

Универзитет у Крагујевцу
Факултет инжењерских наука



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Енергетика и процесна техника

Предмет: Пренос снаге флуидом

Број индекса: 186/2007

Милош В. Стевановић

Примена гасних турбина у когенерацији
завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. др Душан Гордић, ванр. професор - ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог завршног рада кандидат треба да

Препоручена литература:

[1] Војин Грковић, *Топлотне турбомашине*, Факултет техничких наука, Нови Сад, 2004.

[2] Милан Љ Трифуновић, *Гасне турбине и млазни погон*, Виша поморска школа, Титоград 1960.

[3] Милорад Бојић, Емил Хнатко, *Термотехника*, Машински факултет Крагујевац 1987

Крагујевац, 2011

ментор:

др Душан Гордић, ванредни професор

Резиме

Област испитивања гасних турбина захтева прецизно одређивање ефикасности, протока, снаге, протока горива у некад и не баш идеалним условима за рад. Поред тога, резултати испитивања имају веома велики значај за произвођаче гасних турбина и за њихове инжењере.

У првом поглављу овог рада дате су опште напомене о когенерацији, њене предности и мане као и обим коришћења у земљама Европске Уније, као и примена гасних турбина у когенеративним постројењима. Принцип рада гасних турбина је описан у другом поглављу. Описани су њени најбитнији делови, историјски развој, као и Џулов циклус по коме раде гасне турбине.

У трећем поглављу приказан је начин одабира гасних турбина за примену у топланама које као гориво користе природни гас или мазут. Поред тога у оквиру овог поглавља дат је и приказ 5 модела гасних турбина, различитих произвођача које по својој снази одговарају широкој примени у већим јавним и индустријским објектима.

Кључне речи: когенерација, гасне турбине, Џулов циклус.

Abstract

Field testing of gas turbine compressor packages requires the accurate determination of efficiency, flow, power, and fuel flow in sometimes less than ideal environments. Nonetheless, field test results have significant implication for gas turbine manufacturers and their customers.

The general remarks about the cogeneration (CHP), advantages and disadvantages and level of use of CHP in EU countries, as well as applications of gas turbines in CHP plants are presented in the first chapter. The principle of operation of gas turbines is described in the second chapter. The most important parts, historical development, as well as the Joules cycle according to which gas turbines operate are described here.

The selection of gas turbines for use in heating plants that use natural gas or fuel oil as fuel are presented in the third chapter. In addition, under this chapter gives the overview of five models of gas turbines from different manufacturers. The power of these gas turbines corresponds to widely use in large public and industrial buildings.

Key words: cogeneration, gas turbines, Joule cycle.

Садржај

Увод	4
1. Когенерација	5
1.1 Предности и мане когенерације.....	7
<i>Предности когенерације</i>	7
<i>Препреке за когенерацију</i>	9
2. Турбине	11
2.1 Уопштено о турбинама	11
2.2 Гасне турбине	12
<i>Компресор</i>	13
<i>Коморе за сагоревање</i>	14
<i>Турбина</i>	14
<i>Предности и недостаци</i>	15
2.3 Џулов циклус	15
<i>Прорачун Џуловог циклуса</i>	18
<i>Џулов циклус са рекуперацијом</i>	20
<i>Џулов циклус са догревањем</i>	21
<i>Џулов циклус са међухлађењем и догревањем</i>	21
3. Гасне турбине у когенеративним топланама	22
3.1 Полазни подаци (мерења) неопходна за одређивање кегенерационог потенцијала.....	22
3.2 Упоредне карактеристике гасних турбина које се могу наћи на тржишту.....	23
<i>Kawasaki Heavy Industries (M7A-02)</i>	24
<i>Siemens (SGT-200)</i>	25
<i>Rolls Royce (501-KC7)</i>	26
<i>General Electric (GE-10)</i>	27
<i>Man Group (THM 1304-9)</i>	27
3.3 Перформансе гасних турбина.....	28
Закључак	29
Литература	30

Увод

Енергетска криза последњих година узима велики замах и она се огледа у климатским променама и не тако далеком нестанку фосилних горива што резултира поскупљењем енергената на тржишту. Као одговор овом проблему, дошло је до промена у енергетској политици чиме се тежи проналажењу алтернативних извора енергије и побољшању ефикасности постојећих решења. Са тим циљем је ЕУ донела низ закона којима подстиче прелазак на енергију са што мањом емисијом CO_2 , односно поставља обавезујући циљ од 20% удела обновљивих извора енергије (соларна енергија, биомаса, енергија ветра...) до 2020 године.

Турбине су један од најзаступљенијих произвођача енергије. Њихово усавршавање би сигурно допринело превазилажењу кризе. Гасна турбина се издваја по својој конструкцији, односу тежине и снаге (велика излазна снага у односу на релативно мале димензије), због свега овога се гасне турбине све чешће користе као погонске машине код локомотива, бродова, аутомобила, хеликоптера, авиона и за погон електричних генератора.

Једна од решења за побољшање енергетске ефикасности гасних турбина је и њихова примена у когенеративном процесу. Степен искоришћења гасних турбина је око 40% када се користе само за генерисање механичке снаге, али тај проценат може да буде и до 90%, уколико се гасна турбина примењује за истовремено генерисање топлоте и снаге.

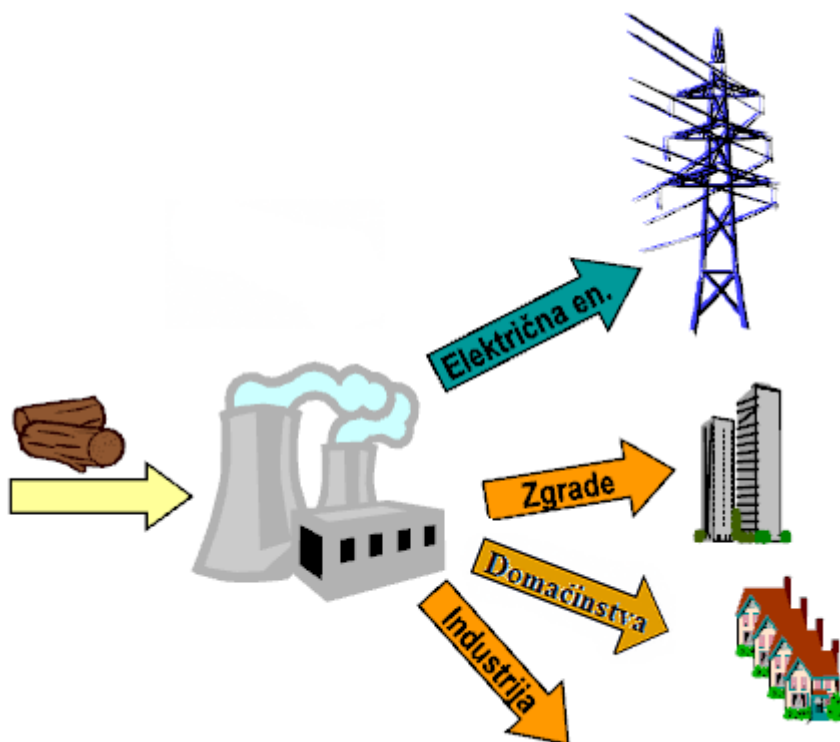
У даљем тексту ће бити објашњена когенерација (СНР), при чему ће акценат бити стављен на гасне турбине која се користе у когенеративним постројењима. Биће представљени и главни делови гасне турбине као и Џулов циклус, по коме ради гасна турбина.

