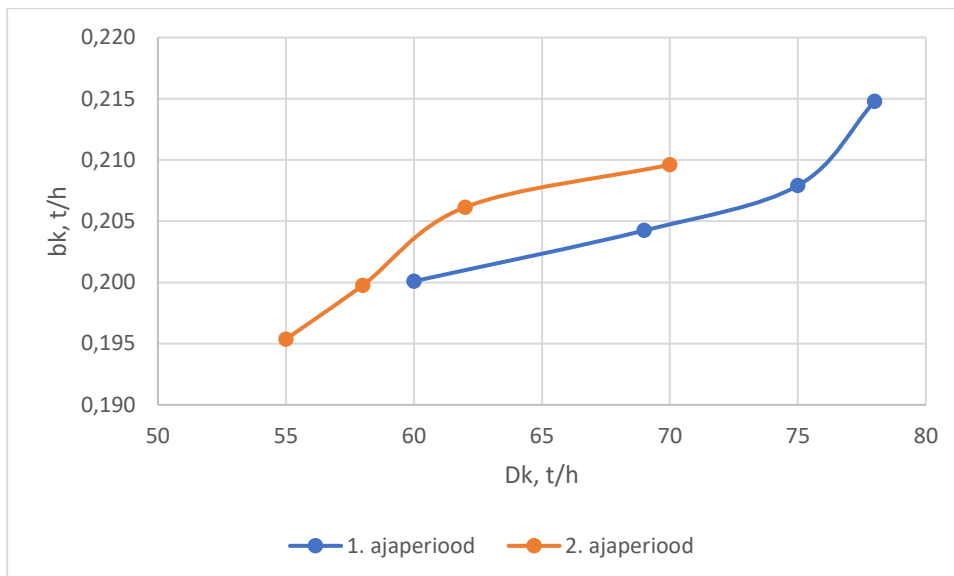
Joonis 2.2 Katla №4 kasuteguri karakteristik $\eta(D_k)$

2.4.2 Katel №5

Kuna katla №5 režiimkaart oli antud töö koostamise hetkeks ainult väljatöötamisel, võrdlemiseks olid kasutatud karakteristikud, mis olid saadud erinevate kuupäevade andmete alusel.



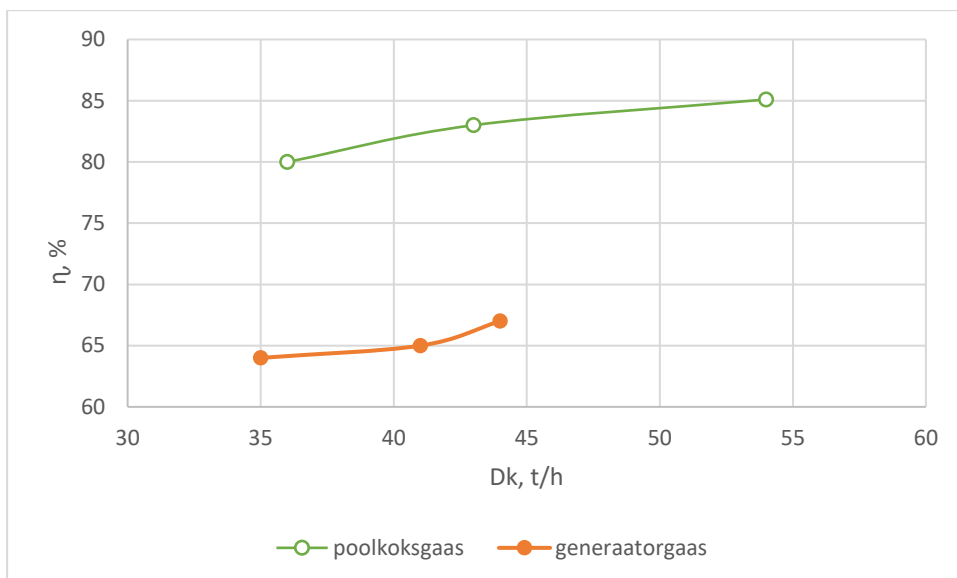
Joonis 2.14 Katla №5 kasuteguri karakteristik $\eta(D_k)$ erinevatel kuupäevadel saadud andmete puhul



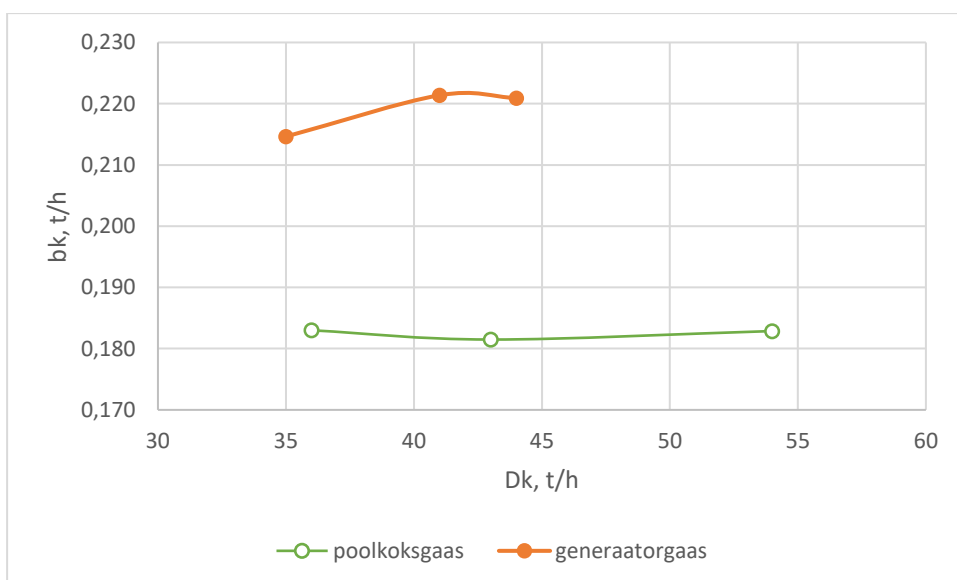
Joonis 2.15 Katla №5 kütusekulu suhtelise juurdekasvu karakteristik $b_k(D_k)$ erineval kuupäevadel saadud andmete puhul

Joonistelt 2.14 ja 2.15 võib näha, et päris lähedaste katla koormuste juures välja arvatud käiduandmete alusel kasutegurid ja marginaalkulud erinevad üksteisest. Esimesel ajaperioodil katla aurutoodangu $D_k = 69 \text{ t/h}$ puhul on kasutegur 81,5%, marginaalkulu – 0,204 t/h. Teisel ajaperioodil lähedase katla aurutoodangu $D_k = 70 \text{ t/h}$ puhul on kasutegur 80,2%, marginaalkulu – 0,210 t/h. Sealjuures kõik funktsioonid samade katla koormuste juures omavad sarnast kuju.

