



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

## Gaasiturbiinide kasutamine

The use of gas turbines

Bakalaureusetöö

Üliõpilane: Artur Mintšenkov

Üliõpilaskood: 134215AAVB

Juhendaja: Heiki Tammoja

Tallinn, 2019

(Tiitellehe pöördel)

## 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 /

## Lõputöö kokkuvõte

<i>Autor:</i> Artur Mintšenkov	<i>Lõputöö liik:</i> Bakalaureusetöö
<i>Töö pealkiri:</i> "Gaasiturbiinide kasutamine"	
<i>Kuupäev:</i> 01.05.2019	37 lk
<i>Ülikool:</i> Tallinna Tehnikaülikool	
<i>Teaduskond:</i> Inseneriteaduskond	
<i>Instituut:</i> Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut	
<i>Töö juhendaja(d):</i> Heiki Tammoja	
<i>Töö konsultant (konsultandid):</i> -	
<i>Sisu kirjeldus:</i> Bakalaureusetöö eesmärgiks oli uurida, mis on gaasiturbiin ja selle töö põhimõte. Uurisin, mis tsükliga töötab antud seade ja näitasin erinevate gaasiturbiinide seadmete skeeme. Erilist tähelepanu pöörasin Auru-gaasiturbiini seadmele, mis on tihedamini kasutatav Euroopas ja ka kogu maailmas. Järgmisena kirjutasin gaasiturbiinide konstruktsioonist, põhidetailide materjalidest ja kuna temperatuurid gaasiturbiinides saavutavad 1000°C ja rohkem, uurisin gaasiturbiini materjalide jahutuskeeme. Näitasin välja gaasiturbiinide maailmatootjad ja kõige suuremad firmad, kes gaasiturbiinide toodavad. Lisaks võrdlesin gaasiturbiinide eeliseid ja puuduseid võrreldes auruturbiini ning kolbmootoriga. Viimases peatükis uurisin gaasiturbiini kasutusvõimalusi Eestis. Seal pakkusin välja neli varianti, kuidas saaks gaasiturbiini kasutada meie riigi energiasüsteemis. Esimene on gaasiturbiinide kasutamine tuuleenergeetikas tipukoormuste reguleerimiseks. Kuna gaasiturbiine saab käivitada tunduvalt kiiremini, sobivad nad kasutamiseks varutoiteallikatena ja talitlemiseks energiasüsteemi tippvõimsuse ajal. Teised variandid oli seotud Iru elektrijaamaga ja kuidas seal saaks kasutusse tuua gaasiturbiine. Üks variantidest on lisada olemasolevale veekatele gaasiturbiiniseade, et see toodaks elektrienergiat ja kaugkütet. Teine variant oleks lisada auruturbiini seadmele gaasiturbiin, et see töötaks kombi tsükliga ja toodaks suurt kasutegurit. Viimane variant on gaasiturbiini paigaldamine, et see töötaks avatud tsükliga.	
<i>Märksõnad:</i> Gaasiturbiin, ajalugu, tööprotsess, kasutegur, konstruktsioon, gaasiturbiini eelised ja puudused, maailma tootjad	

## ABSTRACT

<i>Author:</i> Artur Mintšenkov	<i>Type of the work:</i> Bachelor
<i>Title:</i> „The use of gas turbines”	
<i>Date:</i> 01.05.2019	<i>37 pages</i>
<i>University:</i> Tallinn University of Technology	
<i>School:</i> School of Engineering	
<i>Department:</i> Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics	
<i>Supervisor(s) of the thesis:</i> Heiki Tammoja	
<i>Consultant(s):</i> -	
<p><i>Abstract:</i> The purpose of this Bachelor's thesis is to examine what is the gas turbine and the principle of this work. Investigated cycles the device is running and showed different gas turbine schemes. I have paid particular attention to the combined cycle power plant which is so often used around the world. Next I wrote about gas turbine constructions, materials of main components and because the temperatures in gas turbines can reach 1000°C and more, I studied different technologies of cooling gas turbine materials. I also showed the world biggest producers of gas turbines and countries where gas turbines are mostly used. I also compared the advantages and disadvantages of gas turbines compared to steam turbine and piston engine. In the last chapter I studied the possibilities of using gas turbines in Estonia. There I offered four variants for using gas turbines in our country's energy system. The first is the use of gas turbine to regulate peak loads in wind power. Because the gas turbines can be started quiet fast they are suitable for use as back-up power and for operation at peak load of power system. Other variants were related to the Iru power plant and how the gas turbine can be put into operation there. One of the options is to add a gas turbine to an existing boiler to produce electricity and district heating. Another option is to existing steam turbine device add gas turbine device to operate like a combined heat and power plant and produce high efficiency. The last option is to install gas turbine in Iru elekrijaam to run on n open cycle.</p>	
<i>Key words:</i> Gas turbine, history, working process, efficiency, advantages and disadvantages of gas turbine, world biggest gas turbine producers	

# LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema:	Gaasiturbiinide kasutamine
Lõputöö teema inglise keeles:	The use of gas turbines
Üliõpilane	Artur Mintšenkov
Eriala	Elektroenergeetika
Lõputöö liik:	Bakalaureusetöö
Lõputöö juhendaja:	Heiki Tammoja
Lõputöö ülesande kehtivusaeg:	kehtivusaja annab juhendaja
Lõputöö esitamise tähtaeg:	24.05.2019

---

Üliõpilane (allkiri)

---

Juhendaja (allkiri)

---

Õppetooli juhataja (allkiri)

## 1. Teema põhjendus

Maailmas leiavad üha enam kasutamist gaasiturbiinid ja nende baasil talitlevad elektrijaamad Kuna Eestis ei ole hetkel kasutusel GT elektrijaamu on teema aktuaalne! Miks ei ole?

## 2. Töö eesmärk

Millised on gaasiturbiinide arengu suunad ja mis oleks nende põhiline eelis gaasimootorite ees?

## 3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

Kavatsen vastata järgmistele küsimustele:

1. Ülevaade GT tehnoloogiate arengutest.
2. GT kasutegurit mõjutavad tegurid ja arengusuunad et tõsta nende kasutegurit.
3. GT kasutamise võimalused Eestis.

## 4. Lähteandmed

Plaanin kasutama andmeid raamatutest ja internetallikatest.

## 5. Uurimismeetodid

Planeerin uurida praegune situatsioon elektriturul ja proovin teoreetiliselt leida uued suunad seotud minu teemaga et parandada elektrisüsteem meie riigis. Planeerin kasutada valemid, tabelarvutused ja graafikud Excelis.

## **6. Graafiline osa**

Tekstijoonised.

## **7. Töö struktuur**

Sissukord

Lõputöö ülesanne

Eessõna

Sissejuhatus

Kokkuvõte

Kasutatud kirjandus

## **8. Kasutatud kirjanduse allikad**

Planeerin kasutada kõiki kättesaadavaid allikaid (raamatud, teadusartiklid, aruanded, uurimised)

[1] Соколов В.С. Газотурбинные установки: [учебное пособие для средних профессионально-технических училищ]. Москва : Высшая школа, 1986

[2] R.J. Welsh, Geoffrey Waller. The Gas Turbine manual. London: Temple Press, 1951

[3] Tony Giampaolo, MSME, P.E. The gas turbine handbook: principles and practises. Lilburn (Ga.): Fairmont Press; New York; Basel: Marcel Dekker, c2003

[4] Hannes Agabus. Large-scale integration of wind energy into the power system considering the uncertainty information. Tallinn: Tallinn University of Technology Press, c2009 ([Tallinn]: Infotrükk)

Muud allikad lisan töö käiguses.

## **9. Lõputöö konsultandid**

-

## **10. Töö etapid ja ajakava**

02.02-27.02 Lähteandmete kogunemine

03.03-14.04 Teoreetilise osa kirjutamine

16.04 Järelduse kirjutamine, kokkuvõtte koostamine

19.04 Töö esimene versioon valmis

20.04 Juhendajale läbilugemiseks saatmine

24.04-28.04 Paranduste sisseviimine

29.04 Juhendajale teiseks läbilugemiseks saatmine

02.05-08.05 Paranduste sisseviimine

20.05 Töö lõplik versioon valmis

# Sisukord

<b>Autorideklaratsioon</b> .....	2
<b>Lõputöö kokkuvõte</b> .....	3
<b>Abstract</b> .....	4
<b>Lõputöö ülesanne</b> .....	5
<b>Eessõna</b> .....	9
<b>Sissejuhatus</b> .....	10
<b>1 Üldinfo gaasiturbiinidest</b> .....	11
1.2 Gaasiturbiinide kasutus.....	11
<b>2 Gaasiturbiinide ajalugu</b> .....	13
<b>3 Gaasiturbiini töö</b> .....	14
3.1 Gaasiturbiiniseadmete töö põhimõtte.....	14
3.2 Braytoni tsükkel ja gaasiturbiiniseadmete skeemid.....	14
3.3 Auru- gaasiturbiini seade.....	19
3.4 Teiste skeemide näidised.....	20
3.5 Braytoni tsükli kasutegur (Gaasiturbiini kasuteguri arvutus).....	21
3.6 Gaasiturbiini konstruktsioon ja turbiini põhidetallide materjalid.....	22
3.7 Gaasiturbiinide jahutuskeemid.....	22
<b>4 Gaasiturbiinide maailmatootjad</b> .....	24
<b>5 Gaasiturbiini eelised ja puudused</b> .....	28
5.1 Gaasiturbiini võrdlus auruturbiiniga.....	28
5.2 Gaasiturbiini võrdlus kolbmootoriga.....	28
5.3 Gaasiturbiin elektrijaama võrdlus teiste elektrijaamadega.....	29
<b>6 Võimalik GT kasutamine Eestis</b> .....	32
<b>Kokkuvõtte</b> .....	35
<b>Kasutatud kirjandus</b> .....	36



## **Eessõna**

Lõputöö teema „Gaasiturbiinide kasutamine“ oli pakutatud juhendaja poolt Heiki Tammoja. Bakalaureusetöö uurimismeetod paiknes kirjanduse analüüsil. Oli kasutatud nii trükitud kui ka internet allikaid. Lõputöö annab ülevaate gaasiturbiini tööprotsessist, selle eelistest ja puudusest, gaasiturbiini kasutegurit mõjutavat tegurid ja arengusuunad kuidas saab kasutegurit tõsta. Proovin ka uurida kuidas saaks gaasiturbiinid kasutada meie riigis.

Autor tänab oma juhataja Heiki Tammoja.

## Sissejuhatus

Gaasiturbiinid on kütuse- ja energiakompleksi üks peamisi komponente paljudes maailma riikides. Tänapäeval enam kui 65% maailmas kasutusele võetud uued elektrigeneraatorid põhinevad gaasiturbiinide kasutamisel, mis ületavad mitmel viisil traditsioonilisi söeküttega auruturbiinitehaseid. Gaasiturbiinidel põhinevaid elektrijaamu kasutatakse elektri- ja soojusenergia peamiseks või varunduslikuks allikaks tööstus- või kodumajapidamises. Gaasiturbiinid osana elektrijaamadest on ette nähtud kasutamiseks kõikides kliimatingimustes. Gaasiturbiinide rakendused on praktiliselt piiramatud.

# 1 Üldinfo gaasiturbiinidest

Gaasiturbiin on pideva toimega soojusmootor, mille labaaparaadis on kokkusurutud ja kuumutatud gaasi energia muundatud võlli mehaaniliseks tööks. See koosneb rootorist (korpuse külge kinnitatud töötavad labad) ja staatorist (korpuse külge kinnitatud juhikuid). [1]

Gaasiturbiin juhib sellega samal teljel asuvat generaatorit, mis on gaasiturbiini kasulik töö.

Gaasiturbiini kasutatakse osana gaasiturbiinmootoritest (mida kasutatakse transpordiks) ja gaasiturbiinipaigaldistes (kasutatakse koostootmisjaamades osana statsionaarsest gaasiturbiinist, auru-gaasiseadmest). [2]

## 1.2 Gaasiturbiinide kasutus

Täna on gaasiturbiiniseadmed põhilised lennunduses kasutatavad mootoriliigid, mis on tingitud nende konstruktsiooni lihtsusest, võimest kiiresti arendada koormust, suurest võimsusest vähese kaalu juures, juhtimise täielikust automatiseerimisest.