1. Когенерација

Когенерација се може дефинисати као процес коришћења примарне енергије горива за производњу два корисна енергетска облика: топлотне енергије и корисног рада. Добијени корисни рад користи се најчешће за производњу електричне енергије, док се произведена топлотна енергија користи у технолошким процесима, процесима грејања или процесима хлађења.

Когенерација је такође производња електричне енергије из отпадне топлоте било ког термичког процеса. Процес се одвија са максималним искоришћењем хемијске енергије горива, тј. смањењем губитака, али је предуслов за то велики број радних сати током године.

Когенерација се често у литератури означава са **CHP** процес, а то је скраћеница од *Combined Heat and Power*. Што у преводу значи комбиновање топлоте и снаге.



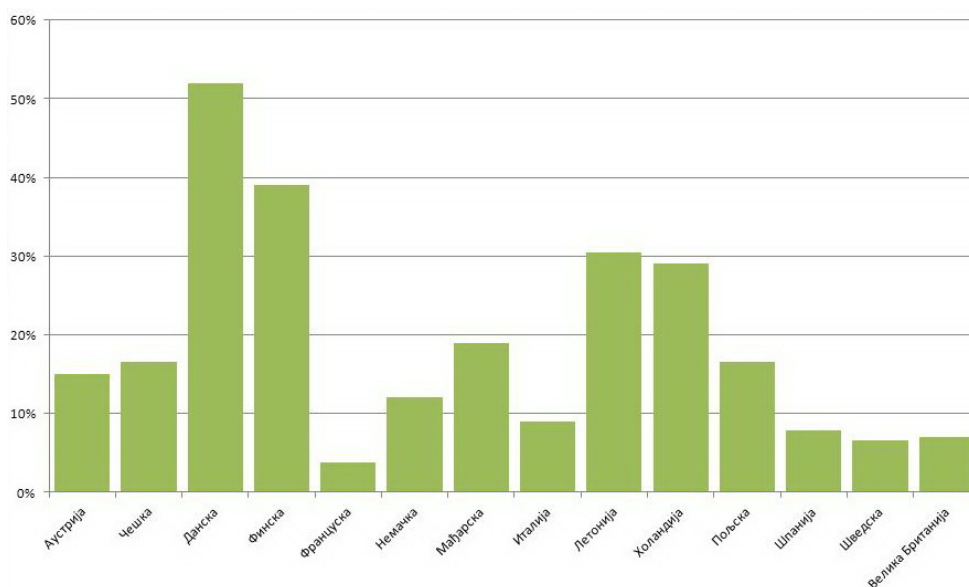
Слика 1. Когенерацијски процес

На слици 1, илустровано је како ради когенерацијски процес. Као гориво је приказано дрво, а као резултат CHP процеса је електрична енергија и топлотна енергија која се примењује у индустрији или за грајање зграда, домаћинства.

Когенерација не мора бити само у неком индустријском постројењу, већ се може извести и у домаћинству или као нека мања производна јединица. Код овог

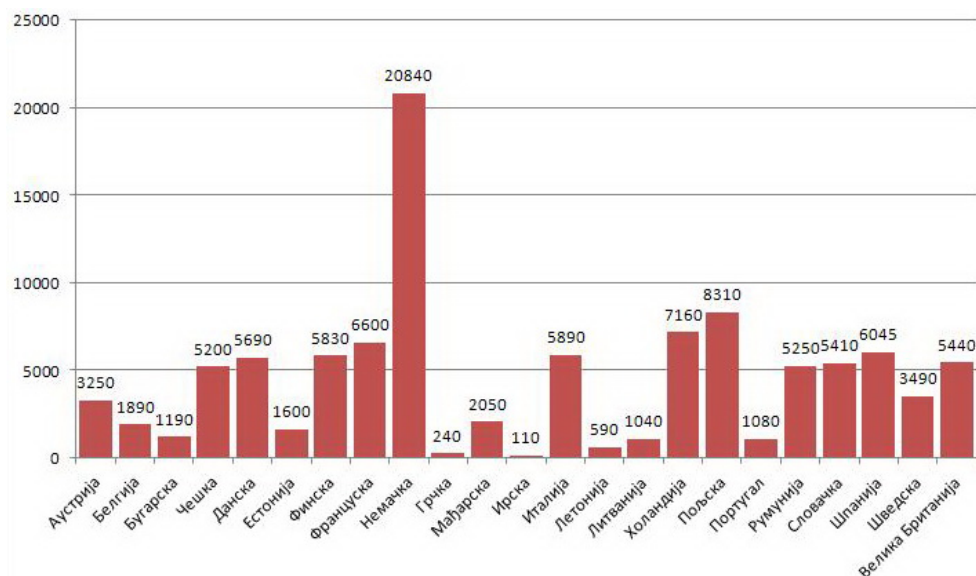
случаја когенерације, гориво се не троши само на грејање, већ се део енергије горива користи и за производњу електричне енергије. Та електрична енергија се користи за потребе домаћинства, али уколико се потребе домаћинства подмирују са мањом енергијом него што је произведена, тај вишак енергије се уз допуштање надлежних може продати или вратити у мрежу. На овај начин би већина домаћинстава биле мале електроцентралне.

Овакав вид когенерације је и био циљ Европске Уније која је донела цео један пакет закона, како би подстакла земље чланица да што више користе овакав начин стварања енергије. Неке земље чланице ЕУ су прихватиле ово и у њима је удео когенеративних постројења у енергетском сектору веома велики (Данска 51%, Холандија 29%, Финска 39%, Летонија 30%), док је у неким државама то мали удео (Француска, Грчка, Ирска).



Слика 2. Удео когенерације у укупној производњи електричне енергије у неким земљама ЕУ

Према подацима из 2008. године од укупне произведене електричне енергије, само око 10% је произведено из когенеративних постројења. Само у неколико земаља (Данска, Финска, Естонија и Аустрија) постоји значајнији удео когенеративних постројења у производњи снаге и то између 30% и 50% од укупне произведене снаге, слика 2. Свака од ових земаља је имала сопствени приступ како је решавала проблеме производње, али свим земљама са успешним СНР тржиштима је заједничка Влада политика која је фокусирана на снабдевање електричном и топлотном енергијом. На слици 3, приказани су инсталирани капацитети за комбиновану производњу електричне и топлотне енергије у неким земљама ЕУ.



Слика 3. Инсталисани капацитети [MW] у земљама ЕУ

Немачка је земља са највише инсталисаних капацитета у ЕУ, али у укупном уделу произведене електричне енергије то чини негде око 12%. Удео когенерације у укупној производњи електричне енергије у појединим земљама ЕУ приказан је на слици 3.

1.1. Предности и мане когенерације

Предности когенерације

Задовољавање све већих енергетских потреба у будућности, уз моралан однос према околини као и располагање природним ресурсима с циљем привредног развоја и цивилизацијског напретка, изискује градњу нових енергетских постројења уз све строже захтеве за употребом енергије, рационализацију инвестицијских улагања и заштиту животне средине.