Kui võrrelda omavahel funktsioonid, mis on saadud, kui katel töötab režiimis „ainult poolkoksgaas“, nendega, mis on saadud, kui katel töötab režiimis „ainult generaatorgaas“, võib märgata, et karakteristikute vahel esineb päris suur erinevus. Antud vahe on tingitud suurel määral sellega, et generaator- ja poolkoksgaasi kütteväärtus omab samuti päris suurt erinevust. Generaatorgaasi kütteväärtus on madal, keskmiselt 3 MJ/Nm^3 . Poolkoksgaasi kütteväärtus on palju suurem, keskmiselt $37,4 \text{ MJ/Nm}^3$. Saadud kasuteguri ja suhtelise juurdekasvu karakteristikud võib näha joonistel 2.16 ja 2.17.



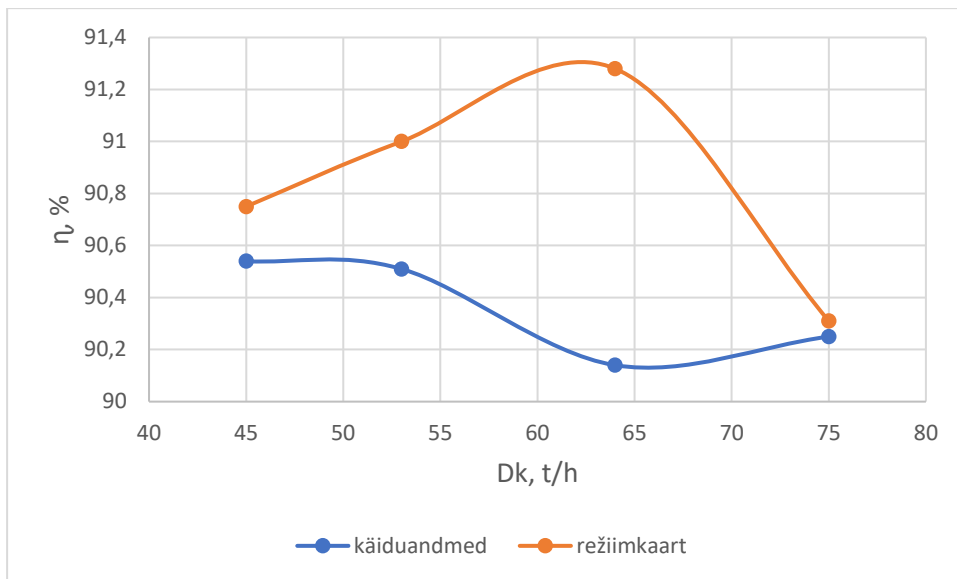
Joonis 2.16 Katla №5 kasuteguri karakteristik $\eta(D_k)$ erinevate töörežiimide puhul



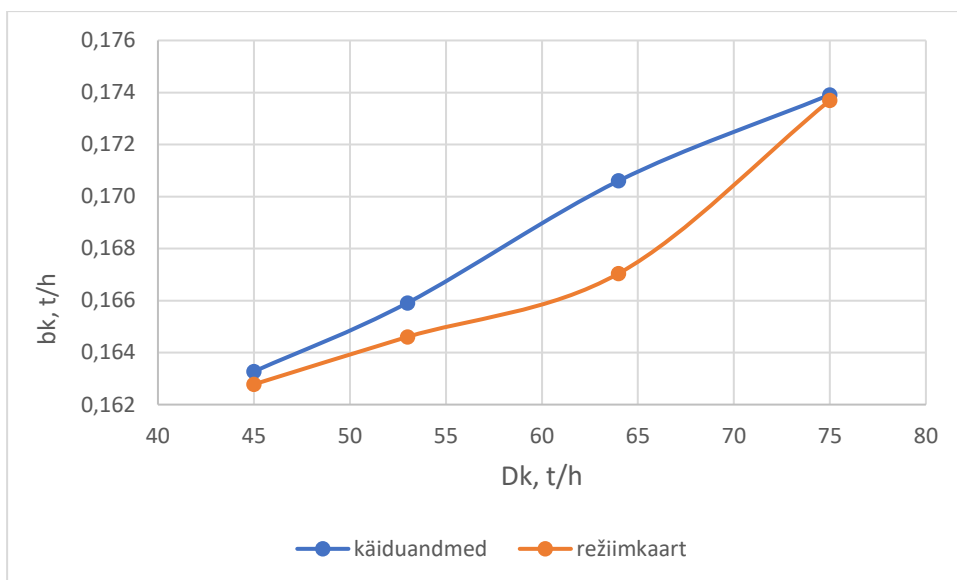
Joonis 2.17 Katla №5 kütusekulu suhtelise juurdekasvu karakteristik $b_k(D_k)$ erinevate töörežiimide puhul

2.4.3 Katel №9

Katla №9 puhul olid võrreldud omavahel käiduandmete ning režiimkaarti põhjal saadud karakteristikud. Tulemused on esitatud joonistel 2.18 ja 2.19.



Joonis 2.18 Katla №9 kasuteguri karakteristik $\eta(D_k)$ režiimkaardi ja käiduandmete väärtuste puhul



Joonis 2.19 Katla №9 kütusekulu suhtelise juurdekasvu karakteristik $b_k(D_k)$ režiimkaardi ja käiduandmete väärtuste puhul

Katla kasuteguri karakteristik on sile ülespoole kumer mittelineaarne funktsioon, mis saavutab maksimaalse väärtuse katla ökonoomse koormuse juures [1]. Jooniselt 2.18 on näha, et katla koormuse $D_k = 64 \text{ t/h}$ korral režiimkaardi järgi funktsioon omab maksimaalset väärtust – 91,28%. Käiduandmete põhjal välja arvatud kasutegur sama koormuse järgi omab minimaalset väärtust – 90,14%. Sealjuures maksimaalse $D_k = 75 \text{ t/h}$ ja minimaalse $D_k = 45 \text{ t/h}$ koormuste korral karakteristikute väärtuste vahe on suhteliselt väike.

2.4.4 Järeldus

Võrreldes omavahel erinevatel viisil saadud katelde karakteristikud oli jõutud järeldusele, et iga katla puhul need funktsioonid erinevad üksteisest. Reaalsuses on päris raske püsivalt hoida katelde parameetrid normeeritud väärtuste juures.

Asjaolu, et funktsioonid erinevad üksteisest võib põhjendada sellega, et katelde kütuseks kasutatakse generaator- ja poolkoksgaasi segu. Generaator- ja poolkoksgaasi koostisosa segus on alati erinev. Nende gaaside kütteväärtused on samuti väga erinevad. Generaatorgaasi kütteväärtus on madal - $3 \text{ MJ}/\text{Nm}^3$. Poolkoksgaasi kütteväärtus on palju suurem generaatorgaasi omast - $37,4 \text{ MJ}/\text{Nm}^3$. Gaasi saamiseks kasutatakse erinevaid tehnoloogiaid (Kiviter 1, Kiviter 2) ning gaasi parameetrid pidevalt muutuvad.

Järelduseks võib öelda, et käiduandmete põhjal saab arvutada katelde kasutegurid, aga tuleb silmas pidada, et antud juhul on tegemist suure ebatäpsusega. Täpsemate karakteristikute saamine nõuab detailsemat uuringut.