Energeetikas töötavad gaasiturbiiniseadmed (GTS) peamiselt ajal, kui tõuseb järsult energia tarbimine, s.t. kooruse tippunnil. Kuigi GTS kasutegur on madalam auruturbiiniseadmete kasutegurist (20-100 MWh võimsuse juures küündib GTS kasutegur 20-30%), on nende tippunni režiimis kasutamine kasulik, kuna käivitamisele kulub palju vähem aega.

Mõningates tippgaasiturbiiniseadmetes kasutatakse elektrigeneraatorit turboreaktiivsete, lennunduses oma aja ära teeninud lennukimootorite pöörlemapaneva turbiinigaasi allikana. Olulist kokkuhoidu võib oodata aurugaasiseadmetelt (AGS), kus ühiselt töötavad nii auruturbiin- kui gaasiturbiiniseadmed. Võimaldades mõne protsendi võrra vähendada kütusekulu võrreldes parimate auruturbiiniseadmetega.

Kõrvuti auruturbiiniseadmete ja sisepõlemismootoritega kasutatakse gaasiturbiiniseadmeid põhimootoritena teisaldavates elektrijaamades.

Naftadestilleerimise ja keemiatootmise tehnoloogilistes protsessides kasutatakse põlevjätmeid gaasiturbiinide põhiküttena.

Gaasiturbiiniseadmeid kasutatakse laialdaselt raudtee-, mere-, jõe- ja autotranspordil. Nii on gaasiturbiiniseadmed kiirekäiguliste laevade veealustel tiibadel ja õhupadjal mootoriks. Raskeveosõidukitel võib neid kasutada nii põhi, kui abimootorina, mõeldud õhu etteandmiseks põhilisse sisepõlemismootorisse ning mis töötab selle väljaheitegaasidel.

Lisaks teenivad gaasiturbiiniseadmed maagaasi täitepumpade ajamina magistraalgaasijuhtmetel, tuletõrjepumpade reserv gaasigeneraatoritel.

Tavaliselt on gaasiturbiiniseadmed kindlad ja lihtsad kasutuses, seda vaid kehtestatud reeglite ja töörežiimide rangel järgimisel, millede rikkumine võib esile kutsuda turbiini lagunemise, kompressorite vigastuse, plahvatuse põlemiskambrites jm.

Gaasiturbiini energiaseadmeid kasutatakse soojus- ja elektrivarustuse alalis-, reserv- või avariiallikana nii linnades, kui kaugel asuvates, raskesti juurdepääsetavates piirkondades. Gaasiturbiiniseadmete toodangu põhitarbijateks on: naftatootmistööstus, gaasitootmistööstus, munitsipaalasutused, eluaseme- ja kommunaalvaldkond, põllumajandus, veepuhastusseadmed, jäätmete utiliseerimine.

Gaasiturbiini energiaseadmete elektrivõimsus hälbib kümnetest kilovattidest sadade megavattideni. Suurim kasutegur saavutatakse kas kogeneratsiooni (koostootmise) režiimis töötades (soojus- ja elektrienergia ühine väljatöötlus) või trigeneratsiooni režiimis töötades (soojus-, elektrienergia ja külmaenergia ühine väljatöötlus).

Võimalus saada odavat soojus- ja elektrienergiat eeldab tarnitud gaasiturbiiniseadme kiiret tasuvust. Selline väljaheitelgaaside katel-utilisaatoriga ühitatud seade võimaldab üheaegselt toota nii soojus-, kui elektrienergiat, tänu millele saavutatakse parimaid kütuse kasutamise efektiivsuse näitajaid.

Sõltuvalt Tellija vajadustest kasutatakse turbiinist väljuvaid äratöötatud gaase kuuma vee või auru tootmiseks. [3]

## 2 Gaasiturbiinide ajalugu

Kaheksateistkümnendal sajandil sai Briti leiutaja John Barber patendi seadmele, millel oli enamik moodsates gaasiturbiinides sisalduvaid elemente. [4]

19. sajandil saksa inserer F. Stolze püüdis luua gaasiturbiin mootor, aga ka ei õnnestunud kuna see ei antud kasulikku võimsust. [5]

20. sajandi alguses prantsuse insenerid Marcel Armengo ja Charles Lemal ehisid gaasiturbiinmootor, mis põletas kütust konstantsel rõhul, kuid selle madala kasuteguri tõttu ei saanud ta tööstuslikku rakendust.

1939 aastal Šveitsi ettevõtte Brown, Boveri & Cie. paigaldas esimene gaasiturbiin-generaator-agregaadi võimsusega 4MW ja kasuteguriga 18-20%. Seda aega võib pidada esimese tööstusliku statsionaarse gaasiturbiinitehase sünniks. [4]

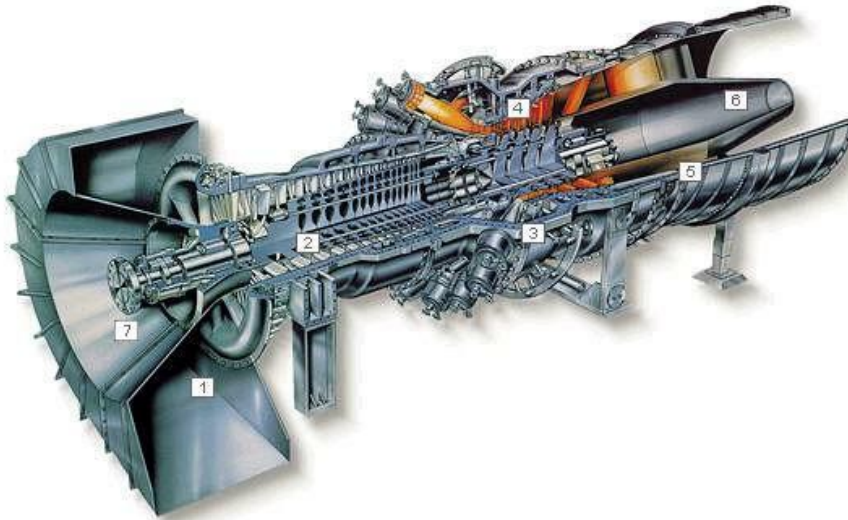
Gaasiturbiiniseadmete arengu algusetappidel kasutati nendes kütuse põletamiseks kahte tüüpi põlemiskambreid. Esimest tüüpi põlemiskambri suunati kütus ja oksüdant (õhk) protsjonitena. Segu süüdati ja see põles suletud ruumis, misjärel saabusid põlemistooted turbiini. Sellises põlemiskambris ei ole temperatuur ja rõhk alalised: kütuse põlemisel need suurenevad järsult.

Ajapikku ilmnisid esimest tüüpi põlemiskambrite vaieldamatud eelised. Mistõttu põletatakse kaasaegsetes gaasiturbiiniseadmetes kütust enamjaolt alalise rõhuga põlemiskambrites.

Esimestel gaasiturbiiniseadmetel oli madal kasutegur, kuna gaasiturbiinid ja kompressorid olid ebatäiuslikud. Vastavalt nende agregaatide täiustamisele suurenes gaasiturbiiniseadmete kasutegur ning nad muutusid konkurentsivõimelisteks teiste soojusmootorite liikide suhtes. [3]

## 3 Gaasiturbiini töö

### 3.1 Gaasiturbiiniseadmete töö põhimõtte



*Joonis 3.1 Kaasaegse statsionaarse gaasiturbiini joonis [6]*

Atmosfääriõhk antakse läbi filtrisüsteemiga (skeemil ei ole näidatud) varustatud õhukoguri (1) paljuastmelise telgkompressori (2) sisendile. Kompressor surub atmosfääriõhu kokku ja suunab selle kõrge rõhu all põlemiskambrisse (3). Samal ajal antakse turbiini põlemiskambrisse pihustite kaudu ka teatud kogus gaasikütust. Kütus ja õhk segunevad ning süttivad. Kütusõhksegu põleb ära, eraldades suures koguses energiat. Gaasitaoliste põlemistoodete energia muundub mehhaaniliseks tööks turbiinilaba tulise gaasi jugadega pöörlemise arvel (4). Osa saadud energiast kulutatakse õhu kokkusurumiseks turbiini kompressoris (2). Ülejäänud osa tööst antakse edasi elektrigeneraatorile läbi ajami telje (7). Gaasiturbiini jaoks on selline töö kasulik. Temperatuuriga 500-550 °C põlemistoodet väljutatakse läbi turbiini väljaheitetrakti (5) ja difusoori (6) ning mida võib seejärel kasutada näiteks soojusutilisaatoris soojusenergia saamiseks. [6]

### 3.2 Braytoni tsükkel ja gaasiturbiiniseadmete skeemid

Gaasiturbiine kirjeldatakse Braytoni termodünaamilise tsükliga. Braytoni/Džauli tsükkel - termodünaamiline tsükkel, mis kirjeldab gaasiturbiini, turboreaktiivse ja otsevoolulise sisepõlemismootori tööprotsesse, samuti gaasiturbiini välispõlemismootoreid gaasitaolise (ühefaasilise) töökeha suletud kontuuriga.

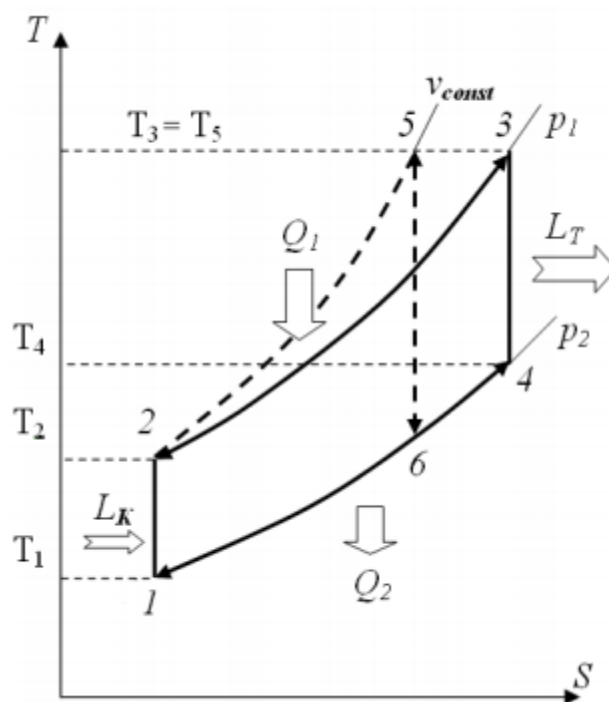
Tsükkel on nimetatud ameerika inseneri George Braytoni auks, kes leiutas selles tsükli töötava kolbisepõlemismootori.