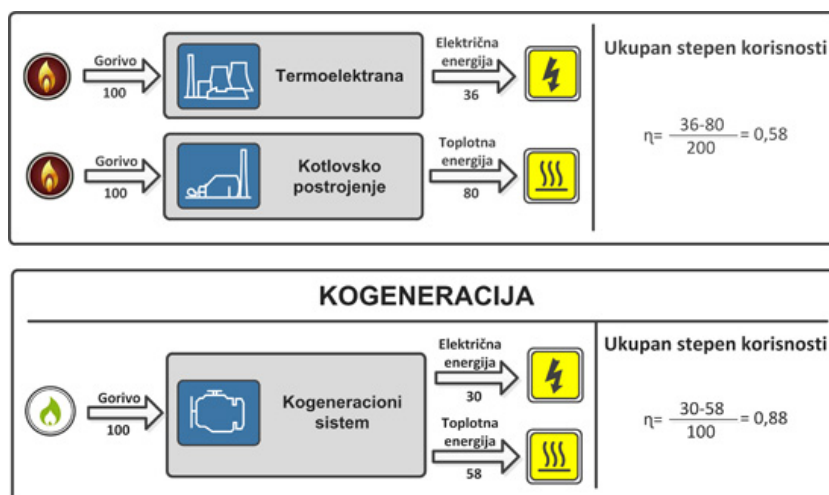
Тако је пред енергетичаре постављен задатак проналажења начина производње енергије уз највишу могућу енергетску ефикасност, користећи најновије расположиве технологије и еколошки прихватљива горива на крајње рационалан начин. Когенеративни процеси су управо таква технологија која удовољава све набрајане услове.

Примена когенерацијских система се првенствено разматра због њихове високе енергетске ефикасности, али и због еколошких и економских предности. Укупни степен ефикасности ових постројења (топлотна ефикасност) у неким случајевима износи и преко 90%, па се може констатовати да, у односу на остале системе, когенерација представља најефикаснији облик претварања енергије, како са енергетске тачке гледишта тако и са тачке заштите животне средине. Когенерацијском производњом смањује се утицај на околину по свим аспектима, а посебно се смањује емисија CO, CO₂ и NO_x. Најзначајније предности когенерацијске

производње у односу на одвојену производњу електричне енергије у класичној електрани и топлоте у котловима показује се кроз [8]:

- знатне уштеде примарне енергије из чега произлазе и мањи трошкови,
- квалитетније снабдевање електричном енергијом и већа поузданост, што је изузетно важно за потрошаче осетљиве на прекиде снабдевања,
- смањење штетног утицаја на средину, јер из високе енергетске ефикасности мање потрошње примарног енергента произлазе мања емисија штетних материја, мања количина отпадне топлоте и мањи ниво буке,
- релативно мала улагања у односу на позитивне карактеристике и исплативост за неколико година,
- кратак рок изградње због пакетне варијанте агрегата и претходно фабричких склопљених елемената,
- једноставнији пут добијања разних дозвола, нарочито за случај индустријских погона или неког јавног објекта.

Предности когенерацијских система, у односу на класичне системе с одвојеним снабдевањем електричном и топлотном енергијом, видљиве су ако се међусобно упореде губици који настају при производњи енергије у оба посматрана система. Такво поређење когенерацијске и одвојене производње енергије са становишта степена корисности дата је на слици 4. Степен корисности термоелектране, која производи само електричну енергију, за 100 горивних јединица је 36%. А степен корисности за котловско постројење, које даје топлотну енергију, за исто тако 100 горивних јединица је 80%. Тако у збиру ова два степена корисности за 200 горивних јединица, колико је потребно сваком од ових постројења, добијамо 58%. Док се код когенерације од 100 горивних јединица на електричну енергију одваја 30%, а на топлотну енергију 58%. То је мање него што термоелектрана и котловско постројење даје посебно, али укупан степен корисности је 88%. То је зато што се код когенерације утрошило само 100 горивних јединица. Притом треба истаћи да је овакав степен корисности когенерацијског постројења само у режиму рада при којем се утроши сва топлотна енергија произведена у систему.



Слика 4. Поређење когенерације и одвојене производње енергије

Основна предност когенерације је повећана ефикасност у односу на електране које служе само за производњу електричне енергије или индустријске системе који служе само за производњу паре или топле воде за техничке процесе.

Когенерација има значајну улогу као дистрибуирани извор енергије због позитивних учинака: мањи губици у мрежи, смањење загушења у преносу, повећање квалитета напона и повећање поузданости снабдевања електричном енергијом. Уз све наведено, смањен је и штетан утицај на околину.

Препреке за когенерацију

Иако постоји велики потенцијал за когенерацијску производњу, кључне препреке за когенерацију су и даље присутне. Међу најважнијим препрекама могу се сматрати [7]:

- изостанак јасно дефинисаног и једноставног поступка прикључења на мрежу, као и грађевинско-техничке процедуре изградње когенерацијског постројења,
- неповољан однос цена електричне енергије и горива који подстиче коришћење електричне енергије,
- непостојање утврђивања и поступка стицања права продаје као и износа откупне цене за вишак електричне енергије,
- недовољна заинтересованост и разумевање финансијских институција за финансирање пројеката и когенерације,
- изостанак специјалног образовања и оспособљавања стручњака за услуге консултовања о енергетској ефикасности, због које је слабо разумевање примене когенерације у погледу задовољавања корисних термичких потреба,
- информисање и едукација потенцијалних корисника,
- спора динамика доношења и имплементација закона, а посебно непостојање специфичног законског акта за когенерацију у којем би се целокупна проблематика могла системки дефинисати,

Код когенерацијских постројења користе се директни и индиректни поступци претварања хемијске енергије горива у електричну и топлотну енергију.

За директно претварање користе се:

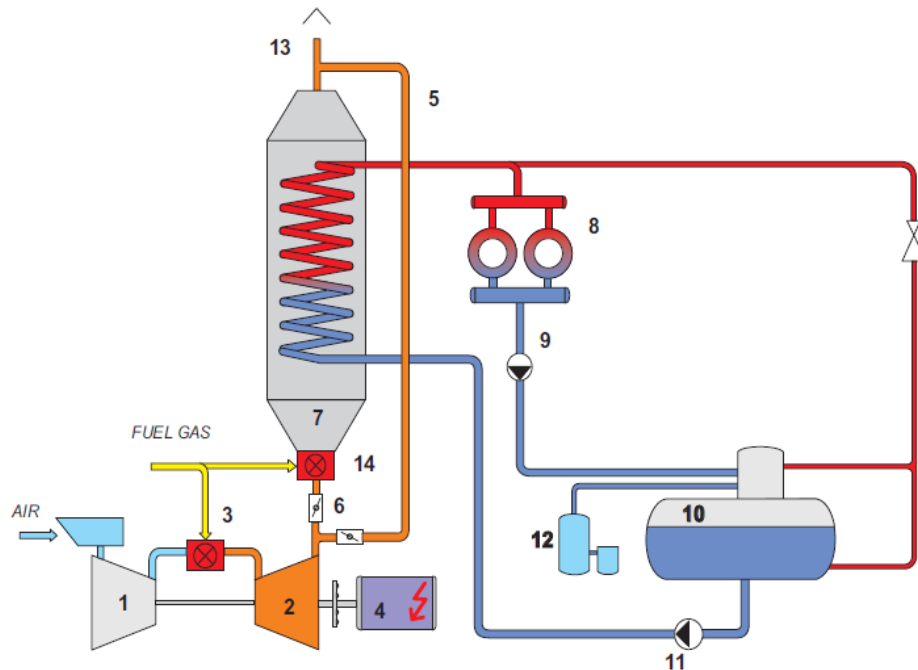
- разне врсте горивних ћелија.

За индиректно претварање користе се:

- мотори с унутрашњим сагоревањем,
- гасне турбине,
- парне турбине.

Постројења са гасним турбинама као главном погонском машином у когенеративном циклусу, постижу највећи степен ефикасности и искоришћења и то

до 90% од укупне енергије. Дакле овај систем максимизира степен енергетске ефикасности кроз истовремену производњу снаге и топлотне енергије. Типична шема једног когенеративног постројења на бази гасне турбине са искоришћењем отпадне топлотне енергије приказана је на слици 5.