3. OPTIMAALNE KOORMUSJAOTUS KATELDE VAHEL

3.1 Kütusekulude arvutamine katelde võrdsete suhteliste juurdekasvude ja tegelike koormuste puhul

Koormusjaotus paralleelselt töötavate katelde vahel on optimaalne siis, kui on täidetud kütusekulu suhteliste juurdekasvude võrdsuse nõue. Käesolevas töös oli tarvis leida niisugust Lagrange'i kordajat, et oleks täidetud kaks tingimust: ükski antud kateldest ei töötaks ei miinimumis ega maksimumis ning summaarne koormus, mis on saadud optimeerimisel, oleks ligikaudselt võrdne tegeliku koormusega. Antud töös vaadeldakse kolm erinevat koosseisu: kui mõni katel on tööst välja, kui kaks katelt on tööst välja (avariiolukord) ning kui kõik katlad töötavad samaaegselt. Seega iga juhtumi jaoks oli leitud erinev marginaalkulu väärtus.

Katelde suhteliste juurdekasvude ja kütusekulu karakteristikud olid aproksimeeritud teise astme polünoomiga *Exceli* abil, et vajalikke väärtuseid oleks lihtsam leida. Esialgelt oli tarvis välja arvutada optimaalset aurutoodangut katla suhtelise juurdekasvu karakteristiku abil valitud μ_K puhul ning seejärel optimaalset kütusekulu katla kütusekulu karakteristiku abil valitud μ_K puhul. Kõik arvutused olid tehtud tingühikutes.

Koormusjaotuse optimeerimine toob kaasa soojuselektrijaama summaarse kütusekulu minimeerimist. Koormusjaotus katelde vahel on optimaalne siis, kui nende marginaalkulud on võrdsed. Kuidas mõjutab optimeerimine konkreetse katlamaja peale, aitab aru saada nende katelde kütusekulude arvutamine tegelike katelde koormuste korral. Nagu eespool mainitud, need olid arvutatud katelde kulukarakteristikute aproksimeerimisel saadud polünoomidega. Tegelikud koormused olid saadud vaadeldavast jaamast. Saadud andmetest, oli näha, et tavaliselt kõik katlad korraga ei tööta. Peaaegu alati on üks katel tööst välja. Kütusekulud katelde tegelike koormuste puhul olid arvutatud erinevate koosseisude jaoks.

3.2 Arvutused

3.2.1 Esimene koosseis

Esimeses koosseisus katel №5 on tööst välja. Antud juhtumi puhul optimaalseks suhteliseks juurdekasvuks oli valitud $\mu_K = 0,169$. Allpool on toodud optimaalse aurutoodangu ja kütusekulu

arvutamine valitud marginaalkulu korral. Samas on toodud kütusekulude arvutused tegelike koormuste puhul.

Optimaalse aurutoodangu leidmine (katel №4):

Katla №4 suhtelise juurdekasvu karakteristikku aproksimeerimisel teise astme polünoomiga oli saadud funktsioon:

$$y = 4 \cdot 10^{-6}x^2 - 0,0003x + 0,1559$$

Seega

$$b_k = 4 \cdot 10^{-6}D_k^2 - 0,0003D_k + 0,1559$$

Kuna $b_K = \mu_K = 0,169$, siis

$$4 \cdot 10^{-6}D_k^2 - 0,0003D_k - 0,0131$$

Polünoomi lahendamisel on saadud kaks võimalikult katla optimaalset aurutoodangut:

$$D_{k1} = \frac{0,0003 + 0,00055}{8 \cdot 10^{-6}} = 105,87$$

$$D_{k2} = \frac{0,0003 - 0,00055}{8 \cdot 10^{-6}} = -30,91$$

Teine arvutatud aurutoodangu väärtus ei sobi, sest see on negatiivne. Seega antud katla optimaalseks aurutoodangu väärtuseks on valitud $D_k = 105,87 \text{ t/h}$.

Optimaalse kütusekulu leidmine (katel №4):

Katla №4 kulukarakteristikku aproksimeerimisel teise astme polünoomiga oli saadud funktsioon:

$$y = -3 \cdot 10^{-5}x^2 - 0,1044x - 0,592$$

Seega

$$B_k = -3 \cdot 10^{-5} \cdot D_k^2 - 0,1044 \cdot D_k - 0,592$$

Kuna $D_k = 105,87$, siis

$$B_k = -3 \cdot 10^{-5} \cdot 105,87^2 - 0,1044 \cdot 105,87 - 0,592 = 10,12$$

Antud katla optimaalseks kütusekuluks valitud μ_K puhul on $B_k = 10,12 \text{ t/h}$. Analoogselt olid leitud teiste katelde vajalikud andmed.

Optimaalse aurutoodangu leidmine (katlad №6, №7, №8):

$$y = 4 \cdot 10^{-5}x^2 - 0,003x + 0,2199$$

$$b_k = 4 \cdot 10^{-5}x^2 - 0,003x + 0,2199$$

$$D_{k1} = \frac{0,003 + 0,00093}{8 \cdot 10^{-5}} = 49,06$$

$$D_{k2} = \frac{0,003 - 0,000925}{8 \cdot 10^{-5}} = 25,93$$

Teine arvatud aurutoodangu väärtus ei sobi, sest see on väiksem, kui katelde №6, №7, №8 aurutoodangu minimum (vt. Tabel 2.3). Seega katelde optimaalseks aurutoodangu väärtuseks on valitud $D_k = 49,06 \text{ t/h}$.

Optimaalse kütusekulu leidmine (katlad №6, №7, №8):

$$y = 6 \cdot 10^{-4}x^2 + 0,038 \cdot x + 1,7664$$

$$B_k = 6 \cdot 10^{-4} \cdot 49,06^2 + 0,038 \cdot 49,06 + 1,7664 = 5,07$$

Antud katelde optimaalseks kütusekuluks valitud μ_K puhul on $B_k = 5,07 \text{ t/h}$.

Optimaalse aurutoodangu leidmine (katel №9):

$$y = 2 \cdot 10^{-5}x^2 - 0,0014x + 0,1834$$

$$b_k = 2 \cdot 10^{-5}x^2 - 0,0014x + 0,1834$$

$$D_{k1} = \frac{0,0014 + 0,0009}{4 \cdot 10^{-5}} = 57,47$$

$$D_{k2} = \frac{0,0014 - 0,0009}{4 \cdot 10^{-5}} = 12,53$$

Teine arvatud aurutoodangu väärtus ei sobi, sest see on väiksem, kui katla №9 aurutoodangu minimum (vt. Tabel 2.5). Seega antud katla optimaalseks aurutoodangu väärtuseks on valitud $D_k = 57,47 \text{ t/h}$.