Vahest nimetatakse seda ka Džauli tsüklik - soojuse mehhaanilise ekvivalendi määranud inglise füüsiku James Joule auks. [7]

Eksisteerib kaks Braytoni tsükli modifikatsiooni, mis erinevad soojuse etteandmise termodünaamiliste protsesside poolest: soojuse etteandmisega tsükkel alalise rõhu korral, lühidalt nimetatakse seda Braytoni tsükliks  $p=\text{const}$ , ja soojuse etteandmisega tsükkel alalise mahu korral, mida nimetatakse Braytoni tsükliks  $v=\text{const}$ . [8]

Joonisel 1.2.1 on T, S-koordinaatides näidatud mõlemad tsükliid, mis moodustuvad nelja järjestikku realiseeruvate protsessidega:

- adiabaaatilise kokkusurumisega (protsess 1–2);
- soojuse isobaarse (protsess 2–3) või isokroomse (protsess 2–5) etteandmisega;
- adiabaaatilise laiendamisega (protsessid 3–4 või 5–6);
- soojuse isobaarse ärajuhtimisega (protsess 4–1). [8]



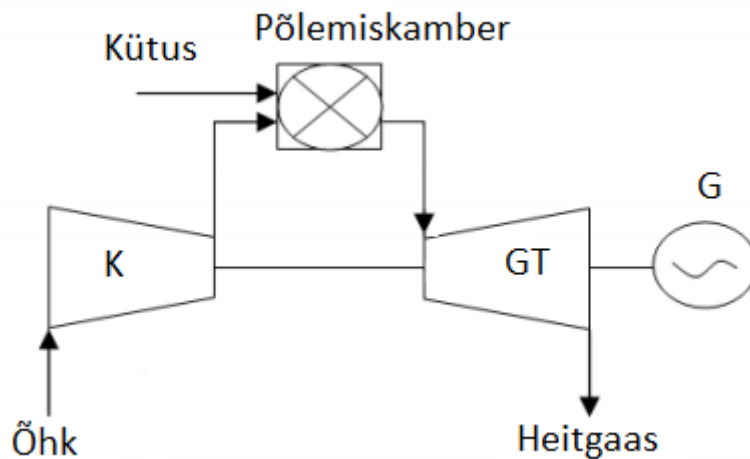
Joonis 3.2.1 Ideaalne Braytoni tsükkel [8]

Рис. 1.1 Идеальный Брайтонский цикл

1–2–3–4–1 — сожусе еттеандмисега тсүккел  $p=\text{const}$ ;

1–2–5–6–1 — сожусе еттеандмисега тсүккел  $v=\text{const}$

Kokkusurumise protsessis juhitakse tsüklile LK töö, laiendamisel juhitakse ära LT töö. Jooniselt 3.2.1. on näha, et  $LT > LK$ , nende vahe moodustabki tsükli kasuliku töö. Kasulik vahe saavutati töös juurdeviidud  $Q_1$  ja ärajuhtitud  $Q_2$  vahe arvelt soojuse tsükliks. Joonisel 3.2.2. on näidatud seadme põhimõtteline skeem, realiseerides Braytoni tsükli soojuse etteandmisega alalise rõhu korral.

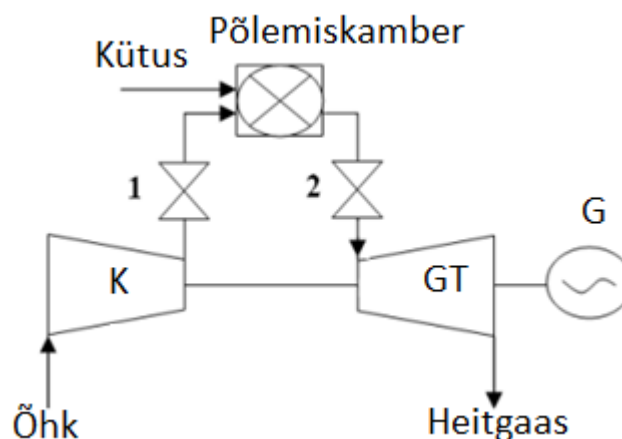


Joonis 3.2.2 Printsipiaalne alalise põletamise GT skeem, mis töötab Braytoni tsükli  $p=\text{const}$ . [8]

K — kompressor, GT — gaasiturbiin, G — elektrigeneraator

Selliseid seadmeid nimetatakse sageli katkematu põlemise seadmeteks. Nimetatud seadmel pumbatakse töösoojus (õhk) atmosfäärist rõhu  $P_1$  juures kompressoriga K, surutakse kokku etteantud LK töö arvelt rõhuni  $p_2$  ning suunatakse põlemiskambrisse. Põlemiskambrisse antakse kütus, mis alalise rõhu juures põleb ära, tagades soojuse etteandmise  $Q$ . Tänu kütuse ärapõlemisele suureneb töökeha temperatuur  $T_2$  kuni  $T_3$  (vt. joonis 3.2.1.). Seejärel suundub töökeha (nüüd on see juba gaas, mis kujutab endast õhu ja põlemistoodete segu) gaasiturbiini (GT), kus atmosfääriõhuni laienedes korraldab LT tööd. Peale turbiini heidetakse gaasid atmosfääri, läbi mille tööstükkel ka sulgub. Turbiini ja kompressori töö vahet tajub elektrigeneraator (G), mis vastavalt joonisel 3.2.2. toodule paikneb turbiini ja kompressoriga ühel völliil. [8]

Seadme põhimõtteline skeem Braytoni tsükli  $v=\text{const}$  realiseerimiseks on näidatud joonisel. 3.2.3.



Joonis 3.2.3 . Printsipiaalne katkelise põletamise GT skeem, mis töötab Braytoni tsükli  $v=\text{const}$ . [8]

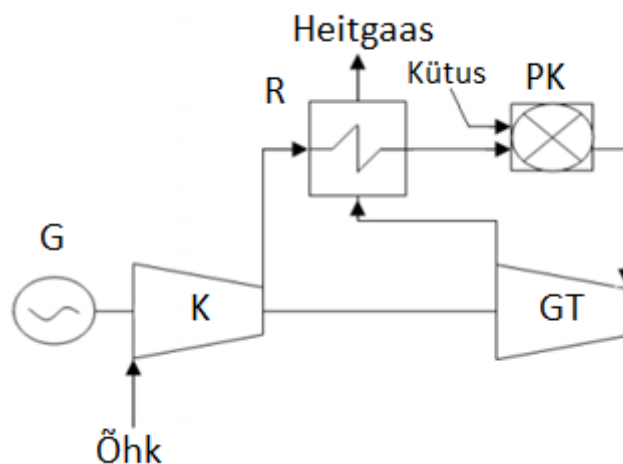
K — kompressor, GT — gaasiturbiin, G— elektrigeneraator, 1 и 2 — klapid



Erinevalt eelmisest skeemist ilmuvad siia kaks klappi 1 ja 2. Kompressor pihustab õhku põlemiskambrisse läbi klapi 1, kusjuures klapp 2 on suletud. Kui põlemiskambris olev rõhk tõuseb näiduni  $p_2$ , klapp 1 suletakse. Mille tulemusel osutub põlemiskambri maht suletuks. Suletud klappide 1 ja 2 korral antakse põlemiskambrisse ja põletatakse kütust ning loomulikult toimub selle põlemine täismahus. Tulemusel (joonis 3.2.1.) suureneb täiendavalt ka töökeha rõhk. Seejärel avatakse klapp p ja töökeha suundub gaasiturbiini. Loomulikult hakkab seejuures turbiini ees olev rõhk alanema. Kui see jõuab atmosfääriliseni, tuleb klapp 2 sulgeda, klapp 1 avada ja korrata järjestikuseid toimunguid. Selliseid seadmeid nimetatakse katkendliku põlemisega seadmeteks. [8]

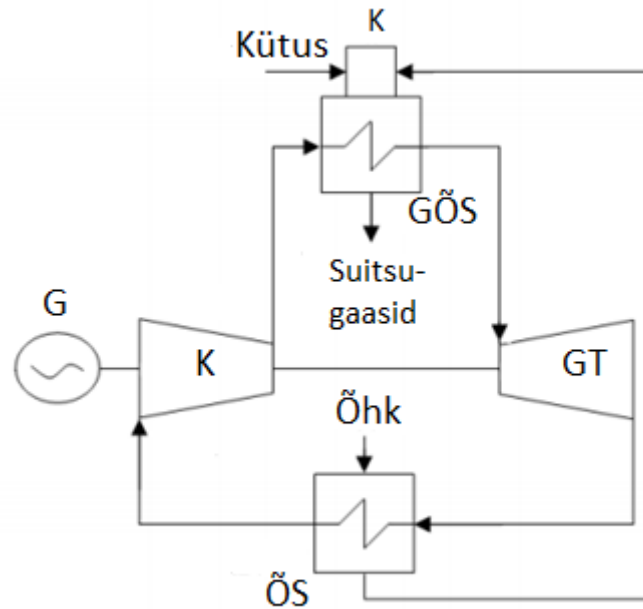
Kui vaadelda mõlemat Braytoni tsükli realiseerimist termodünaamilisest vaatepunktis, on viimane variant eelistatavam. Kuid kui vaadelda tehnilise realiseerimise võimalusi, jääb viimane variant oluliselt kaotusseisu. Asi pole mitte niivõrd vajaduses pidevalt manipuleerida klappidega 1 ja 2, selle võib teha ka automaatika ülesandeks. Palju tähtsam on asjaolu, et teljelised turbomasinad suudavad efektiivselt töötada vaid alg- ja lõpprõhkude üsna kitsas vahemikus (edasistes peatükkides püüame antud asjaolu selgitada). Mistõttu tekib tsükli  $v=\text{const}$  realiseerimisel terve rida tehnilisi probleeme, mida esialgu ei ole õnnestunud radikaalselt lahendada. Nimetatud tsükli rakendatakse vaid terve rea spetsiifiliste tingimuste korral (näiteks raketimootorites), kuigi taoliste lahenduste otsing jätkub ka täna. [8]

Võrreldes kahte ülaltoodud Braytoni tsükli varianti sisepõlemismootorite tsüklitega, võime teha järelduse, et tsükkel  $p=\text{const}$  on lähedane Otto tsüklile, tsükkel  $v=\text{const}$  aga - Dieseli tsüklile. Mõlemad tsüklid on edukalt kasutatavad, mis on tingitud kolvimasinate tööprptsesside erinevusest telgmasinatest. Pöördume veelkord joonisele 3.2.1. Gaasi temperatuur turbiini T4 taga on kõrgem kompressoris T2 kokusurumisjärgsest õhutemperatuurist (nii toimub enamuses). Sellega seotult ei ole otstarbekas kasutada õhu soojendamiseks osa õhku heidetavate gaaside soojusest, vähendades sellega protsessi kütusekulu 2-3 korda. Seda tsükli hakkame nimetama Braytoni regeneratiivseks tsüklis. Selle realiseerimise skeem on toodud joonisel 3.2.4. Erinevalt eelnevast skeemist ilmus siia täiendav element - põlemiskambri ees paiknev regeneraator. [8]



Joonis 3.2.4 . Printsipiaalne GT seadme skeem, töötav Braytoni regeneratiiv tsükliga [8]

R — regeneraator, K — kompressor, PK— põletamiskamber, GT — gaasiturbiin, G — elektrigeneraator  
 Kõik ülalvaadeldud seadmed töötavad niinimetatud lahutatud skeemi kohaselt eeldusega, et õhku võetakse atmosfäärist, kuhu heidetakse ka turbiinis äratöötatud gaasid. Võimalik on ka muu, joonisel 3.2.5 näidatud Braytoni tsükli realiseerimise meetod. [8]



Joonis 3.2.5 . Kinnine GT seadme skeem [8]

K — küttekolle, GÕS — gaasõhu soojusvaheti, ÕS — õhu soojusvaheti, K — kompressor, GT — gaasiturbiin, G — elektrigeneraator

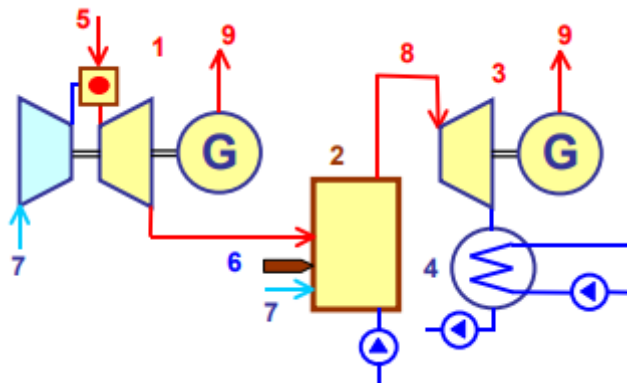
See skeem erineb soojuskandja tsirkuleerimise suletud kontuuri poolest, vastavalt millele nimetatakse taoliseid seadmeid suletud gaasiturbiiniseadmeteks. Sellise töömeetodi korral on põlemiskambrite kasutamine välistatud, kuna õhu hapnikuvaru ammendub väga kiiresti, misjärel on kütuse põlemine võimatu. Seetõttu juhitakse soojusenergiat konvektiivses soojusvahetis (teisiti öeldes - läbi seinä). Nii ilmub skeemi gaasõhu soojusvaheti (GÕS) ja sellele lülitatud küttekolle T. Küttekoldes põletatakse kütust ja sinna juhitakse kütuse põlemiseks vajalik õhk. Töökeha tsirkuleerimise suletud kontuuri korral tuleb protsessis 4-1 korraldada soojuse ärajuhtimine. Üheks loogiliseks viisiks on protsessi 4-1 soojuse kasutamine küttekoldesse antava õhu soojendamiseks, mis aitab alandada kütuse kulu. Just taoline viis on valitud seadmel, mille skeem on toodud joonisel 3.2.5. Tulemusel ilmus skeemi veel üks soojusvaheti - õhu soojusvaheti (GÕS), milles soojeneb küttekoldesse saabuv õhk. Antud skeemis on töökehaks õhk. Kuid tsirkuleerimise suletud kontuuris võib põhimõtteliselt kasutada mistahes gaasi. Lisaks ei ole tsirkuleerimise suletud skeemi korral põhjust arvata, et rõhk p2 vastab atmosfääriõhule, see võib võtta mistahes mugava tähenduse. [8]

### 3.3 Auru- gaasiturbiini seade

Auru- ja gaasiseadmed toodavad elektrit ja soojust. Soojusenergiat kasutatakse täiendava elektrienergia tootmiseks. Auru- ja gaasiseade koosneb kahest eraldi seadmest: auru- ja gaasiturbiinist. [9]

Seade koosneb kahest plokist: gaasiturbiini- ja aurujõuseadmest. Gaasiturbiinis on turbiinivõlli pöörlemine võimaldatud tänu põlemissaadustele, mis tekivad maagaasi, kütteõli või diislikütuse põletamise tulemusena. Gaasiturbiini paigaldatud põlemiskambris moodustuvad põlemissaadused panevad turbiini rootori pöörlema ja omakorda pöörleb esimese generaatori võll.