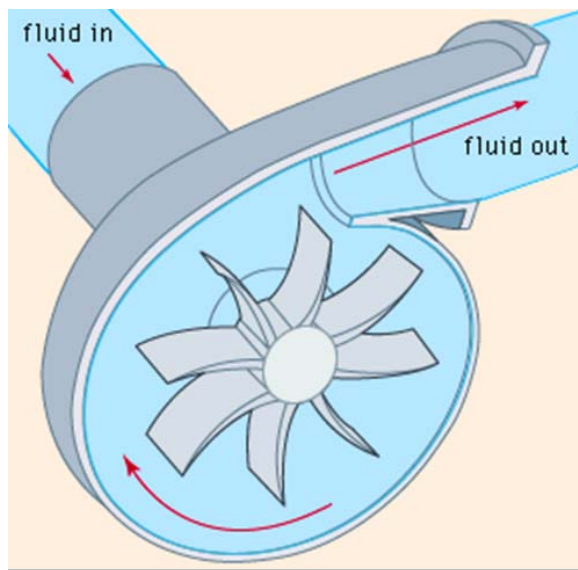
Слика 5. Шема гасне турбине са когенерацијом

Ваздух (air) долази у компресор (1) и ту му се повећава радни притисак, затим одлази у комору за сагоревање (3) у којој се врши сагоревање горива (fuel gas). Турбина (2) користи продукте сагоревања тако што кинетичку енергију претвара у механичку енергију вратила, које погони електрични генератор (4). Помоћу регулационих вентила (6) одређујемо однос произведе снаге и топлоте. Bypass издувни канал (5) заједно са димњаком (13) одводи издувне гасове. Котао за издувне гасове (7) служи да би загрејао воду која долази из напојног резервоара (10). Вода се припрема (12), а до котла, где се греје долази помоћу напојне пумпе (11). Када вода изађе из котла, предаје топлоту потрошачима (8). Да би се вода вратила у резервоар потребна је још једна пумпа (9). Уколико је потребно да температура у котлу буде већа, постоји горионик за додатно ложење (14).

2. Турбине

2.1. Уопштено о турбинама

Турбина (лат. *turbo* - вртлог, вихор) је ротациона машина која претвара кинетичку енергију радног флуида у механички рад. Ово претварање врши се у лопатицама ротора. Радни флуид (гас или течност) под дејством кинетичке енергије удара у лопатице ротора и окреће их (слика 6).



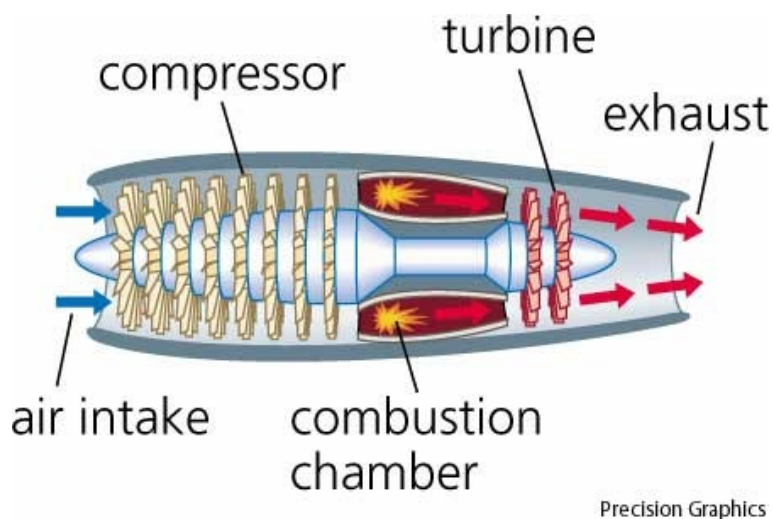
Слика 6. Принцип рада турбине

Ротор је везан за вратило, па ротор окреће и вратило, које погони неку другу машину (најчешће електрични генератор). Основне предности турбина су континуалан и сигуран рад, веома дуг експлоатациони век и масовна примена у свим областима привреде. Оне се користе за производњу електричне енергије, у свим електранама (хидро, електро, нуклеарним). Турбине су део свакодневнице, има их у аутомобилима, авионима, термо-енергетским постојењима...

Турбине могу да се поделе на хидрауличне и топлотне. Код хидрауличних радни флуид је течност, која се у техничкој примени сматра нестишљивим флуидом. То значи да се радна температура и густина течности, од улаза до излаза хидрауличне машине, мало мењају. Код топлотних турбина, кроз усмерне органе протиче стишљиви флуид, пара или гас. За разлику од нестишљивих флида, стишљиви мењају своју густину и радну температуру док пролазе кроз турбину. Топлотне турбине, у зависности од врсте гасовитог радног флуида чија се струјна енергија претвара у механичку, деле се на парне и гасне.

2.2. Гасне турбине

Гасне турбине (слика 7.) претварају у механички рад струјну енергију гасовитих продуката сагоревања течног или гасовитог горива у компримованом ваздуху. Извори струјне енергије за гасну турбину су тзв. коморе за сагоревање (*combustion chambers*), у које се помоћу високопритисних турбокомпресора (*compressor*) убацује компримован ваздух и убризгава гориво. У коморама за сагоревање распршено гориво сагорева у компримованом ваздуху, услед чега притисак и температура продуката сагоревања нагло расту. Гасовити продукти сагоревања се, затим, уводе у турбину (*turbine*) у којој се струјни рад гасовитих продуката сагоревања претвара у механички рад. Део произведеног механичког рада користи се за погон високопритисног турбокомпресора који је спрегнут са гасном турбином и снабдева је компримованим ваздухом, а део рада се користи за погон електрогенератора, или пропелера.



Слика 7. Шема гасне турбине

Разлози рационалног односа према енергији условававају да се гасовити продукти сагоревања након изласка из гасне турбине, користе за предгревање свежег ваздуха који се високопритисним турбокомпресором убацује у коморе за сагоревање, или као извор топлоте за даљу употребу.

Опсег снага гасних турбина је велики. Од неколико kW, такозване микротурбине, па све до неколико стотина MW, као турбине које се користе у електранама. Гасне турбине раде на фреквенцијама од 50 или 60 Hz.

Историјски развој гасне турбине први је започео енглез *John Barber*. Он је у Енглеској 1791. године први патентирао гасну турбину. Међутим због технолошких проблема, никада није направљен ефикасан прототип. Прво приближавање новијем схватању гасне турбине дао је *F. Štolce* у своме патенту 1872. године, међутим неуспех овог патента се приписује неефикасности аксијалног компресора. Сер *Frank*

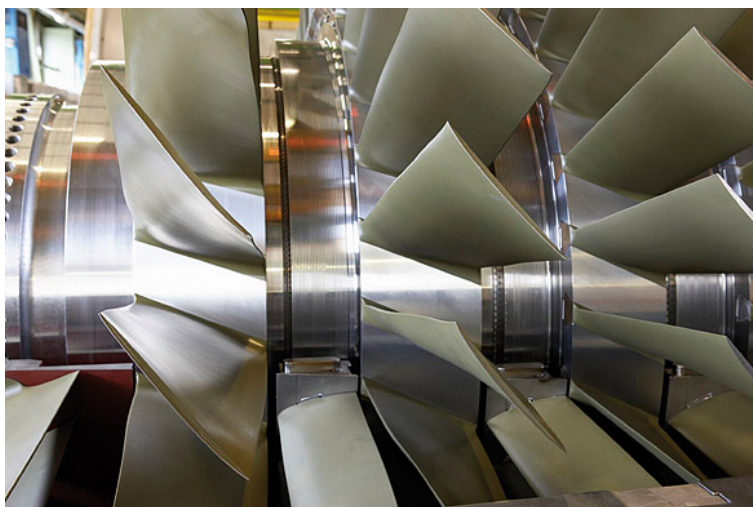
Whittle патентирао је своју турбину 1930. године, за млазни погон летелице, засновану на радовима ранијих истраживача (први успешан тест његове турбине изведен је 1937. године). *Raúl Pateras de Pescara* патентирао је 1934. године машину са слободним клиповима - генератор гаса за гасну турбину (верзија са спољним сагоревањем). Прва гасна турбина на свету за погон генератора електричне струје произведена је 1939. године у *Brown Boveri* компанији, Нојшател, Швајцарска. Од тада гасне турбине стално налази нове модусе примене у различитим областима.