Optimaalse kütusekulu leidmine (katel №9):

$$y = 2 \cdot 10^{-4}x^2 + 0,0689 \cdot x + 0,7104$$

$$B_k = 2 \cdot 10^{-4} \cdot 57,47^2 + 0,0689 \cdot 57,47 + 0,7104 = 5,33$$

Antud katla optimaalseks kütusekuluks valitud μ_K puhul on $B_k = 5,33 \text{ t/h}$.

Kütusekulude arvutamine tegelike koormuste puhul:

Tegelikud katelde koormused antud juhtumi jaoks ning välja arvatud kütusekulud on näidatud alljärgnevas tabelis.

Tabel 3.1 Katelde tegelikud koormused ja kütusekulud (katel №5 on tööst välja)

Katel	№4	№6	№7	№8	№9
$D_k, t/h$	97	44	53	51	67
$B_k, t/h$	9,53	4,60	5,47	5,27	6,22

Allpool on esitatud kütusekulude arvutuskäik iga katla puhul. Kütusekulud teiste juhtumite jaoks olid leitud, kasutades samu funktsioone.

Katla №4 kütusekulu:

$$\text{Antud } D_K \text{ korral on } B_k = -3 \cdot 10^{-5} \cdot 97^2 + 0,1044 \cdot 97 + 0,592 = 9,53 \text{ t/h.}$$

Katla №6 kütusekulu:

$$\text{Antud } D_K \text{ korral on } B_k = 6 \cdot 10^{-4} \cdot 44^2 + 0,038 \cdot 44 + 1,7664 = 4,60 \text{ t/h.}$$

Katla №7 kütusekulu:

$$\text{Antud } D_K \text{ korral on } B_k = 6 \cdot 10^{-4} \cdot 53^2 + 0,038 \cdot 53 + 1,7664 = 5,47 \text{ t/h.}$$

Katla №8 kütusekulu:

$$\text{Antud } D_K \text{ korral on } B_k = 6 \cdot 10^{-4} \cdot 51^2 + 0,038 \cdot 51 + 1,7664 = 5,27 \text{ t/h.}$$

Katla №9 kütusekulu:

$$\text{Antud } D_K \text{ korral on } B_k = 2 \cdot 10^{-4} \cdot 67^2 + 0,0689 \cdot 67 + 0,7104 = 6,22 \text{ t/h.}$$

3.2.2 Teine koosseis

Teises koosseisus katel №9 on tööst välja. Antud juhtumi puhul optimaalseks suhteliseks juurdekasvuks oli valitud $\mu_K = 0,168$.

Optimaalse aurutoodangu leidmine (katel №4):

$$b_k = 4 \cdot 10^{-6} D_k^2 - 0,0003 D_k + 0,1559$$

$$D_{k1} = \frac{0,0003 + 0,00053}{8 \cdot 10^{-6}} = 104,06$$

$$D_{k2} = \frac{0,0003 - 0,00053}{8 \cdot 10^{-6}} = -29,06$$

Teine arvatud aurutoodangu väärtus ei sobi, sest see on negatiivne. Seega antud katla optimaalseks aurutoodangu väärtuseks on valitud $D_k = 104,06 \text{ t/h}$.

Optimaalse kütusekulu leidmine (katel №4):

$$B_k = -3 \cdot 10^{-5} \cdot D_k^2 - 0,1044 \cdot D_k - 0,592$$

Antud katla optimaalseks kütusekuluks valitud μ_K puhul on $B_k = 9,94 \text{ t/h}$.

Optimaalse aurutoodangu leidmine (katlad №5, №6, №7, №8):

$$b_k = 4 \cdot 10^{-5} x^2 - 0,003x + 0,2199$$

$$D_{k1} = \frac{0,003 + 0,00083}{8 \cdot 10^{-5}} = 47,92$$

$$D_{k2} = \frac{0,003 - 0,00083}{8 \cdot 10^{-5}} = 27,08$$

Teine arvutatud aurutoodangu väärtus ei sobi, sest see on väiksem, kui katelde №5, №6, №7, №8 aurutoodangu minimum (vt. Tabel 2.3). Seega katelde optimaalseks aurutoodangu väärtuseks on valitud $D_k = 47,92 \text{ t/h}$.

Optimaalse kütusekulu leidmine (katlad №5, №6, №7, №8):

$$B_k = 6 \cdot 10^{-4} \cdot 49,06^2 + 0,038 \cdot 49,06 + 1,7664 = 4,97$$

Antud katelde optimaalseks kütusekuluks valitud μ_K puhul on $B_k = 4,97 \text{ t/h}$.

Kütusekulude arvutamine tegelike koormuste puhul:

Tegelikud katelde koormused antud juhtumi jaoks ning välja arvutatud kütusekulud on näidatud alljärgnevas tabelis.

Tabel 3.2 Katelde tegelikud koormused ja kütusekulud (katel №9 on tööst välja)

Katel	№4	№5	№6	№7	№8
$D_k, \text{t/h}$	100	36	50	55	56
$B_k, \text{t/h}$	9,55	3,91	5,17	5,67	5,78

3.2.3 Kolmas koosseis

Antud koosseisus katlad №4 ja №5 on tööst välja. Selle juhtumi puhul optimaalseks suhteliseks juurdekasvuks oli valitud $\mu_K = 0,168$.

Optimaalse aurutoodangu ja optimaalse kütusekulu leidmine (katlad №6, №7, №8):

Sama arvutus nagu punktis 3.2.2, kuna suhtelise juurdekasvu väärtus on ka $\mu_K = 0,168$.

Optimaalse aurutoodangu leidmine (katel №9):

$$b_k = 2 \cdot 10^{-5} x^2 - 0,0014x + 0,1834$$

$$D_{k1} = \frac{0,0014 + 0,00085}{4 \cdot 10^{-5}} = 56,32$$

$$D_{k2} = \frac{0,0014 - 0,00085}{4 \cdot 10^{-5}} = 13,67$$

Teine arvatud aurutoodangu väärtus ei sobi, sest see on väiksem, kui katla №9 aurutoodangu minimum (vt. Tabel 2.5). Seega antud katla optimaalseks aurutoodangu väärtuseks on valitud $D_k = 56,32 \text{ t/h}$.

Optimaalse kütusekulu leidmine (katel №9):

$$B_k = 2 \cdot 10^{-4} \cdot 56,32^2 + 0,0689 \cdot 56,32 + 0,7104 = 5,19$$

Antud katla optimaalseks kütusekuluks valitud μ_K puhul on $B_k = 5,19 \text{ t/h}$.

Kütusekulude arvutamine tegelike koormuste puhul:

Tegelikud katelde koormused antud juhtumi jaoks ning välja arvatud kütusekulud on näidatud alljärgnevas tabelis.

Tabel 3.3 Katelde tegelikud koormused ja kütusekulud (katlad №4 ja №5 on tööst välja)

Katel	№6	№7	№8	№9
$D_k, \text{t/h}$	45	57	52	48
$B_k, \text{t/h}$	4,69	5,88	5,36	4,48

3.2.2 Neljas koosseis

Antud koosseisus kõik katlad töötavad samaaegselt. Antud juhtumi puhul optimaalseks suhteliseks juurdekasvuks oli valitud $\mu_K = 0,164$.