Gaasiturbiini esimeses tsüklis kasutegur harva ületab 38%. Gaasiturbiiniseadmest ära kasutatud põlemissaadused (mis siiski säilitavad kõrge temperatuuri) sisenevad niinimetatud jäätmeküttekatalasse. Seal nad soojendavad auru temperatuurile ja rõhule, mis on piisavad auruturbiini käivitamiseks, millega on ühendatud teine generaator. Teises, aurujõu tsüklis, kasutatakse umbes 20% põletatud kütuse energiast. Kokku on kogu seadme kasutegur umbes 58%. [10]

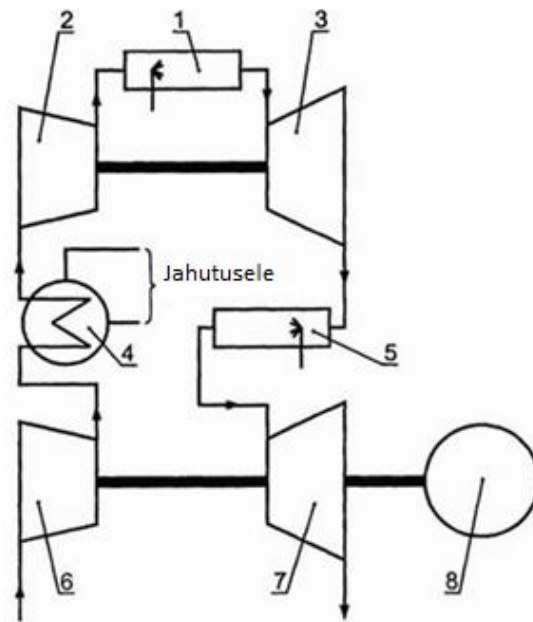


Joonis 3.3 Gaasiturbiini ja auruturbiini koostoime kombineeritud elektrijaamas [11]

1 - gaasiturbiiniseade, 2 - aurukatel, 3 - auruturbiiniagregaat, 4 - kondensaator, 5 - gaasiturbiinikütus, 6 - katlakütus, 7 - õhk, 8 - aur, 9 - saadav elektrienergia

Elektrijaamad kombineeritud tsükliga seadmete baasil ei ole mitte ainult väga tõhusad, vaid vastavad ka kõige rangematele keskkonnanõuetele. Näiteks on selliste elektrijaamade lämmastikoksiidi heitkogus 2–3 korda väiksem kui gaasi või diislikütuse puhul.. Seetõttu on umbes 65% kogu maailmas ehitatavatest elektrijaamadest varustatud kombineeritud tsükliga seadmetega. [12]

### 3.4 Teiste skeemide näidised

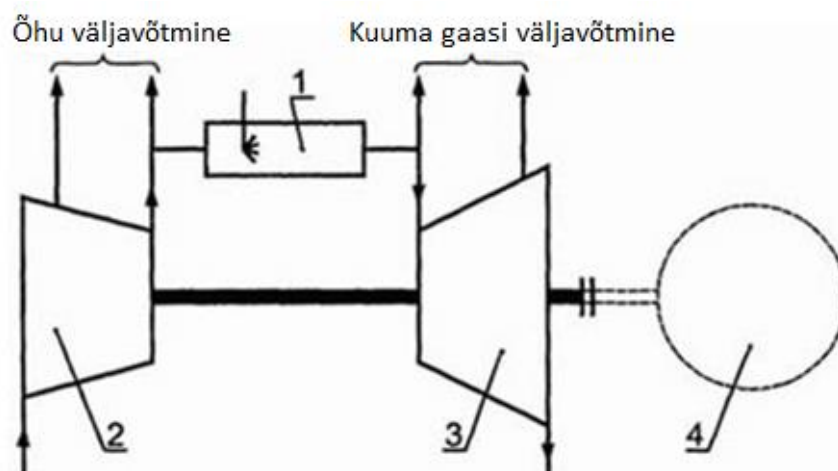


Joonis 3.4.1 . GT seadme skeem mõnivõllise gaasiturbiin mootoriga keeruka tsükliga (vahejahutusega ja vahepealse soojendusega) [13]

1 - põlemiskamber; 2 - kõrgsurve kompressor; 3 - kõrgsurve turbiin; 4 - vahejahuti; 5 - vahepealse kuumutusega põlemiskamber; 6 - madalrõhu kompressor; 7 - madala rõhuga turbiin; 8 - koormus

Märkus – võimsuse väljavõtt gaasiturbiin mootorist teostatakse madala rõhu rootori võllist.

Antud skeem näitab mootor, mille termodünaamiline tsükkel hõlmab töövedeliku jahutamist selle kokkusurumise ajal (töövedeliku kuumutamine selle laiendamise ajal). Kompressori õhu kokkusurumise ajal tehtud töö vähendamine ja töögaasi turbiinis laiendamisega saadud töö suurendamine. [13]



Joonis 3.4.1 . GT seadme ühevõlli GT mootoriga õhu ja kuuma gaasi väljavõtmisega [13]

1 - põlemiskamber; 2 - kompressor; 3 - turbiin; 4 - koormus

GT seade koos õhu (gaasi) väljavõttega - mootor, mille väliseks kasutamiseks on ette nähtud suruõhuvoolu väljavõtte kompressori astmete vahel ja / või kompressorist väljalasel (kuuma gaasi turbiinisse sisselasel ja / või turbiini astmete vahel) [13]

### 3.5 Braytoni tsükli kasutegur (Gaasiturbiini kasuteguri arvutus)

Braytoni ideaalse tsükli termilist kasutegurit on kombeks väljendada valemiga:

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

kus  $\pi = p_2/p_1$  — rõhu tõstmise tase isoentroopilise kokkusurumise protsessis (1 - 2);

k — adiabaadi näitaja (õhule 1,4)

Eraldi tasub meelde jätta, et see üldtuntud tsükli kasuteguri arvestamise viis varjutab toimuva protsessi olemust. Termodünaamilise tsükli piirikasutegurit arvestatakse välja läbi temperatuurisuhete Carno valemi alusel:

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

kus  $T_1$  - külmiku temperatuur;

$T_2$  - soojendaja temperatuur.

Täpselt sama temperatuurisuhet võib väljendada läbi tsükli rakendavate rõhusuhete ja adiabaadi näidete suuruste:

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

Niisiis sõltub Braytoni tsükli kasutegur tsükli alg- ja lõpptemperatuurist täpselt samapalju, kui Carno tsükli kasutegurist. Töökeha soojendamise lõputult väikse suuruse juures liinil (2-3), võib protsessi lugeda isotermiliseks ja täielikult ekvivalentseks Carno tsükliga. Töökeha  $T_3$  soojendamise suurus isobaarilise protsessi korral määratleb töö suurust töökeha tsükli kasutatud kogus, kuid ei mõju mingil määral tsükli termilisele kasutegurile. Kuid tsükli praktilise realiseerimise korral teostatakse soojendamist tavaliselt suurte suurusteni, kus kasutatavate materjalide kuumakindlus on piiratud, eesmärgiga minimeerida töökeha kokkusurumist ja laiendamist teostavate mehhanismide mõõtmeid. [7]

Praktikal nimetatakse hõõrdumist ja turbulentsust:

Mitteadiabaatiliseks kokkusurumiseks: rõhu antud üldkoefitsiendi korral on kompressori pihustamistemperatuur ideaalsest kõrgem.

Mittediabaatiline laiendus: kuigi turbiini temperatuur langeb tööks vajalikule tasemele, ei mõju see kompressorile, rõhu koefitsient on kõrgem, mille tulemusel ei ole laiendus piisav kasuliku töö tagamiseks.

Rõhukaod õhukoguris, põlemiskambris ja väljundil: laiendamise tulemusel ei ole piisav kasuliku töö tagamiseks.

Nagu ka kõikides tsüklilistes soojusmootorites - mida kõrgem on põlemistemperatuur, seda kõrgem kasutegur. Ohjeldavaks faktoriks on terase, nikli, keraamika või muude materjalide võime, milledest koosneb mootor, taluda temperatuuri ja rõhku. Suurem osa tehnilistest väljatöötlustest on suunatud sellele, et turbiini osadest juhtida eemale soojust. [7]

### **3.6 Gaasiturbiini konstruktsioon ja turbiini põhidetailide materjalid**

Gaasturbiini konstruktsiooni kuulub neli põhilist detailigruppi, mis määratlevad mootori töö püsikindlust:

-kettad, rõngad ja muud pöörlevad rootori detailid

-labad

-võllid

-keredetailid

Turbiini rootori labad töötavad üsna karmides tingimustes - ühitades selliseid koormuseid ja temperatuure, mis ei ole iseloomulik turbiini ülejäänud komponentidele. [14]

Laba materjalil peab olema kõrge korrosiooni- ja erosioonivastane takistus, kõrge väsimuspinge ja löögikoormus. Seejures omab tähtsust ka sulami tihedus, mis mõjub ketta tsentrifugaaljõule ja massile. Kasutatavad materjalid: niklist kuumakindlad terased, kuuma-, korrosioonikindlad sulamid. Välismaiste tööstusturbiinide labade valmistamiseks kasutatakse nikli või koobalti põhiseid sulameid. Samuti kasutatakse turbiinide labadeks metallist (kaitstakse põhimaterjali oksüdeerumise ja korrosiooni eest) ja keraamilisi (tagavad detailidesse tungiva soojusvoolu vähendamist kaitsekihi vähendatud soojusjuhtivuse arvel) kaitsekatteid. [15]

### **3.7 Gaasiturbiinide jahutuskeemid**

Kaasaegses gaasiturbiinis tuleb jahutada praktiliselt kõiki detaile: sisend- ja väljundharutoru, staatorit, rootorit ja kettaid, laagrite korpuseid. Kuid põhiprobleemid on seotud teraaparaadi ja eriti turbiini töölabade jahutamisega.

Enamike kaasaegsete gaasiturbiiniseadmete jahutamiseks kasutatakse õhukompressori erinevatelt tasemetelt võetavat õhku. Juba töötavad gaasiturbiiniseadmed, milles jahutamiseks kasutatakse veeauru, mis on õhust parem jahutav agent. Jahutatav õhk heidetakse peale soojendamist jahutatavas detailis gaasiturbiini läbivoolavasse ossa. Sellist jahutussüsteemi nimetatakse avatuks. Eksisteerivad suletud jahutussüsteemid, milles detailis soojendatud jahutusagent suunatakse külmikusse ja tagastatakse taas detaili jahutamiseks. Selline süsteem, lisaks sellele, et on üsna keeruline, nõuab ka külmikust võetava soojuse utiliseerimist.