Све чешће се гасна турбина користи као погонска машина на локомотивама, аутобусима, аутомобилима, мотоциклима, хеликоптерима, бродовима, за погон електричних генератора, а да о примени у функцији авионског мотора и не говоримо. Разлог за све шири домен примене гасне турбине је њен однос снага/тежина - мале димензије, а велика излазна снага су њена главна компаративна предност пред клипним моторима. Иако нису толико добре у одзиву на промену радног режима и ефикасне као клипни мотори, све више се турбине уграђују у моторна возила, посебно возила хидбридног (комбинованог) погона [5].

Термодинамички циклус по коме ради постројење у коме дејствује гасна турбина назива се **Џуловим (Joyle) циклусом**.

Компресор

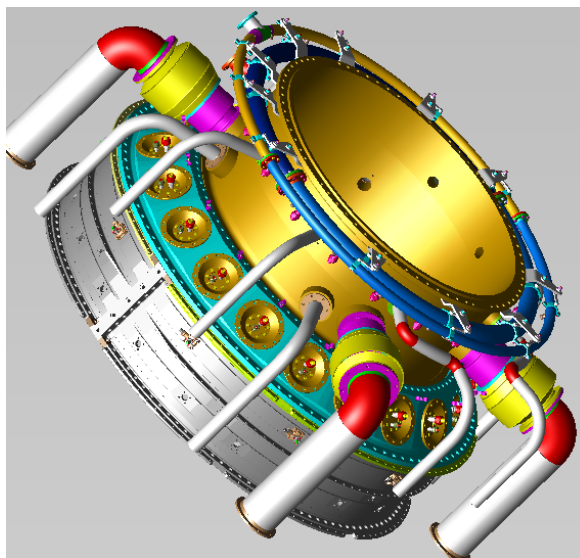
Компресор је сачињен од неколико редова ротирајућих лопатица и неколико редова непокретних лопатица које усмеравају ваздух у следећи ред ротирајућих лопатица, слика 8. Први ред ротирајућих лопатица убрзава ваздух који прелазећи преко њихових иваца одлази ка првом реду непокретних лопатица. Ваздух преко првог реда непокретних лопатица прелази и иде право на други ред ротирајућих лопатица, и тако даље кроз остале делове делове компресора. Сваки део компресора има свој ротирајући и статични део.



Слика 8. Компресор гасне турбине SGT6-4000F

Коморе за сагоревање

У коморама за сагоревање (слика 9) сагорева мешавина горива и ваздуха а продукти сагоревања се прослеђују турбини на температури која је у опсегу одређеном дизајном. Гориво се убризгава на горњем крају горионика, а дизне за гориво могу бити једноставнијег типа (испоручују само гасовито или само течно гориво), или могу бити дизајниране тако да могу да пропуштају гасовито или течно гориво у различито време. Док су неке од гасних турбина ”двострука по питању горива”, оне могу да сагоревају мешавину гасног и течног горива. Температуре пламена преко 1100 °F (око 600 °C) нису ретки у моторима авиона високих перформанси. Ваздух за хлађење обара ове температуре на вредности које лопатице турбине могу да издрже. Ваздух који се користи за спаљивање горива назива се примарни ваздух. А ваздух за хлађење секундарни, и контролише се и усмерава се помоћу отвора који су на коморама за сагоревање.



Слика 9. Комора за сагоревање гасне турбине

Турбина

Кинетичка енергија гасова која улази у турбину се претвара у механичку снагу вртила, која се затим користи за погон компресора и осталих система (преко зупчаника, каишева...). Данас се ове турбине углавном изводе да буду аксијалног типа. Неки произвођачи, међутим, користе и радијални тип турбина. Радијална турбина је јефтинија, једноставнија и лакша за производњу од турбине са аксијалним протоком. У случајевима у којима се турбина користи код тенкова или у електранама, издувни гасови се не користе већ се избацују кроз издувне цеви. Уколико се гасне турбине користе у когенеративним постројењима, издувни гасови пролазе кроз неку врсту размењивача топлоте да би предали топлоту у неке друге сврхе или да загреје ваздух пре него што поново уђе у компресор.

Овде нису узети у обзир остали делови, као на пример лежајеви, систем подмазивања, унутрашња структура турбине, структура лопатице итд. Ове области постају главни инжењерски проблеми услед великих температура, притисака и брзине обртања унутар турбине. Али основни принцип који је овде описан важи за све гасне турбине.

Предности и недостаци

Још увек су мање гасне турбине скупље од клипних мотора, али сад је то већ само питање броја произведених примерака - серијска производња клипних мотора појефтињује моторе упркос великом броју делова, посебно покретних. Како се гасне турбине буду више примењивале, и овај "недостатак" ће постати прошлост.

За сада предности гасних турбина у односу на остале погонске машине су:

- веома висок однос снага/тежина,
- мањи габарити у односу на остале погонске машине исте снаге,
- кретање у само једном правцу, са много мање вибрација,
- мање покретних делова,
- мањи радни притисак,
- већа радна брзина,
- мања цена подмазивања и мања потрошња уља.

Осим набројаних предности, гасне турбине имају и одређене недостатке када их поредимо са осталим погонским машинама:

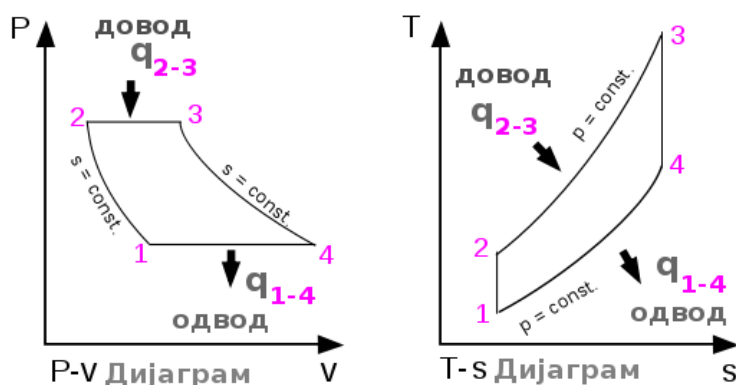
- висока цена,
- мањи коефицијент корисног дејства, посебно на нижим режимима рада и празном ходу,
- дуже време потребно за стартовање,
- слабији и спорији одзив на захтев за променом радног режима.

2.3. Цулов циклус

Цулов циклус припада деснокретним термодинамичким циклусима. Деснокретни циклуси служе да се добије (произведе) користан (технички) рад. На p (притисак-запремина) и Ts (температура-ентропија) дијаграму ови циклуси се окрећу у смеру обртања казаљке на часовнику, због тога се они називају деснокретни. При овом кружном процесу из околине (топлотног извора) се доводи количина топлоте радном телу, па се део ове топлоте претвара у рад (нпр електричну енергију), док се остатак количине топлоте избацује у топлотни понор. Међу најзначајнијим деснокретним циклусима су *otto*-ов циклус (користи се код мотора са унутрашњим сагоревањем), *rankine*-ов циклус (енергане са парним турбинама), *carnot*-ов циклус (не користи се у пракси, служи за упоређивање са другим циклусима) и *joule*-ов циклус (у англосаксонској литератури познатији као *brayton*-ов циклус).