Optimaalse aurutoodangu leidmine (katel №4):

$$b_k = 4 \cdot 10^{-6} D_k^2 - 0,0003 D_k + 0,1559$$

$$D_{k1} = \frac{0,0003 + 0,00045}{8 \cdot 10^{-6}} = 93,87$$

$$D_{k2} = \frac{0,0003 - 0,00045}{8 \cdot 10^{-6}} = -56,37$$

Teine arvatud aurutoodangu väärtus ei sobi, sest see on negatiivne. Seega antud katla optimaalseks aurutoodangu väärtuseks on valitud $D_k = 93,87 \text{ t/h}$.

Optimaalse kütusekulu leidmine (katel №4):

$$B_k = -3 \cdot 10^{-5} \cdot D_k^2 - 0,1044 \cdot D_k - 0,592$$

Antud katla optimaalseks kütusekuluks valitud μ_K puhul on $B_k = 8,96 \text{ t/h}$.

Optimaalse aurutoodangu leidmine (katlad №5, №6, №7, №8):

$$b_k = 4 \cdot 10^{-5}x^2 - 0,003x + 0,2199$$

$$D_{k1} = \frac{0,003 + 0,00024}{8 \cdot 10^{-5}} = 40,45$$

$$D_{k2} = \frac{0,003 - 0,00024}{8 \cdot 10^{-5}} = 34,54$$

Teine arvutatud aurutoodangu väärtus ei sobi, sest see on väiksem, kui katelde №5, №6, №7, №8 aurutoodangu minimum (vt. Tabel 2.3). Seega katelde optimaalseks aurutoodangu väärtuseks on valitud $D_k = 40,45 \text{ t/h}$.

Optimaalse kütusekulu leidmine (katlad №5, №6, №7, №8):

$$B_k = 6 \cdot 10^{-4} \cdot 40,45^2 + 0,038 \cdot 40,45 + 1,7664 = 4,25$$

Antud katelde optimaalseks kütusekuluks valitud μ_K puhul on $B_k = 4,25 \text{ t/h}$.

Optimaalse aurutoodangu leidmine (katel №9):

$$b_k = 2 \cdot 10^{-5}x^2 - 0,0014x + 0,1834$$

$$D_{k1} = \frac{0,0014 + 0,00064}{4 \cdot 10^{-5}} = 50,97$$

$$D_{k2} = \frac{0,0014 - 0,00064}{4 \cdot 10^{-5}} = 19,03$$

Teine arvutatud aurutoodangu väärtus ei sobi, sest see on väiksem, kui katla №9 aurutoodangu minimum (vt. Tabel 2.5). Seega antud katla optimaalseks aurutoodangu väärtuseks on valitud $D_k = 50,97 \text{ t/h}$.

Optimaalse kütusekulu leidmine (katel №9):

$$B_k = 2 \cdot 10^{-4} \cdot 50,97^2 + 0,0689 \cdot 50,97 + 0,7104 = 4,74$$

Antud katla optimaalseks kütusekuluks valitud μ_K puhul on $B_k = 4,74 \text{ t/h}$.

Kütusekulude arvutamine tegelike koormuste puhul:

Tegelikud katelde koormused antud juhtumi jaoks ning välja arvutatud kütusekulud on näidatud alljärgnevas tabelis.

Tabel 3.4 Katelde tegelikud koormused ja kütusekulud (kõik katlad on töös)

Katel	№4	№5	№6	№7	№8	№9
$D_k, t/h$	67	33	58	59	52	39
$B_k, t/h$	6,27	3,67	5,99	6,10	5,36	3,70

3.3 Katlatsehhi optimeerimisest saadud kasum

Katlatsehhi talitluse optimeerimise majandusliku efekti hindamiseks ja analüüsimiseks tuleb võrrelda summaarseid kütusekulusid katelde võrdsete suhteliste juurdekasvude ning tegelike koormuste korral. Allpool on toodud summaarsete kütusekulude arvutused iga vaadeldava juhtumi puhul.

Esimene koosseis (katel №5 on tööst välja)

Optimaalne summaarne kütusekulu (suhtelised juurdekasvud on võrdsed):

$$\sum B_{opt} = 10,12 + 3 \cdot 5,07 + 5,33 = 30,66 \text{ t/h}$$

Summaarne kütusekulu (tegelikud koormused):

$$\sum B_k = 9,53 + 4,60 + 5,47 + 5,27 + 6,22 = 31,10 \text{ t/h}$$

Saadud kokkuhoid ongi nende summaarsete kulude vahe:

$$Kasum = \sum B_k - \sum B_{opt} = 31,10 - 30,66 = 0,44 \text{ t/h}$$

Tulemuseks on saadud, et kui katlatsehh töötab optimaalse koormusjaotusega katelde vahel, siis ettevõtte minimeerib kütusekulusid 0,44 t/h võrra. Sel juhul kulud on vähenenud ligikaudu 1,41 % võrra.

Teine koosseis (katel №9 on tööst välja)

Optimaalne summaarne kütusekulu (suhtelised juurdekasvud on võrdsed):

$$\sum B_{opt} = 9,94 + 4 \cdot 4,97 = 29,82 \text{ t/h}$$

Summaarne kütusekulu (tegelikud koormused):

$$\sum B_k = 9,55 + 3,91 + 5,17 + 5,67 + 5,78 = 30,10 \text{ t/h}$$

$$Kasum = \sum B_k - \sum B_{opt} = 30,10 - 29,82 = 0,30 \text{ t/h}$$

Tulemuseks on saadud, et kui katlatsehh töötab optimaalse koormusjaotusega katelde vahel, siis ettevõtte minimeerib kütusekulusid 0,30 t/h võrra. Sel juhul kulud on vähenenud ligikaudu 0,93 % võrra.

Kolmas koosseis (katlad №4 ja №5 on tööst välja)

Optimaalne summaarne kütusekulu (suhtelised juurdekasvud on võrdsed):

$$\sum B_{opt} = 5,19 + 3 \cdot 4,97 = 20,10 \text{ t/h}$$

Summaarne kütusekulu (tegelikud koormused):

$$\sum B_k = 4,69 + 5,88 + 5,36 + 4,48 = 20,41 \text{ t/h}$$

$$Kasum = \sum B_k - \sum B_{opt} = 20,41 - 20,10 = 0,31 \text{ t/h}$$

Tulemuseks on saadud, et kui katlatsehh töötab optimaalse koormusjaotusega katelde vahel, siis ettevõtte minimeerib kütusekulusid 0,31 t/h võrra. Sel juhul kulud on vähenenud ligikaudu 1,52 % võrra.