Gaasiturbiini jahutussüsteem - on gaasiturbiiniseadmes kõige keerulisem süsteem, mis mäartleb selle tööaega. Tagab mitte ainult töö ja düüslabade, vaid ka töölabasid kandvate kereelementide, ketaste lubatud taseme ülalhoidu, nende laagritihendite lukustamist, kus tsirkuleerib õli jne. See süsteem on

äärmiselt haruline ja korraldatakse nii, et iga jahutatav element saaks vastavate parameetritega ja vastavates kogustes jahutavat õhku, mis on vajalik tema optimaalse temperatuuri ülalhoidmiseks. Detailide ülemäärane jahutamine on sama kahjulik kui ebapiisav jahutamine, kuna tingib jahutatava õhu suurenenud kulu, mille kokkusurumiseks kulutatakse kompressoris turbiini võimsust. Lisaks tingivad õhu suurenenud kulud jahutamisele turbiini taga olevate gaaside temperatuuri alanemist, mis mõjub oluliselt gaasiturbiini seadmele paigaldatud seadmestiku tööle (näiteks auruturbiiniseade, mis töötab auruturbiiniseadme koosseisus). Ja lõpuks peab jahutussüsteem tagama mitte ainult detailide temperatuuri vajaliku astme, vaid ka nende võrdse soojendamise, välistades ohtlike temperatuuripingete tekkimist, millede tsükliline mõju tingib mõrade tekkimise.

Gaaside algtemperatuuri kasvuga kasvab ka gaasiturbiiniseadmete tsükli ökonoomsus ja alaneb õhukulu. Seejuures on algtemperatuuri kasv piiratud töölabades lubatud pingetega. Selle tulemusel on gaasiturbiiniseadmetes gaasi algtemperatuurid oluliselt madalamad võimalikest teoreetilistest, s.t. kütuse põletamistemperatuuridest minimaalse õhu ülekuluga, mis on vajalik vaid selle oksüdeerimiseks.

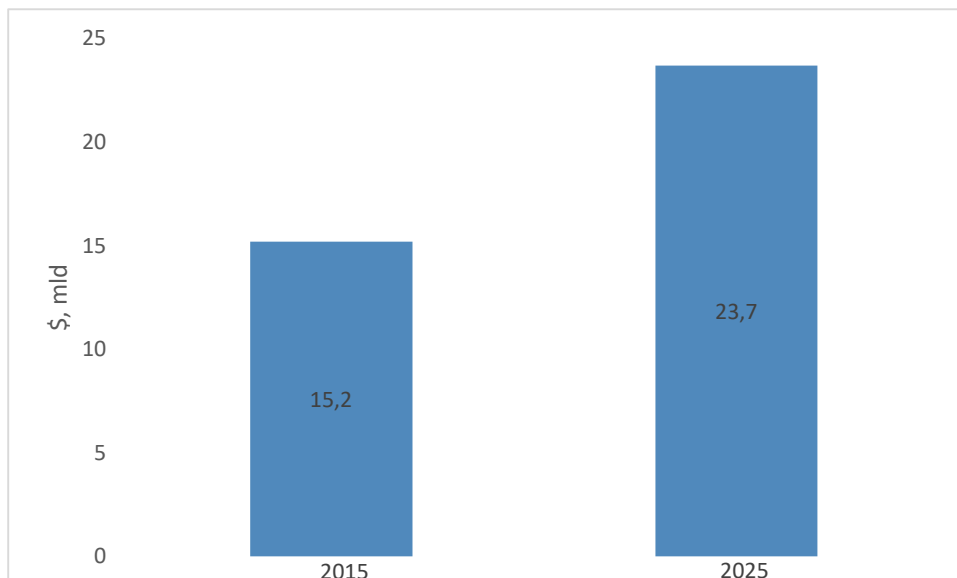
Gaasiturbiini elementide temperatuuri alandamine jahutamise tulemusel võimaldab tõsta gaasiturbiiniseadmete tsükli termodünaamilist potentsiaali gaasi algtööt temperatuuri suurendamise arvelt. Jahutust on otstarbekas kasutada juhul, kui tulu kasuteguris töögaasi algparameetrite võimalikust suurendamisest on suuremad jahutamise tingitud kadudest. Lisaks ei peaks gaasiturbiiniseadme jahutussüsteem ülemääraselt raskendama turbiini konstruktsiooni ja gaasiturbiiniseadme skeemi ning selle tulemusel tõstma selle hinda, nõudma hoolduspersonalit sekkumist gaasiturbiiniseadme kasutamisel ning peab kindlalt töötama käivitamisel, seiskamisel ja ülekanderežiimidel. [16]

Täna on insenerid läinud teist teed. Nende sõnul on vaja jahutada selle gaasiturbiini elemente, mida uhuvad kuumad gaasid. Esmajärjekorras käib see düüsiaparaatide ja gaasiturbiini töörotta labade kohta. Ning sellel eesmärgil on välja pakutud terve rida erinevaid lahendusi.

Nii pakutakse teha labad õõnsateks ja jahutada neid seestpoolt kas siis külma õhuga, või siis vedelikuga. On ka teine ettepanek - puhuda laba pind üle külma õhuga, luues selle ümber külma kaitsekile, justkui riietades laba külmast õhust koosnevasse särki. Lõpuks võib laba valmistada poorsest materjalist ning läbi nende pooride anda seestpoolt jahutavat vedelikku, et laba justkui "higistaks". Kuid kõik need ettepanekud on vahetu konstruktiivse lahenduse juures väga keerulised. [17]

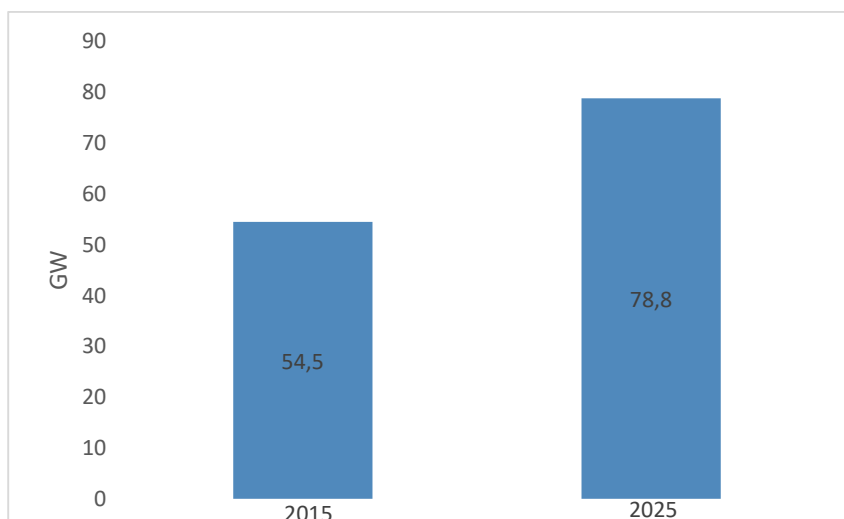
## 4 Gaasiturbiinide maailmatootjad

Analüütikute hinnangul kasvab gaasiturbiinide müük maailmas 2025. aastaks 2015. aastaga võrreldes rohkem kui 8 miljardi dollari võrra ja jõuab 23,7 miljardi dollarini, mille aastane kasvumäär on keskmiselt 4,5% (graafik 2.1). [18]



*Graafik 4.1 Ülemaailmne gaasiturbiinide müük 2015. ja 2025. aastatel, miljardi dollariga [18]*

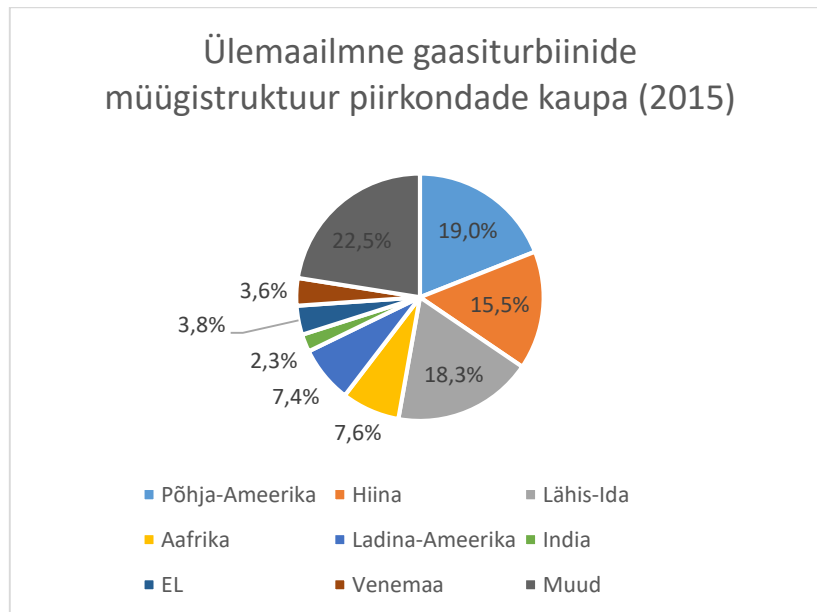
Elektrijaamade osas kasvab gaasiturbiinide müük 54,5-lt 2015. aastal 78,8 GW-le 2025. aastal (CAGR 3,7%) ning kõigi ajavahemikul 2015-2025 toodetud turbiinide koguvõimsus on umbes 693,3 GW, millest kuni 90% kasutatakse elektri tootmiseks (graafik 2.2). [18]



*Graafik 4.2 Ülemaailmne gaasiturbiinide müük 2015. ja 2025. aastatel, GW [18]*

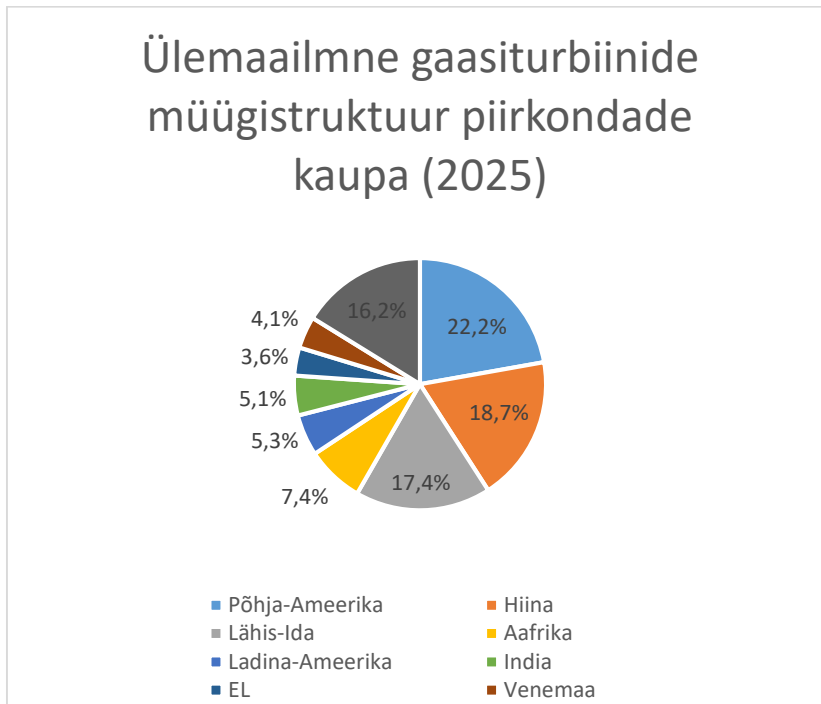


Vaatlusalusel perioodil on turu peamised edasiviijad taskukohasuse suurenemine ja sellest tulenevalt elektri tootmiseks kasutatud maagaasi osakaal, vananenud söeküttega gaasiosakondade asendamine gaasiga, keskkonnaalaste õigusaktide karmistamine mitmes riigis. Piirangute hulgas viitavad eksperdid gaasielektrijaamade (näiteks päikeseenergia ja tuuleenergia kõrgema prioriteedi tõttu) kasumlikkuse vähenemisele, projektide rahastamise probleemidele ja vajaliku infrastruktuuri puudumisele teatavates piirkondades (Aasia ja Aafrika). Gaasiturbiinide maailma müügi struktuuris 2025. aastal juhivad Põhja-Ameerika riigid kokku 22,2%, Hiina (18,7%) ja Lähis-Ida riigid (17,4%). [18]