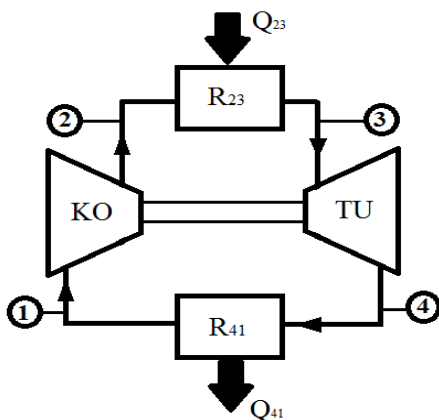
Џулов деснокретни циклус је био основа за постављање, а касније и развој рада гасних турбина. Данас највећи број постројења савремених гасних турбина у свету ради по Џуловом (Брајтоновом) циклусу. Овај циклус се састоји од четири термодинамичких промена стања радног тела (слика 10):

- изентропска компресија 1-2,
- изобарско довођење топлоте 2-3,
- изентропска експанзија 3-4,
- изобарско одвођење топлоте 4-1.



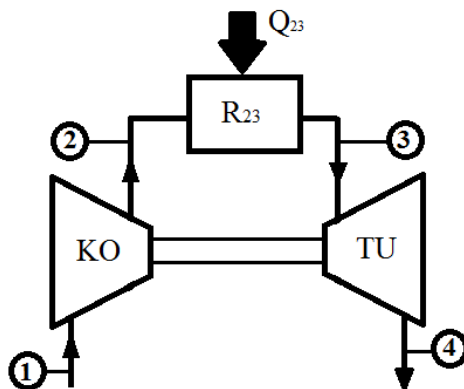
Слика 10. $p-v$, $T-s$ дијаграми идеалног Џуловог циклуса

Код затвореног Џуловог циклуса у компресору КО се сабија чист ваздух (идеалан гас) изентропски од стања 1 до стања 2. Довод топлоте или сагоревање горива врши се при константном притиску (изобара 2-3), преко размењивача топлоте R_{23} . Од стања 3 до 4 наставља се експанзија продуката сагоревања по изентропском процесу у турбини ТУ или у млазнику млазног мотора до притиска околине. Одвод топлоте Q_{41} спроводи се при изобарском процесу стања од 4 до 1, све до изједначавања температуре гасова са температуром околине R_{41} . Тиме је радна материја доведена у почетно стање (слика 11).



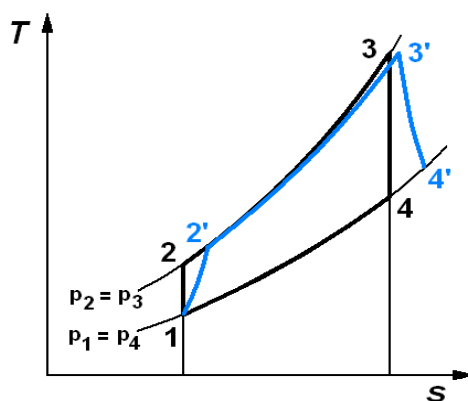
Слика 11. Шематски приказ постројења гасне турбине за затворен једноставан Џулов циклус

Код отвореног Џуловог циклуса (слика 12) радна материја стања 4 се одводи у околину, а компресор КО усисава околни ваздух стања 1, па циклус у стварности остаје отворен, док је остатак циклуса исти као код затвореног Џуловог циклуса.



Слика 12. Шематски приказ постројења гасне турбине за отворен једноставан Џулов циклус

Код стварног Џуловог циклуса (код гасне турбине) одвијају се неповратни процеси у компресору и турбини, а настаје и пад притиска у цевоводима и комори за сагоревање. Као резултат тога добија се температура која је на излазу из компресора и турбине већа, односно мања на улазу у турбину, у односу на оно што је приказано у идеалном циклусу.



Слика 13. Ts дијаграм реалног Џуловог циклуса

На слици 13. је приказан Ts дијаграм реалног Џуловог циклуса. Реални Џулов циклус приказан је плавом бојом и дефинисан је тачкама 1 2' 3' 4' 1. Идеални Џулов циклус је дефинисан тачкама 1 2 3 4 1, и на овом Ts дијаграму се види разлика између реалног и идеалног Џуловог циклуса. Ове две варијанте овог циклуса се разликују само у Ts дијаграму, док су pv дијаграми исти.

Прорачун Џуловог циклуса

Количина топлоте која се доводи, може се изразити као [6]:

$$Q_{23} = c_p \cdot (T_3 - T_2), \quad (1)$$

док се одведена топлота може написати у облику:

$$Q_{41} = c_p \cdot (T_4 - T_1), \quad (2)$$

где су:

- T_1 [K] - температура гаса на улазу у компресор,
- T_2 [K] - температура гаса на излазу из компресора,
- T_3 [K] - температура гаса на улазу у турбину,
- T_4 [K] - температура гаса на излазу из турбине,
- c_p [J/kg K] -спрецифична топлота при константном притиску.

Степен корисног дејства се израчунава, по општем изразу као [6]:

$$\eta = (\text{доведена топлота} - \text{одведена топлота}) / \text{доведена топлота}$$

па то конкретно изгледа:

$$\eta = \frac{Q_{23} - Q_{41}}{Q_{23}} \quad (3)$$

Одакле добијамо:

$$\eta = \frac{(c_p \cdot (T_3 - T_2)) - c_p \cdot (T_4 - T_1)}{c_p \cdot (T_3 - T_2)}, \quad (4)$$

и коначно, израз за израчунавање идеалног Џуловог циклуса:

$$\eta = 1 - \frac{c_p \cdot (T_4 - T_1)}{c_p \cdot (T_3 - T_2)}. \quad (5)$$

Како важе следеће релације:

$$\frac{p_3}{p_4} = \frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{T_3}{T_4} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} = \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}},$$

$$\frac{T_3}{T_4} = \frac{T_2}{T_1} \text{ или } \frac{T_3}{T_2} = \frac{T_4}{T_1} \text{ и } \frac{T_3}{T_2} - 1 = \frac{T_4}{T_1} - 1$$

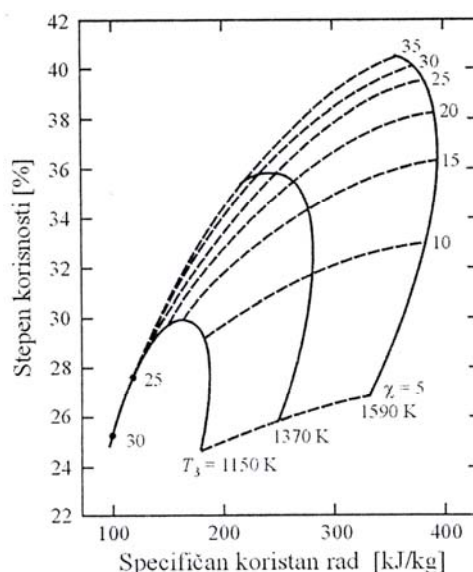
уз помоћ њих се степен корисности може написати и у облику:

$$\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{1}{\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}} = 1 - \frac{1}{\Pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}} \quad (6)$$

где је Π степен компресије у компресору. А у литератури се често убацује и функција степена компресије са ознаком χ па је коначан израз за степен компресије:

$$\eta = 1 - \frac{1}{\Pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}} = \frac{1}{X}$$

На слици 14, приказане су главне карактеристике једноставног отвореног Цуловог циклуса. Ту се види да се за једну одређену вредност степена компресије ($\chi=15$) добија максимална вредност специфичног корисног рада. Потом, за још веће вредности степена компресије, рад који је потребно утрошити за процес компресије расте брже од рада који се добија при експанзији, па специфичан користан рад постаје све мањи. Повећање степена корисности, међутим, омогућава веће смањење количине топлоте које треба довести радном телу, од смањења корисног рада, тако да степен корисности постројења и даље расте. При одређеној вредности степена компресије, степен корисности достиже своју максималну вредност када из јединице доведене топлоте добија максималан рад. При даљем повећању степена компресије, рад компресора постаје толико велики да користан рад почиње да опада брже него што се смањује доведена количина топлоте, па степен корисности почиње да опада [5].