Neljas koosseis (kõik katlad on töös)

Optimaalne summaarne kütusekulu (suhtelised juurdekasvud on võrdsed):

$$\sum B_{opt} = 8,96 + 4,74 + 4 \cdot 4,25 = 30,70 \text{ t/h}$$

Summaarne kütusekulu (tegelikud koormused):

$$\sum B_k = 7,721 + 3,674 + 5,989 + 6,097 + 5,365 + 3,702 = 31,10 \text{ t/h}$$

$$Kasum = \sum B_k - \sum B_{opt} = 31,10 - 30,70 = 0,40 \text{ t/h}$$

Tulemuseks on saadud, et kui katlatsehh töötab optimaalse koormusjaotusega katelde vahel, siis ettevõtte minimeerib kütusekulusid 0,40 t/h võrra. Sel juhul kulud on vähenenud ligikaudu 1,29 % võrra.

4. KOORMUSJAOTUSE OPTIMEERIMINE PIIRATUD KÜTUSEKOGUSE TINGIMUSEL

4.1 Üldist

Energiasüsteemi ökonoomne talitlemine nõuab seda, et kütusekulud oleksid minimeeritud teatud aja jooksul. Kui energiasüsteemil ei eksisteeri mingeid piiranguid kasutusel oleva kütuse suhtes, siis koormusjaotuse optimeerimisülesanne sõltub ainult olemasolevatest tingimustest. Antud juhul kütusekuluks on kõigest kütusehind. Koormusjaotuse optimeerimiseks on võimalik korrigeerida kütuse kasutust ja soojuselektrijaama hooldust.

Juhul, kui kindla jaama jaoks kütuseressurs (süsi, gaas, õli, vesi, tuumakütus jne) on piirav faktor jaama talitlusel, siis optimaalse koormusjaotuse arvutamine peab olema tehtud teistpidi. Optimeerimisülesanne peab arvestama seda, mis võib juhtuda enne, ning seda, mis võib juhtuda tulevikus.

On olemas mitu matemaatilisi mudeleid, mis võib kasutada jaama talitluse optimeerimiseks piiratud kütusekoguse tingimusel. V. M. Sinkov ja A. V. Bogoslovski raamatus „*Оптимизация режимов энергетических систем*“ [9] on esitatud meetod, mis baseerub dünaamilisel programmeerimisel. Optimeerimisülesande lahendamine sellise meetodiga võib olla liiga keeruline. Käesolevas töös vaadeldakse meetodit, mis on pakutud A. Wood ja B. Wollenbergi raamatus „*Power Generation, Operation and Control*“ [10]. Antud meetod eeldatavasti on lihtsaim, võrreldes teiste olemasolevate mudelitega.

4.2 Matemaatilise mudeli ülevaade

Eeldatakse, et N on energiasüsteemi soojuselektrijaamad piiramatu kütusevarustusega pluss üks turbiingeneraator T piiratud kütusevarustusega. On olemas selline tingimus, et piiratud kütusekogus peab olema kinnimakstud, vaatamata sellele, kas oli see kütus kasutatud või mitte.

Vaadeldav energiasüsteem talitleb teatud ajajooksul j_{max} ajaintervallidega j , kus $j = 1, \dots, j_{max}$. Antud süsteemis [10]:

- $P_{1j}, P_{2j}, \dots, P_{Tj}$ – väljundvõimsus;
- $F_{1j}, F_{2j}, \dots, F_{Nj}$ – kütusekulud (hind);

- $q_{T1}, q_{T2}, \dots, q_{Tj}$ – teatud kütusekulu T jaoks.

Arvestatakse, et [10]:

- P_{ij} – i^{th} -nda jaama väljundvõimsus ajavahemikus j^{th} ;
- F_{ij} – R/h kulud i^{th} -nda jaama peale ajavahemikus j^{th} ;
- q_{Tj} – teatud kütusekulu agregaadile T ajavahemikus j^{th} ;
- F_{Tj} – R/h kulud agregaadile T peale ajavahemikus j^{th} ;
- P_{load} – kogukoormus ajavahemikus j^{th} ;
- n_j – tundide arv ajavahemikus j^{th} .

Matemaatiliselt ülesande püstitus näeb välja järgmiselt:

$$\min \sum_{j=1}^{j_{max}} (n_j \sum_{i=1}^N F_{ij}) + \sum_{i=1}^{j_{max}} n_j F_{Tj} \quad (4.1)$$

tingimustel, et

$$\Phi = \sum_{j=1}^{j_{max}} n_j q_{Tj} - q_{TOT} = 0 \quad (4.2)$$

ja

$$\psi_j = P_{loadj} - \sum_{i=1}^N P_{ij} - P_{Tj} = 0, \text{ gde } j = 1, \dots, j_{max} \quad (4.3)$$

On tarvis välja selgitada kulude miinimumi nende jaamade ning turbiingeneraatori peale, kui on täidetud tingimused (4.2) ja (4.3).

On tarvis märkida, et selle meetodi puhul ükski agregaatidest ei pea töötama miinimumis ega maksimumis. Samas avaldis $\sum_{j=1}^{j_{max}} n_j F_{Tj}$ on konstantne, kuna kütusekogus, mis on kasutatud turbiingeneraatori T poolt, on fikseeritud.

Lagrange'i funktsioon omab järgmist kuju [10]:

$$\mathcal{L} = \sum_{j=1}^{j_{max}} n_j \sum_{i=1}^N F_{ij} + \sum_{j=1}^{j_{max}} \lambda_j (P_{loadj} - \sum_{i=1}^N P_{ij} - P_{Tj}) + (\sum_{j=1}^{j_{max}} n_j q_{Tj} - q_{TOT}) \quad (4.4)$$

Väljundvõimsused P_{ij} ja P_{Tj} on sõltumatud muutujad, kuna $F_{ij} = F_i(P_{ij})$ ja $q_{Tj} = q_T(P_{Tj})$. Iga ajavahemiku $j = k$ jaoks [10]:

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial P_{ik}} = 0 = n_k \frac{dF_{ik}}{dP_{ik}} - \lambda_k, \quad i = 1, \dots, N \quad (4.5)$$