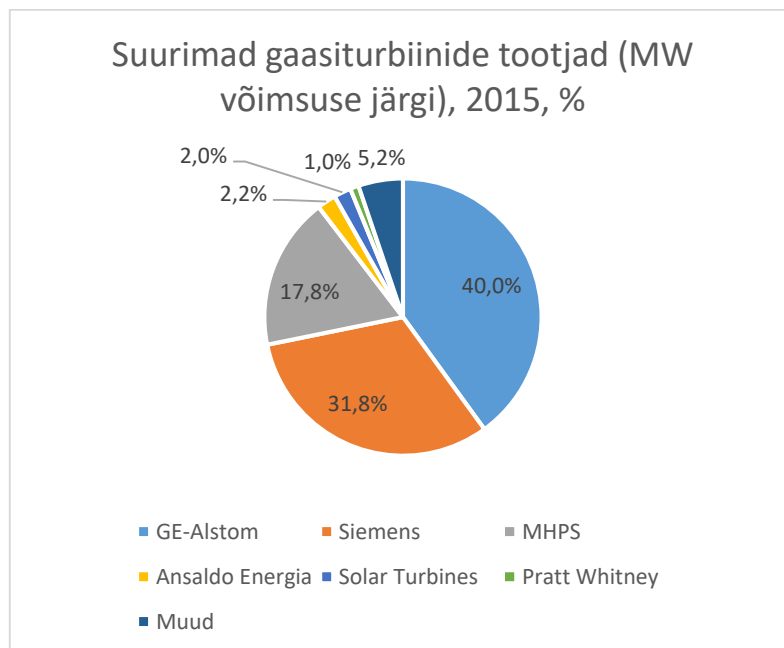
Graafik 4.3 Ülemaailmne gaasiturbiinide müügistruktuur piirkondade kaupa (2015) [18]

### Ülemaailmne gaasiturbiinide müügistruktuur piirkondade kaupa (2025)



Graafik 4.4 Ülemaailmne gaasiturbiinide müügistruktuur piirkondade kaupa (2025) [18]

### Suurimad gaasiturbiinide tootjad (MW võimsuse järgi), 2015, %



Graafik 4.5 Suurimad gaasiturbiinide tootjad (MW võimsuse järgi), 2015, % [18]

95% ülemaailmsest gaasiturbiiniturust on hõivatud kuue suurima turbiinitorjaga. Need on ettevõtted GE (sh Alstom), Siemens (sh Dresser Rand ja Rolls Royce Turbine), MHPS, Ansaldo Energia, Solar Turbines (CAT) ja Pratt & Whitney. Hiljutine ühinemine Alstomiga andis GE-le 40% maailma gaasiturbiiniturust. Siemens on teisel kohal, mille osakaal on ligi 32%. [8]

Tabel 4.6. Mõnede kaasaegse gaasiturbiinseadmete karakteristikud [8]

№	Фирма, страна	Марка турбины	$\eta_{ГТУ}$ , %	$N_{эл}$ , Вт	$\pi_k$	$T_{H.T.}$ , °C	$T_{K.T.}$ , °C	$G_r$ , кг/с	$g_{топ}$ , кг/с
1	Siemens (Saksamaa)	V64.3	35,3	62,5	16,1	1160	531	192	3,537
2	Siemens (Saksamaa)	V64.3A	36,8	67	15,8	1315	589	191	3,8
3	Siemens (Saksamaa)	V84.2	34	109	11	1060	544	360	6,405
4	Siemens (Saksamaa)	V94.2	34,4	157	11,3	1060	537	509	9,207
5	Siemens (Saksamaa)	V94.3A	38,5	265	17	1315	584	656	12,62
6	ABB (Rootsi)	GT26	38,2	262	30	1235	630	562	13,7
7	ABB (Rootsi)	GT24	37,5	179	30	1235	630	391	9,536
8	ABB (Rootsi)	GT13E2	35,7	165,1	14,6	1100	524	532	9,17
9	ABB (Rootsi)	GT13D	32,3	97,9	11,9	990	490	394	6,01
10	ABB (Rootsi)	GT8C	34,4	52,8	15,7	1110	517	179	3,045
11	General Electric (USA)	MS5001PA	28,55	36,3	10,5	957	485	124,1	1,84
12	General Electric (USA)	MS6001B	31,97	39,62	11,95	1104	532	140	2,476
13	General Electric (USA)	MS6001F	34,2	70,1	14,9	1288	597	200	4,095
14	General Electric (USA)	MS9001E	33,93	123,4	12,6	1124	542	418	7,272

$\eta_{ГТУ}$  – elektriline kasutegur,  $N_{эл}$  – elektriline võimsus,  $\pi_k$  – rõhu tõuse aste kompressoris,  $T_{H.T.}$  ja  $T_{K.T.}$  – on algus ja lõplik gaasi temperatuur turbiinis,  $G_r$  – gaasikulu turbiinist väljaminekul,  $g_{топ}$  – gaasiturbiinseadme kütusekulu nominaalrežiimis

## 5 Gaasiturbiini eelised ja puudused

### 5.1 Gaasiturbiini võrdlus auruturbiiniga

Võrreldes auruturbiiniseadmeid ja gaasiturbiiniseadmeid, tuleb ära märkida viimaste tehnilisi ja eksploatatsioonilisi väärtuseid.

1. Oluliselt madalam hind, metallimahukus ja gabariidid. Gaasiturbiiniseadmetele ei ole vaja sellist suuremõõtmelist seadmestikku nagu aurukatel, kondensaator, gradiir. Kohustuslik pole ka tööstuskerede ehitus, kuna mõõduka kliimaga regioonides võivad gaasiturbiiniseadmed asuda ruumist väljas, omades vaid kergeid piirdeid.
2. Autonoomse töö võimalus veeallikateta, tehnovõrkude ja kommunikatsioonideta regioonides.
3. Kiire käivitamine ja kerge hooldus. Kaasaegsete automatiseerimistasmete korral võivad gaasiturbiiniseadmed töötada alalise hoolduseta, kaugjuhtimise teel.
4. Kütuse põlemistoodete väiksem kahjulik mõju keskkonnale.

Gaasiturbiiniseadmete põhiväärtus aga seisneb selles, et need võimaldavad luua kombineeritud aurugaasi seadmeid, milledes ühtse soojusskeemi raames töötades tagavad gaasiturbiiniseadmed ja auruturbiiniseadmed piirivõimsuste korral suurema kasuteguri, mis on meie ajal saavutatud elektrienergia väljatöötusel. [8]

### 5.2 Gaasiturbiini võrdlus kolbmootoriga

Gaasiturbiini mootorite eelised:

1. Võimsuse väga kõrge seos kaalu suhtes, võrreldes kolvimootoriga.
2. Võimalus saada töö ajal suurem kogus auru (erinevalt kolvimootorist).
3. Kogumis aurukatla ja auruturbiiniga kõrgem kasutegur võrreldes kolvimootoriga. Siit ka nende kasutamine elektrijaamades.
4. Liikumine vaid ühes suunas, väiksema vibratsiooniga, erinevalt kolvimootoritest.
5. Madal hind ja määrideõli kasutamine.
6. Madalad nõuded kütuse kvaliteedile. Gaasiturbiiniseadmed tarbivad mistahes kütust, mida võib pihustada: gaas, naftatooted, orgaanilised ained ja tolmutaoline süsi.
7. Reguleerimise kõrge manööversus ja ulatus.

Gaasiturbiinimootorite puudused

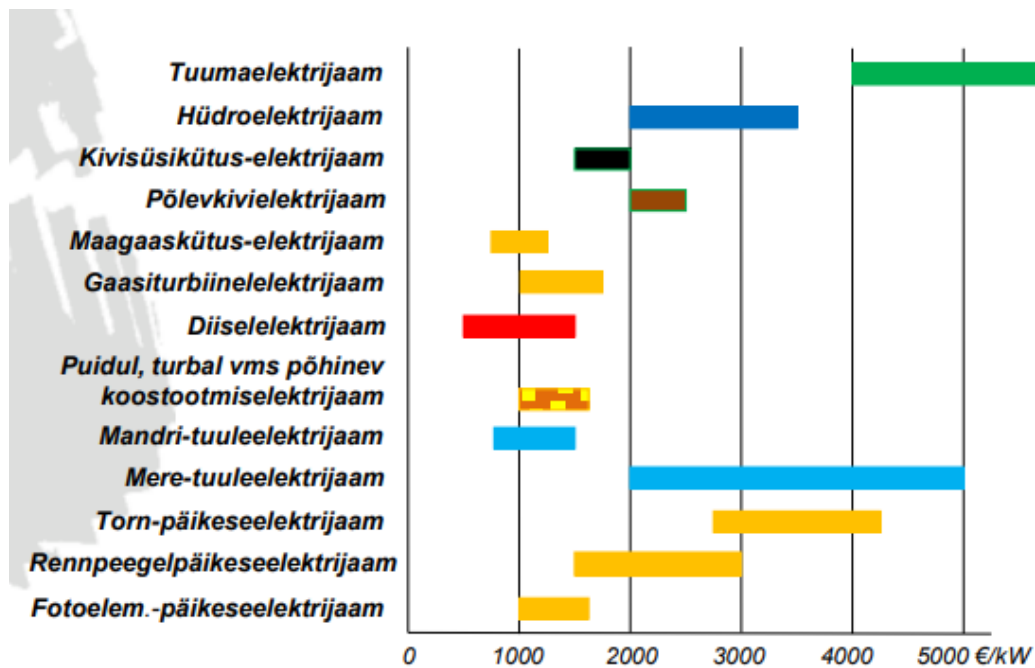
1. Hind on kõrgem, kui analoogiliste mõõtudega kolvimootoritel, kuna turbiinis kasutatavatel materjalidel peab olema kõrge kuumakindlus ja vastupidavus, samuti kõrge erikindlus. Samuti on masinaoperatsioonid keerulisemad;
2. Mistahes töörežiimi korral on nendel väiksem kasutegur, kui kolvimootoritel (kasutegur nominaalsel koormusel kuni 39 %, seejuures on ametlikud andmed kolvimootorite kohta - 41-42%). Nõuavad kasuteguri tõstmiseks täiendavat auruturbiini.

3. Madal mehhaaniline ja elektriline kasutegur (gaasi tarbimine enam kui 1.5 korda suurem elektrienergia 1 kWh kohta võrreldes kolvimootoriga).
4. Kasuteguri järsk alanemine väheste koormuste korral (erinevalt kolvimootoritest).
5. Kõrge rõhuga gaasi kasutamise vajadus, tingides täiendava survega kompressorite kasutamise vajaduse täiendava energiakuluga ja süsteemi üldise efektiivsuse languse.
6. Kõrged kasutuskoormused. Mille tagajärjeks on kallihinnaliste kuumakindlate sulamite kasutamine.
7. Aeglasem käivitus kui sisepõlemis kolvimootoritel.
8. Käivituste-seiskamiste oluline mõju ressursile. [1]

### 5.3 Gaasiturbiin elektrijaama võrdlus teiste elektrijaamadega

Elektrijaamade omavahelisel võrdlemisel kõrvutatakse tavaliselt nende järgmisi näitajaid:

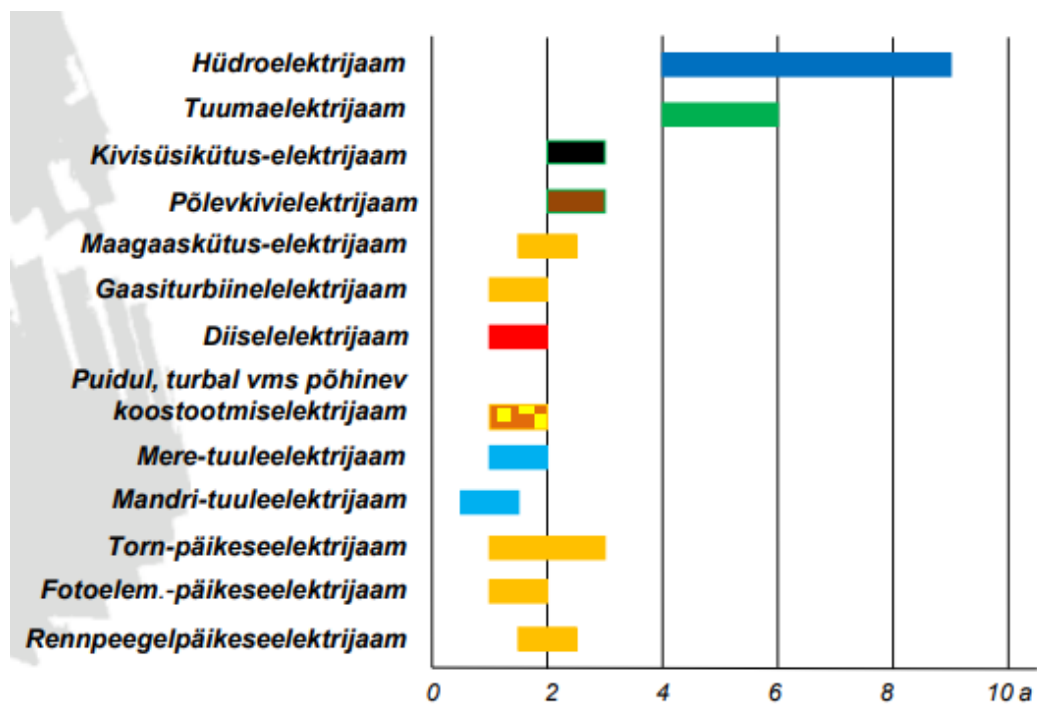
- erimaksumus (ehitusmaksumus võimsusühiku kohta)
- ehitamise kestus
- kasutatava primaarenergia muundamise kasutegur
- nimivõimsuse aastane kasutustegur
- jaama omatarve
- personali vajadus (kuni 1 töötaja 1 MW kohta)
- genereeritava elektrienergia omahind [19]



Graafik 5.3.1 Mõnede elektrijaamaliikide ligikaudne erimaksumus aastal 2012 [19]

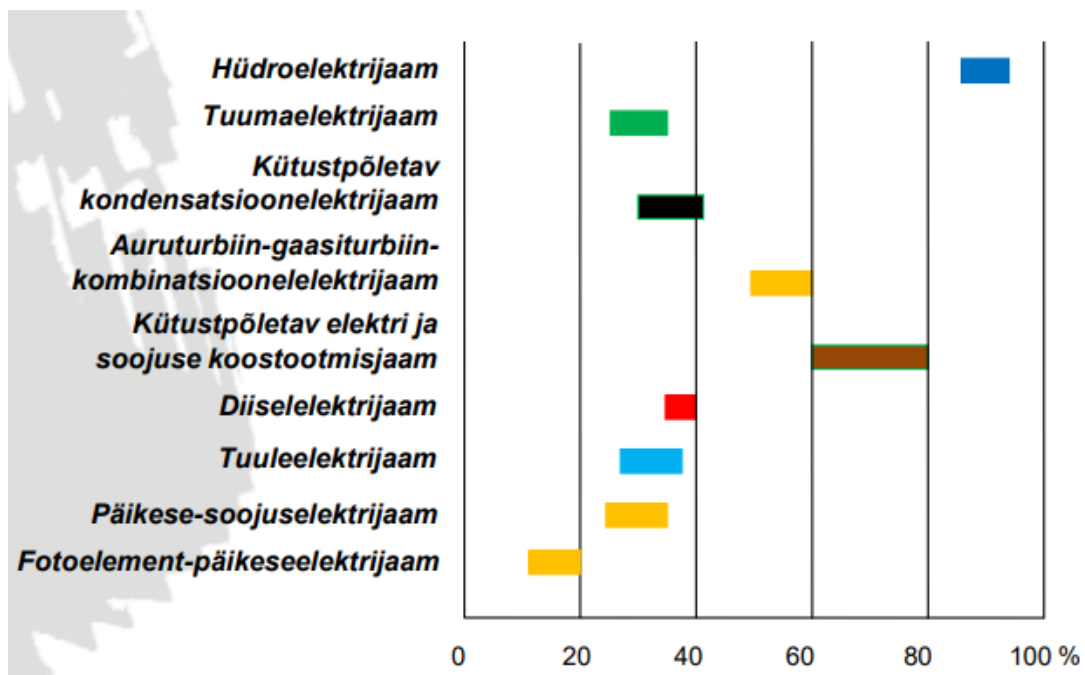
Graafikul 5.3.1 on kujutatud mõnede elektrijaamaliikide erimaksumuse ligikaudsed väärtused aastal 2012 Euroopa kliima- ja majandusoludest. Kivisütt, põlevkivi ja maagaasi põletavate elektrijaamade all on mõeldud auruturbiinidel põhinevaid kondensatsioon-elektrijaamu. Elektri ja soojuse koostootmisjaama erimaksumus on taandatud elektrilise ja soojusliku nimivõimsuse summale.

Elektrijaamade ehituskestust hinnatakse enamasti aja järgi, mis kulub ehitustööde algusest kuni esimese agregaadid või energiaploki kasutuselevõtuni. Ehituskestus oleneb jaama liigist ja võimsusest. Kõige kauem kestab ehitustööde suure mahu tõttu tuumaelektrijaamade ja suurte hüdroelektrijaamade rajamine, väikesi kütuspõletavaid komplektelektrijaamu saab paigaldada mõne päevaga. Joonisel 2 on näidatud mõnede elektrijaamaliikide ligikaudne ehituskestus. Tuuma- ja hüdroelektrijaamade ning kütuspõletavate elektrijaamade korral võimsusega vähemalt 500 MW, tuule- ja päikeseelektrijaamade korral võimsusega vähemalt 10 MW. [19]



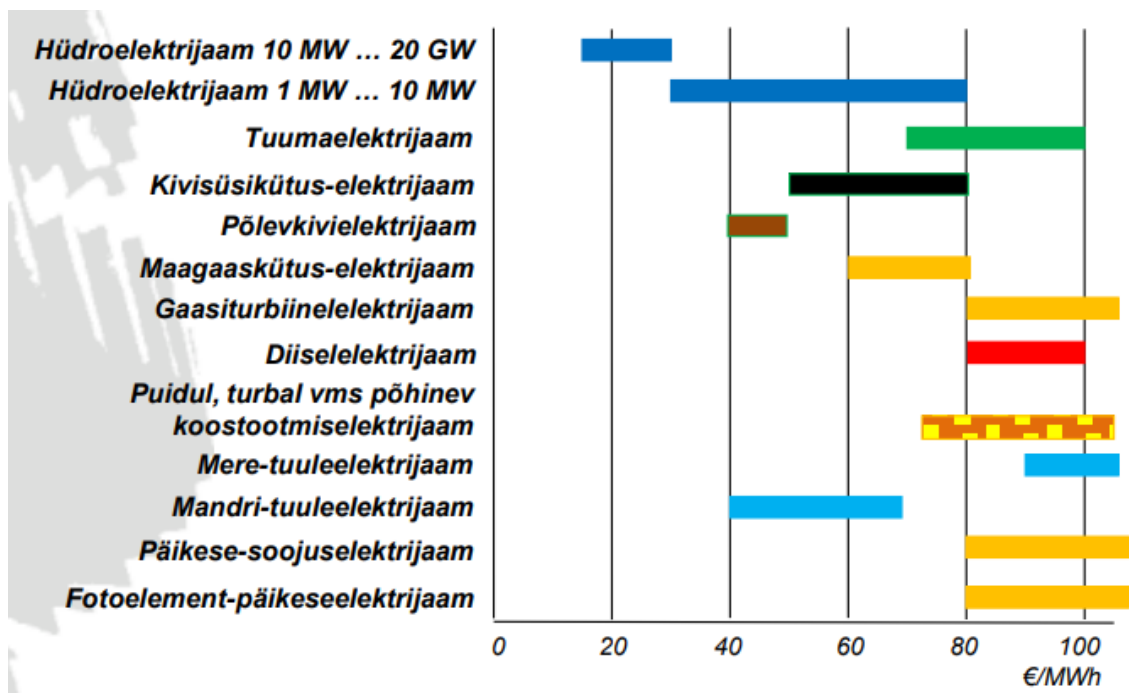
Graafik 5.3.2 Mõnede elektrijaamaliikide ligikaudne ehituskestus [19]

Primaarenergia muundamise kasutegur oleneb energiamuundamisviisist ning muundamisastmete arvust ja seega elektrijaama liigist. Nagu saab näha, auru ja gaasiturbiin kombitsükli elektrijaama kasutegur saab tõsta kuni 60%. [19]



Graafik 5.3.3. Primaarenergia muundamise kasutegur mõnedes elektrijaamaliikides [19]

Elektrienergia omahind sõltub kõigest eelnimetatud teguritest: erimaksumuselt, ehitamise kestusest, kasuteguritest, jaama omatarbest, teenindatava personali vajadusest. Joonis 5.3.4 näitab põlevkivielektrijaama elektrienergia omahind on ümbes kaks korda vähem kui gaasiturbiielektrijaamas toodetud elektrienergia.



Graafik 5.3.4. Eri elektrijaamaliikide elektrienergia omahind aastal 2012 [19]

## 6 Võimalik GT kasutamine Eestis

Kuna Eestis ei ole kasutusel gaasiturbiini, tahaks teoorias eeldada kuidas üldse võimalik kasutada gaasiturbiini meie riigi energiasüsteemis.

Esimene variant on gaasiturbiinide kasutamine tuuleenergeetikas tipukoormuste reguleerimiseks. Süsteemi disbalanss põhjustatud tuule energia prognoosi vigadega peab olema kompenseeritud genereerimisega planeeritud peamiselt tavapäraste võimsustega energiasüsteemis.

Tuulekiiruse võnkumised võivad tekkida üsna kiiresti ja tulenevad probleemid suurenevad paigaldatud tuuleturbiinide mahuga. Võnkumised võivad tuua kaasa tuuleenergia tootmise järsu negatiivse gradienti, mida peavad kompenseerima teised elektrijaamad. Tuleb tagada piisavaid reservvõimsusi. Iga elektrisüsteemi kõige raskem olukord on äkiline tuuleenergia tootmise lang. Eriti pingeline olukord on Eestis, sest Eesti riigi territoorium on üsna väike ja kaugused erinevate tuuleparkide vahel on lühikesed ja on võimalus, et 80% paigaldatud tuule võimsusest võib väga lühikese aja jooksul kiiresti muutuda.

Kuna elektritootmissüsteemis rakendatakse rohkem tuuleenergiat, muutuvad sagedamini perioodid, mille jooksul soojuselektrijaamad energiasüsteemis muutuvad ebaökonomiseks. Kas majanduslikult soodne on sulgeda mõned soojuselektrijaamad sellistes olukordades või hoida neid töökorras, sõltub antud perioodide pikkusest, varuenergiat haldavast tariifisüsteemist ja võimalustest elektrienergiat ekspordida teistesse süsteemidesse.

Praegu on Eestis tuuleparkide tasakaalustamine võimalik ainult naaberriikidega elektrienergia vahetamisega, sest Eestis ei ole kiirelt käivituvaid energiaploki (gaasiturbiini, hüdro elektrijamu jne). Olemasolevad suured soojuselektrijaamad on aeglased ja neid ei ole ette nähtud reguleeriva võimsuse tagamiseks. Seetõttu on vaja suure võimsuse kompensatsioon.