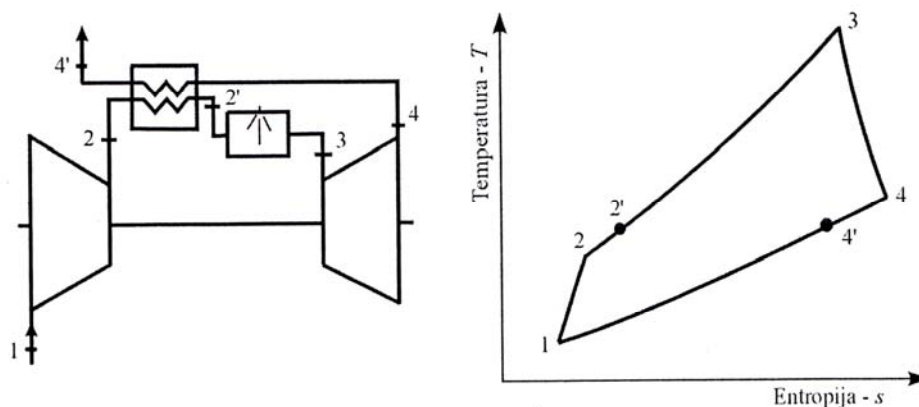


Слика 14. Зависност степена корисности од јединичног корисног рада постројења гасне турбине

За повећање степена корисности термодинамичког циклуса потребно је повећати температуру гасова на улазу у турбину T_3 , а то изискује да се примени квалитетнији материјал, решити проблем хлађења компонената које су изложене највишим температурама, што је могуће бољи квалитет горива... Постоје и други начини да се повећа степен корисности Џуловог термодинамичког циклуса. То се постиже различитим варијантама Џуловог циклуса:

Џулов циклус са рекуперацијом

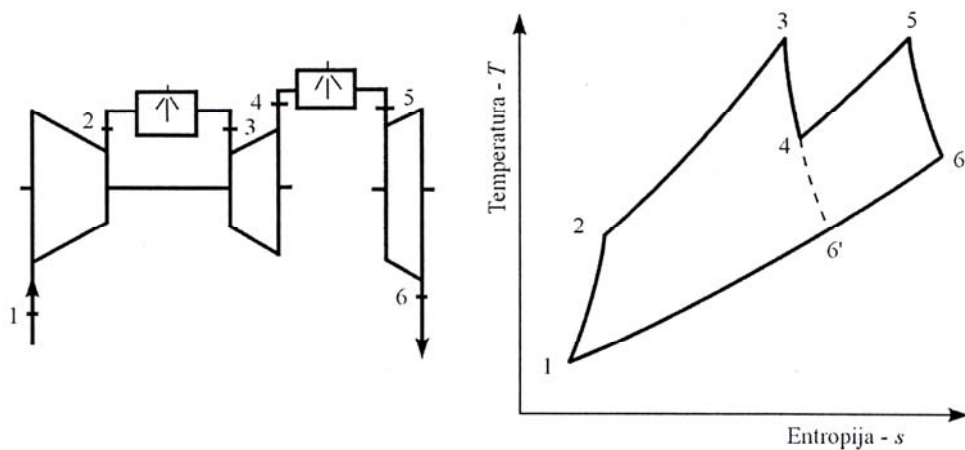
Компримовани ваздух (или гас) пре уласка у грејну комору загрева се топлотом гасова који су претходно извршили експанзију у турбини, слика 15.



Слика 15. Шематски приказ и Ts дијаграм Џуловог циклуса са рекуперацијом

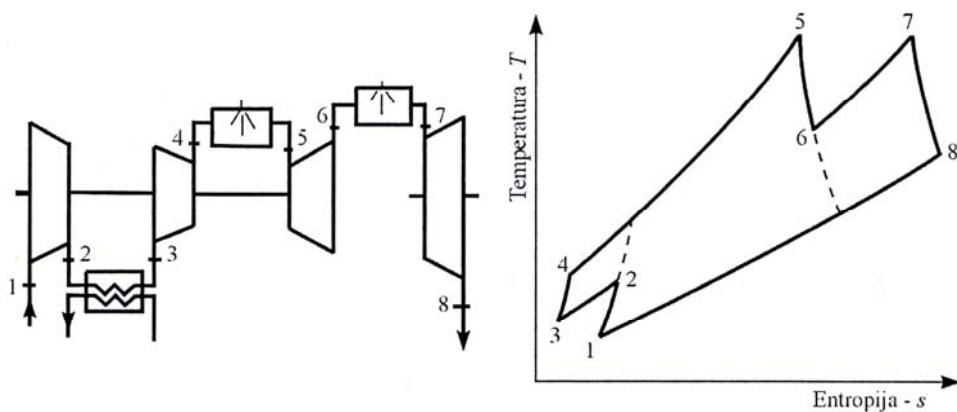
Џулов циклус са догревањем

У грејној комори високог притиска топлота се доводи сагоревањем горива, и тако се повишава температура радном телу. Врели гасови (продукти сагоревања) експандирају у турбини високог притиска после ове прве експанзије циклусу се поново доводи топлота спаљивањем горива у комори ниског притиска. Гас потом експандира у турбини ниског притиска до коначног атмосферског притиска (слика 16).



Слика 16. Шематски приказ и Ts дијаграм Цуловог циклуса са догревањем

Цулов циклус са међухлађењем и догревањем



Слика 17. Шематски приказ и Ts дијаграм Цуловог циклуса са међухлађењем и догревањем

3. Гасне турбине у когенеративним топланама

Когенерацијски потенцијал топлана, које као гориво користе природни гас и/или мазут, пре свага зависи од техничких карактеристика или намене саме топлане. Од битних техничких карактеристика топлане издвајају се врсте котлова (број јединица и инсталисана снага) и врста односно стање воде која се користи као радни флуид у примарном кругу што зависи од врсте котла. У постојећим топланама најчешће се примењују вреловодни котлови, са температуром воде на изласку из котла од око 180° С. Друга битна техничка карактеристика топлане је снага, односно потрошња електричне енергије, опреме која се налази у самој топлани.

Када се говори о намени топлоне, пре свега се мисли на то да ли се топлана користи за загревање простора у зимском периоду или се користи и за загревање потрошне топле воде и процесне топле воде у зимском и летњем периоду. Овај податак је битан због одеђивања оптималне снаге когенерационе јединице, али и врсте когенерационе опреме. За веће топлотне снаге најчешће се користи велике гасне турбине, док се за мање топлотне снаге користе турбине малих снага или чешће гасни мотори. У сваком случају, да би се изабрао одговарајућа СНР јединица мора се успоставити баланс између техничких захтева и релевантне економске одживости.