ja

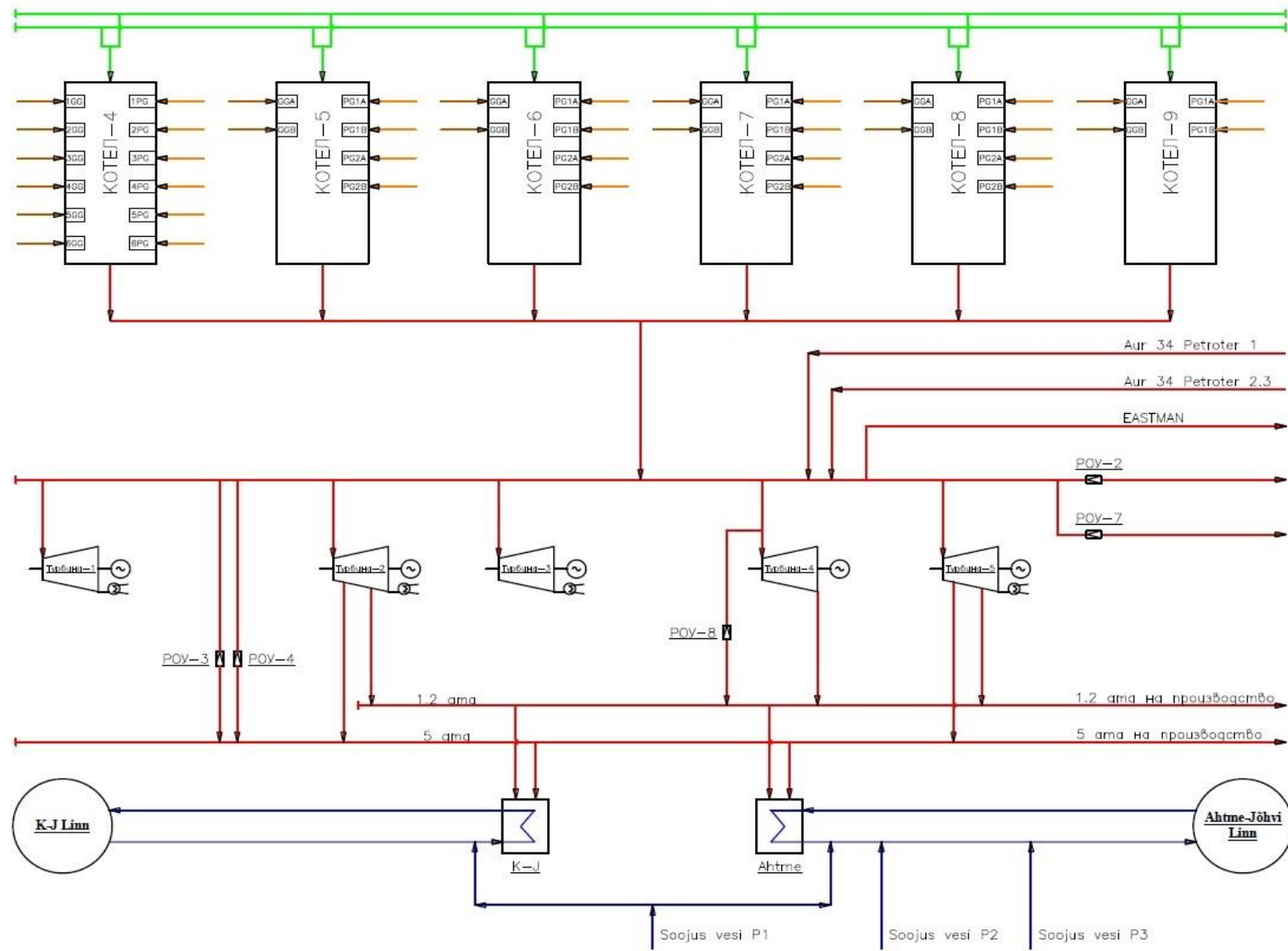
$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial P_{Tk}} = -\lambda_k + \gamma n_k \frac{dq_{Tk}}{dP_{Tk}} = 0 \quad (4.6)$$

On vaja märkida, et γ väärtusteks on kulu R ühikus q (nt R/m^3 , R/t). Väärtust γ tihti nimetatakse „pseudohinnaks“ [10]. Antud suurus näitab, et on võimalik lahendada koormusjaotuse optimeerimisprobleemi, korrigeerides piiratud kütusekoguse hinda. Järelikult termin „pseudohind“ on küllalt konstruktiivne. Eeldatakse, et γ väärtus on konstantne igas ajavahemikus.

4.3 Lihtsustatud mudel VKG Energia Põhja SEJ jaoks

Antud punktis on vaadeldud matemaatiline optimeerimismudel konkreetse jaama jaoks, mis baseerub eespool käsitletud meetodil. Eesmärgiks on katta koostootmisjaama soojustarbijate nõudlused minimaalse kütusekuluga. Soojustarbijad on kaugkütte tarbijad ja tööstus tehnoloogilise auru tarbijana. Vaadeldavas jaamas õlitööstuse poolt toodetud uttegaas (B_{Σ}) tuleb ööpäevas ära kasutada. B_K^{KK} on kütusekulu, mis on vajalik soojustarbija koormusgraafikute täitmiseks. B_K^E on kütusekulu elektritootmiseks kondensatsioonrežiimis kahe kondensatsiooniturbiini poolt pluss elekter, mis tuleb koostootmiselt.

Jaamas on kaks vaheltvõttudega ja üks vasturõhuturbiin ning lisaks kaks kondensatsiooniturbiini. Vasturõhuturbiin töötab kaugküttevõrku. Soojuselektrijaama printsiipaalne skeem on esitatud joonisel 4.1.



Joonis 4.1 Jaama printsiipiaalne skeem

Pakutud meetodis algselt optimeeritakse gaasikulu, mis kulub koostootmisele. Siin tuleb määrata vaheltvõtuturbiinide vaheltvõttude optimaalsed koormused ja võimalik elektri toodang. Seejärel tuleb määrata vasturõhuturbiini optimaalne koormus kaugküttevõrku. Pakutud meetod on mõeldud ajaintervalli jaoks pikkusega üks tund.

Optimeerimisülesanne näeb välja järgmiselt:

$$\min \sum_{i=1}^6 B_{Ki}^{KK}(Q_{Ki}) \quad (4.7)$$

järgmistel lisatingimustel

$$\sum_{j=1}^2 Q_{Tj}^{VV}(P_{Gj}, Q_{Tj}^T, Q_{Tj}^{KK}) + Q_{Tj}^{VR}(Q_{Tj}^{KK}, P_{Gj}) - \sum_{i=1}^6 Q_{Ki} = 0 \quad (4.8)$$

$$Q_{\Sigma}^T - \sum_{i=1}^2 Q_{Tj}^T = 0 \quad (4.9)$$

$$Q_{\Sigma}^{KK} - \sum_{i=1}^2 Q_{Tj}^{KK} - Q_{TVR}^{KK} = 0 \quad (4.10)$$

kus Q_{Ki} – i-nda katla soojuskoormus,

Q_{Tj}^{VV} – j-nda vaheltvõtuturbiini sisendsoojus,

Q_{Tj}^{VR} – j-nda vasturõhuturbiini sisendsoojus,

Q_{Tj}^T – j-nda turbiini tööstusliku auru soojuskoormus,

Q_{Tj}^{KK} – j-nda turbiini kaugkütte soojuskoormus,

P_{Gj} – j-nda generaatori aktiivkoormus,

Q_{Σ}^T – koostootmisjaama tööstusliku auru soojuskoormus,

Q_{Σ}^{KK} – koostootmisjaama kaugkütte soojuskoormus.

Optimumi tingimuste tuletamiseks saab kasutada Lagrange'i funktsiooni ja võtta otsitavate järgi osatuletised ja need võrrustada nulliuga. Kuna antud töös ei olnud eesmärgiks optimeerida turbiinide teha, siis antud juhul ei tuletata optimumi tingimusi.

Selle ülesanne lahendamisel saab minimeerida kütusekulu B_K^{KK} ja koostootmisel toodeldud elektrilise võimsuse

$$P^{KT} = \sum_{i=1}^2 P_{iG} + P_{Gj}^{VR} \quad (4.11)$$

Eeldatakse, et vaheltvõttudega turbiinide kondensatsiooni osad on koormatud maksimaalselt.