Kuna gaasiturbiine saab käivitada tunduvalt kiiremini kui auruturbiine (enamasti mõne minutiga) sobivad nad kasutamiseks varutoiteallikatena ja talitlemiseks energiasüsteemi tippvõimsuse ajal. Aga maagaasi kõrge hind ja madal efektiivsus väikesel koormusel teevad selle ebapraktiliseks kasutada gaasiturbiinelektrijaamu koormuskõvera pidevaks kontrollimiseks. [21]

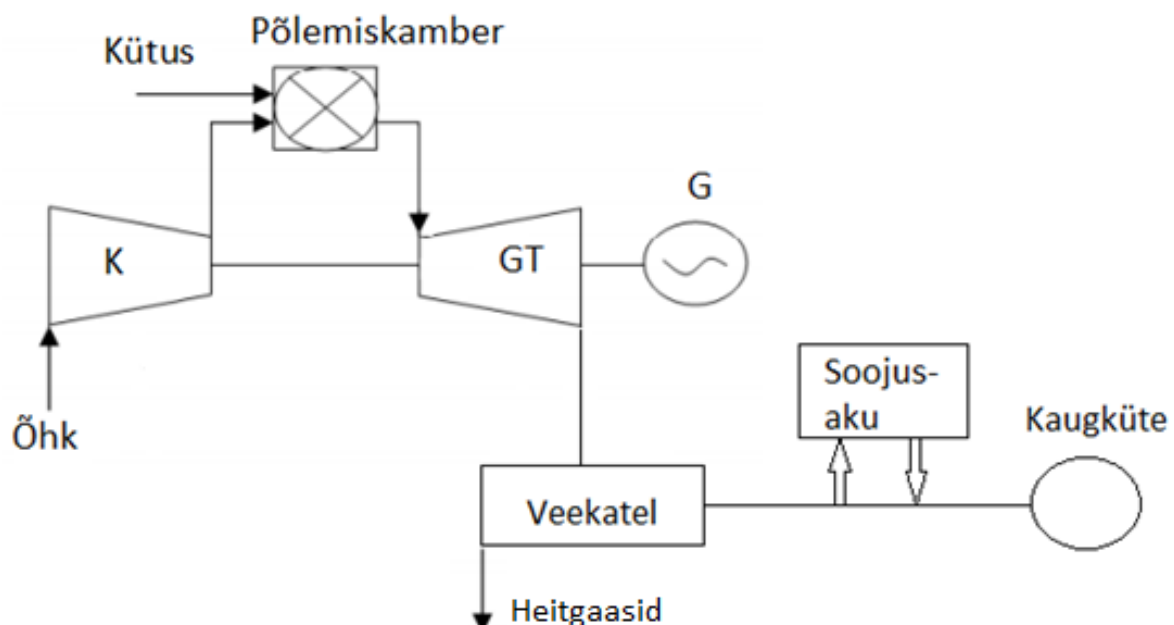
Teised mitu variant on seotud Iru elektrijaamaga ja kuidas saab seal gaasiturbiine kasutada. Iru elektrijaama esimene plokk ei ole praegu kasutusel ning seetõttu saab auruturbiini seadmest valmistada kombineeritud auru-gaasiturbiiniseade, kus gaasiturbiinis kasutatavat põlemissaaduste kõrget temperatuuri kasutatakse auru genereerimiseks jäätmeküttekatas, mis omakorda kasutab kütust ja selle edasist kasutamist auruturbiinis. Selleks aga tuleb ka uus kondensatsiooniturbiin



paigaldada. Kombineeritud tsükli eelis on suur kasutegur, mis on 50-60%, mõõdukad kapitaalkulud rekonstrueerimiseks, mis on mitu korda madalamad kui uue auru-gaasiturbiini seadme ehitamine, kuna kasutatakse peamiselt olemasolevaid soojuselektrijaama kapitaalvahendeid ja infrastruktuuri. Auruturbiiniseadme rekonstrueerimine auru-gaasi tsükliga võimaldab ka pikendada seadme kasutusiga ja tõsta paigaldatud alajaama võimsust. Samas paranevad ka kehtivate auruturbiiniseadmete ökoloogilised karakteristikud. [22]

Näiteks sarnasest rekonstrueerimisest saab tuua Leedu SEJ Elektrenai, kus uus plokk vahetas välja Leedu Elektriijaama 60ndatel aastatel ehitatud kolmanda ja neljanda plokki. Uus kombi plokk koosneb kahest gaasiturbiinidest ja ühest auruturbiinist. Uus auru-gaasiturbiini seade suurendas Leedu Elektriijaama elektritootmise võimsust, töökindlust ja tõhusust ning vähendas elektritootmise kulusid. [20]

Järgmine võimalus kuidas saaks gaasiturbiini kasutada Iru elektrijaamas on gaasiturbiini seadme paigaldus koos olemasoleva KVGM-100 veekatlaga. Gaasiturbiiniseadme töö jääks samaks nagu on näidatud joonisel 3.2.2, kuid skeemil on lisatud veekatel ja soojusaku elektrienergia kogunemiseks. Gaasiturbiin käivitatakse tippvõimsuse tootmiseks kui elektrihind on kõrge ja gaasiturbiinist väljuvad heitgaasid lähevad veekatlasse, kus soojendavad kaugkütte võrguvett, mis juhu, kui võrk seda hetkel ei vaja, salvestatakse soojusakusse. Soojusakust võetakse vastavalt vajadusele. Joonisel 6.1 on näidatud antud seadme skeem.



Joonis 6.1. Võimalik gaasiturbiini seadme skeem töötav koos veekatlaga elektrienergia ja kaugkütte tootmiseks

Viimaseks variandiks on viia töösse gaasiturbiin, kus see töötaks avatud tsükliga.

Vastavalt joonisele 5.3.4 gaasiturbiiniga toodetud elekter pääseb avatud elektriturule kui hind on üle 80 EUR/MWh. On näha, et elektrienergia omahind põlevkivielektriijaamast on 40-50 EUR/MWh.

Hetkel, vastavalt praegusele hinnale, looduslikust gaasist ei tasu Eestis elektrit toota ei gaasiturbiinides ega ka elektri- ja soojuse koostootmisjaamades. Konkurentsivõimeliseks see muutuks olles tipuvõimsuse tootmisel kui elektri hind on väga kallis, sest gaasiturbiin on kiiresti käivitatav.

## Kokkuvõtte

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks oli uurida niisugune mootor nagu gaasiturbiin, selle töö põhimõtte ja erinevad tsüklid mille järgi gaasiturbiini seadmed töötavad. Uurisin miks tänapäeval maailmas on nii suur gaasiturbiinide kasutus ja eriti auru-gaasiseadmed. Kirjutasin gaasiturbiinide konstruktsiooni materjalidest ja nende jahutusviisidest. Vaatasin ka kui palju maailmas müüakse gaasiturbiine ja milline on prognoos ning maailma suuremaid tootjaid. Võrdlesin gaasiturbiinid auruturbiinidega ja kolbmootoriga, nende eelised ja puudused. Uurisin ka erinevaid elektrijaamade tüüpide ligikaudne erimaksumus, ehituskeskus, kasutegur ja elektrienergia omahind.

Viimases peatükis uurisin kuidas saab gaasiturbiinid kasutada meie riigis. Esimeseks variandiks pakkusin gaasiturbiini kasutada tuuleenergeetikas tipuvõimsuse koormuse reguleerimiseks. Gaasiturbiin selleks hästi sobib sest see alustab maksimaal koormuses töötada mitu minutite päraast. Teine variant on Iru elektrijaamas auruturbiini seadmest valmistada kombineeritud auru-gaasiturbiiniseade. Maailmas on palju näidet kui vananenud auruturbiini seaded rekonstrueeriti auru-gaasiseadme kombitsükliks ja mina näitasin kuidas sellest saab saavutada. Järgmine variant on uue gaasiturbiini seade paigaldada Iru elektrijaamas koos olemasoleva veekatlaga elektrienergia ja kaugküte tootmiseks. Antud juhul gaasiturbiin käivitatakse tipuvõimsuse tootmiseks kui elektri hind on kõrge. Ja neljas variant Iru elektrijaamas kasutada avatud tsükliga töötav gaasiturbiini, aga uurisin et sellest võimalik kasutada ka ainult tipuvõimsuse tootmisel kui elektri hind on kõrge.

## Kasutatud kirjandus

- [1] “Газовая турбина” [Online]. Available: <https://enciklopediya-tehniki.ru/promyshlennost-na-g/gazovaya-turbina.html> (10.02.2019)
- [2] “Газовая турбина” [Online]. Available: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Газовая\\_турбина](https://ru.wikipedia.org/wiki/Газовая_турбина) (10.02.2019)
- [3] “Газотурбинная установка” [Online]. Available: <http://www.gigavat.com/gtu.php> (11.02.2019)
- [4] “История развития энергетического газотурбостроения” [Online]. Available: <http://energetika.in.ua/ru/books/book-3/part-1/section-3/3-6> (24.02.2019)
- [5] “Газовые турбины” [Online]. Available: <http://www.ene.ttu.ee/elektriamid/oppeinfo/materjal/AAV3300/Energotehnika3-2.pdf> (16.04.2019)
- [6] “Газовые турбины — надёжные силовые агрегаты современных электростанций” [Online]. Available: [https://manbw.ru/analitycs/gas\\_turbines\\_-\\_reliable\\_power\\_units\\_contemporary\\_power\\_stations.html](https://manbw.ru/analitycs/gas_turbines_-_reliable_power_units_contemporary_power_stations.html) (16.04.2019)
- [7] “Принцип действия газотурбинных установок” [Online]. Available: [http://www.gigavat.com/gtu\\_princip\\_dejstviya.php](http://www.gigavat.com/gtu_princip_dejstviya.php) (24.02.2019)
- [8] “ПАРОГАЗОВЫЕ И ГАЗОТУРБИННЫЕ УСТАНОВКИ” [Online]. Available: <http://elib.spbstu.ru/dl/2966.pdf/download/2966.pdf> (24.02.2019)
- [9] “Парогазовые установки\* — ПГУ” [Online]. Available: <https://manbw.ru/analitycs/pgu.html> (24.02.2019)
- [10] “Парогазовые установки” [Online]. Available: <http://www.cogeneration.ru/base-benefits/technology.html?&Page=7> (24.02.2019)
- [11] “ELEKTRIAAMAD JA ENERGIASÜSTEEMID” [Online]. Available: <http://www.ene.ttu.ee/elektriamid/oppeinfo/materjal/AAV3300/Energiatehnika5-1.pdf> (10.03.2019)
- [12] “Электростанции на базе парогазовых установок” [Online]. Available: [http://elemo.ru/article/jelektrostancii\\_na\\_baze\\_parogazovyh\\_ustanovok.html](http://elemo.ru/article/jelektrostancii_na_baze_parogazovyh_ustanovok.html) (10.03.2019)
- [13] “Схемы и циклы простейших ГТУ” [Online]. Available: <https://docplayer.ru/39769486-Modul-2-shemy-i-cikly-prosteyshih-gtu.html> (11.03.2019)

- [14] “Основные элементы энергетических газотурбинных установок и их назначение” [Online]. Available: <https://viam.ru/review/3800> (11.03.2019)
- [15] “ЖАРОПРОЧНЫЕ СПЛАВЫ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ГАЗОВЫХ ТУРБИН. 07 ДЕКАБРЯ 2016” [Online]. Available: <https://viam.ru/review/3800> (11.03.2019)
- [16] “Охлаждение газотурбинных установок” [Online]. Available: [http://www.gigavat.com/gtu\\_cooling.php](http://www.gigavat.com/gtu_cooling.php) (23.03.2019)
- [17] “Охлаждение газотурбинных установок” [Online]. Available: <http://alternathistory.com/gazovaya-turbina/> (23.03.2019)
- [18] “К 2025 году объем мирового рынка газовых турбин увеличится до \$23,7 млрд” [Online]. Available: <https://www.elec.ru/analytics/k-2025-godu-obem-mirovogo-rynka-gazovyh-turbin-uve/> (23.03.2019)
- [19] “Sissejuhatus energiatehnikasse” [Online]. Available: [http://www.ene.ttu.ee/elektriamid/oppeinfo/materjal/AAV0120/Sissejuhatus\\_energiatehnika\\_loeng\\_7b.pdf](http://www.ene.ttu.ee/elektriamid/oppeinfo/materjal/AAV0120/Sissejuhatus_energiatehnika_loeng_7b.pdf) (23.03.2019)
- [20] “Производство электроэнергии” [Online]. Available: <https://gamyba.le.lt/ru/dejatelnost/proizvodstvo-elektroenergii/4526/?c-39/t-81> (30.03.2019)
- [21] “Large-Scale Integration of Wind Energy into the Power System Considering the Uncertainty Information” [Online]. Available: <http://www.tuuleenergia.ee/wp-content/uploads/H.Agabus-doktoritoo.pdf> (09.04.2019)
- [22] “Large-Scale Integration of Wind Energy into the Power System Considering the Uncertainty Information” [Online]. Available: <http://www.tuuleenergia.ee/wp-content/uploads/H.Agabus-doktoritoo.pdf> (09.04.2019)
- [23] В.П. Безлепкин, Парогазовые и паротурбинные установки электростанций. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1997, 185 lk.