Kütuse kogusest, mis tuleb ööpäevas ära kasutada jääb siis üle kütus, mida võib kasutada elektri tootmiseks kondensatsiooniturbiinidega (need on jaamas kaks):

$$B_{\Sigma} - B_K^{KK} = B_K^E \quad (4.12)$$

Jäänud kütusehulka saab omakorda samuti minimeerida:

$$\min \sum_{i=1}^6 B_K^E(Q_K) = \sum_{i=1}^2 Q_T^K(P_T^K) \quad (4.13)$$

lisatingimusel

$$\sum_{i=1}^2 Q_T^K(P_T^K) - Q_K = 0 \quad (4.14)$$

kus Q_K – katlamaja soojustoodang kondensatsiooniturbiinidele.

Lahendades need kaks optimeerimisülesannet saab tagada jaamale etteantud soojuskoormused ning summaarse elektrikoormuse minimaalse kütusekuluga.

KOKKUVÕTE

Soojuselektrijaama talitluse optimeerimine on tähtis tehniline ning majanduslik ülesanne. See toob kaasa kütuse kasutamise efektiivsuse tõstmist ja SEJ majanduslikku kasumit soojus- ning elektriturul.

Soojuselektrijaamade talitluse optimaalse töörežiimi arvutamisel on vajalik lähtuda iga jaama elemendi karakteristikutest, nende ekspluateerimise piirangutest, prognoositud tarbijate koormusgraafikutest jms. Kaasaegne SEJ talitluse optimeerimise ülesannete püstitus omab kõrge arvutuslikku keerukust. Optimeerimist ei saa efektiivselt teostada ilma uudse meetodika ja tarkvarata.

Töö eesmärgiks oli võrrelda tegelikku ja optimaalset koormusjaotust VKG Energia Põhja SEJ katelde vahel ning välja selgitada millist efekti see annab. Samas tuli analüüsida katelde karakteristikud. Vaadelda matemaatilist mudelit, mille abil saaks optimeerida katlamaja tööd määratud kütuse koguse tingimusel.

Antud töö koostamisel olid saadud järgmised tulemused ning tehtud järgmised järeldused:

- võrreldati omavahel katelde karakteristikud, mis olid saadud erineval viisil (režiimkaardilt, arvutustel, käiduandmete põhjal, erinevate kütuste puhul). Iga katla puhul need funktsioonid erinevad üksteisest;
- reaalsuses on päris raske püsivalt hoida katelde parameetrid normeeritud väärtuste juures. Kütuseks kasutatakse gaaside segu. Generaator- ja poolkoksgaasi koostisosa segus on alati erinev. Nende gaaside kütteväärtused on samuti väga erinevad vastavalt $3 \text{ MJ}/\text{m}^3$ ja $37,4 \text{ MJ}/\text{m}^3$;
- jaamas kasutatavad katlad on mitu korda ümberehitatud. Algselt need olid ettenähtud põlevkivi põletamiseks;
- täpsemate karakteristikute saamine nõuab detailsemat uuringut. Soojuselektrijaam võiks tellida ametlikku kasuteguri määramist;
- olid arvutatud katlatsehhi kütusekulu optimaalsel koormusjaotusel ning tegelike katelde koormuste puhul erinevate koosseisude jaoks;
- optimeerimisest saadud jaama võimalik kasum jäi vahemikku 0,93 – 1,52 %;
- optimeerimisülesannete lahendamise tulemusi võis mõjutada see asjaolu, et võrdse suhtelise juurdekasvu μ_K valimiseks olid kitsad piired (väärtus peab olema selline, et ükski katel ei töötaks minimaalse ega maksimaalse koormusega), ning ümmardamine arvutuskäigus;
- optimeerimise peaeesmärk oli saavutatud – kütusekulud minimeeritud, vaid see tulemus on teoreetiline. Tuleb kasutada täpsemad katelde karakteristikud;

- oli vaadeldud matemaatiline meetod, mille abil saab optimeerida koostootmisjaama talitlust. Pakutud meetod on mõeldud vaid VKG Põhja SEJ jaoks;
- pakutud meetodit saaks detailsemat uurida, kasutades jaama turbiinide karakteristikuid, ning kui oleks antud peale soojuskoormuse graafikuid ka elektri koormuse graafikud.

Koormusjaotuse optimeerimine katelde vahel peab tagama paralleelselt töötavate katelde summaarse kütusekulu minimeerimist. Töö tulemusel see asjaolu oli tõdetud ning oli kajastatud, kui tähtis on optimaalne koormuse jaotamine agregaatide vahel. Summaarne kütusekulu oli minimeeritud 0,93 – 1,52% võrra. Vaadeldava meetoodika kasutamisega kütuse kokkuhoid suureneb. Samuti oli välja pakutud matemaatiline meetod, mille abil saab optimeerida koostootmisjaama tööd juhul, kui kütusekogus, mis tuleb põleda, on ette antud. Järelduseks võib öelda, et juhul, kui VKG Energia Põhja SEJ katlatsehhi koormusjaotus oleks optimeeritud, siis ettevõtte oleks saanud majanduslikku kasumit ning seega käesoleva töö käigus saadud tulemusi võib pidada edukateks. Antud tulemus on aga teoreetiline, kuna karakteristikute analüüsimisel oli väljaselgitatud, et need on mitte täpsed.

Kirjandus

- [1] Mati Valdma, Heiki Tammoja, Matti Keel, „Soojuselektrijaamade talitluse optimeerimine,“ Tallinn: TTÜ kirjastus, 2008
- [2] Горнштейн В. М., Мирошниченко Б. П., Пономарев А. В. и др., „Методы оптимизации режимов энергосистем,“ Москва, 1981
- [3] Урин В. Д., Кутлер П. П., „Энергетические характеристики для оптимизации режимов электростанций и энергосистем,“ Москва, 1974
- [4] Mati Valdma, „Energiasüsteemid. Loengukonspekt,“ Tallinn, 2015
- [5] „Как работает ТЭЦ.“ [WWW]
<http://loveopium.ru/rossiya/kak-rabotaet-tec.html> (8.12.2018)
- [6] В. И. Скрябин, „Курс лекций по теплотехнике.“ [WWW]
<http://www.xumuk.ru/teplotehnika/047.html> (22.11.2018)
- [7] Н. Д. Роголёв, „Экономика энергетики,“ Москва, 2005
- [8] VKG Energia OÜ koduleht [WWW]
<http://www.vkg.ee/est/tooted-ja-teenused/vkg-energia-ou> (15.12.2018)
- [9] Синьков В. М., Богословский А. В., Григоренко В. Г. и др., „Оптимизация режимов энергетических систем“, Киев, 1976
- [10] A. J. Wood, B. F. Wollenberg „Power Generation, Operation and Vonctrol,“ 1996
- [11] VKG Energia Põhja SEJ katelde karakteristikud