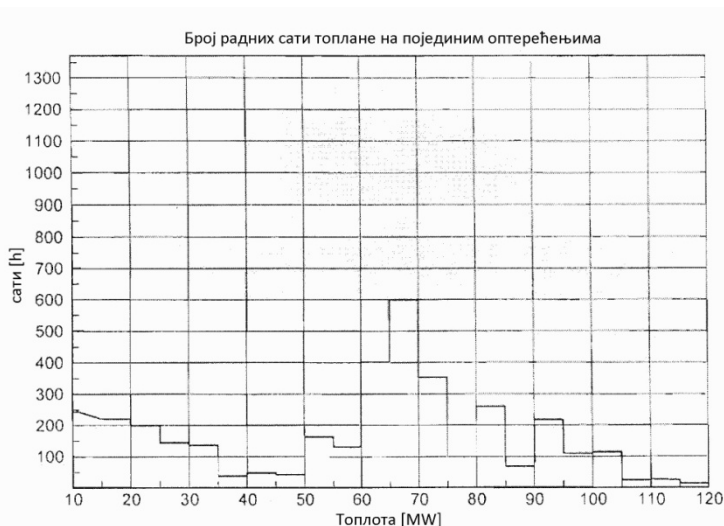
3.1. Полазни подаци (мерења) неопходна за одређивање когенерационог потенцијала

У циљу оптималног одређивања когенерационог потенцијала, најпре је потребно одредити (измерити) колико времена топлана ради на одређеним снагама, односно колико часова ради на појединим интервалима топлотних снага. Циљ је одређивање интервала на којима је топлана радила највећи број часова у току године, како би се одредила оптимална снага когенерационе јединице. Значај одређивања оптималне снаге, огледа се у изразитом паду ефикасности гасних турбина промени режима, односно снаге.

Како би одредили на којим оптерећењима топлана ради у одређеним временским интервалима врши се сумирање резултата који су добијени мерењем у самој топлани. Подаци се најчешће сумирају у табеле, на основу којих се израђују дијаграми, слика 18 и 19. На слици 18, приказана је промена испоручене топлоте у времену за петнаестодневни период. Наравно, мерења је потребно вршити током целе грејне сезоне, односно, током целе године уколико топлана испоручује топлоту и ван грејне сезоне.



Слика 18: Дијаграм испоручене топлоте за дати период



Слика 19: Број радних сати топлане на појединим оптерећењима

Сумирањем резултата лако се може одредити оптерећење на којем топлана ради највећи број сати у току године, али се мора водити рачуна о броју сати у којима топлана ради на оптерећењима која су непосредно изнад и испод. Поред топлотног оптерећења потребно је одредити и оптерећење саме топлане у погледу електричне енергије. СНР јединица се најчешће конципира тако да задовољи сопствене потребе топлане за електричном енергијом. Када се ови критеријуми узму у обзир добија се оптимална снага СНР јединице која ће задовољити потребе топлане.

3.2. Упоредне карактеристике гасних турбина које се могу наћи на тржишту

Како се на тржишту може пронаћи већи број произвођача (*Siemens, GE, Hitachi, Kawasaki Heavy Industries, Man Group...*) који нуде моделе у различитим

опсезима снага, потребно је одабрати адекватан модел. Одабир модела се врши на основу спроведеног прорачуна термодинамичког циклуса као и на основу економске анализе по статичким и динамичким показатељима.

Полазни подаци за прорачуне су основни параметри СНР уређаја које дају произвођачи и односе се на снагу генератора, степен корисности, степен увећања притиска у компресору.

У зависности од излазне механичке снаге, у табели 1, приказано је неколико модела различитих произвођача. Произвођачи чији се модели налазе у табели су *Kawasaki Heavy Industries* (M7A-02), *Siemens* (SGT-200), *Rolls Royce* (501-KC7), *General Electric* (GE-10) и *Man Group* (THM 1304-9). У табели су поред излазне снаге, дати и подаци о ефикасности, притиску у компресору, и температура излазног гаса.

Табела 1. Поређење карактеристика гасних турбине

	Излазна механичка снага MW	„Hate rate“ kJ/kwh	Ефикасност %	Притисак у компресору	Температура излазног гаса °C
M7A-02	7,1	11,980	33,7	13:1	514
SGT-200	7,68	10,906	33	12,3:1	489
501-KC7	7,4	11,340	31,7	13,5:1	520
GE-10	11,2	10,860	33,3	15,5:1	495
THM 1304-9	8,64	12,341	27,7	10:1	492

Kawasaki Heavy Industries (M7A-02)

Поузданост Кавасакијевих турбина се најбоље огледа у томе што су оне најзаступљеније у болницама и другим критичним локацијама, где је непрекидно напајање најбитније. Ова гасна турбина (слика 20), се углавном производи са једним вратилом. Компресор и турбина су аксијалног типа. Највећа предност ових турбина су добре перформансе у односу на цену, низак ниво буке и мале вибрације (што обезбеђује миран рад), једноставно одржавање, дизајн који штеди простор, и лак транспорт и монтажа, “чисти” издувни гасови који доприносе очување животне средине. Кавасаки може да се похвали тиме да један бљесак муње има исто NO_x, као и њихова турбина која ради у току целе године.



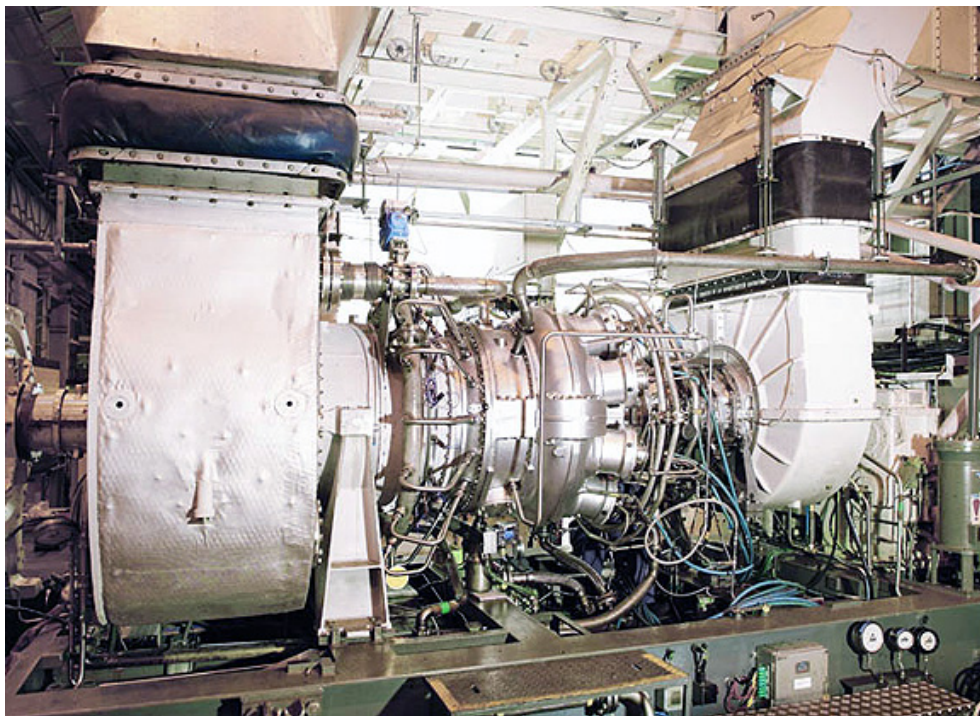
Слика 20. *Kawasaki Heavy Industries (M7A-02)*

Siemens (SGT-200)

Робусна и компактна индустријска гасна турбина SGT-200 (слика 21) нуди изузетну поузданост, ефикасност и одржљивост. Дизајнирана је да ради са разним врстама течних и гасовитих горива. Турбина је доступна као „фабрички састављени део“ и пружа одличан однос снаге и тежине.

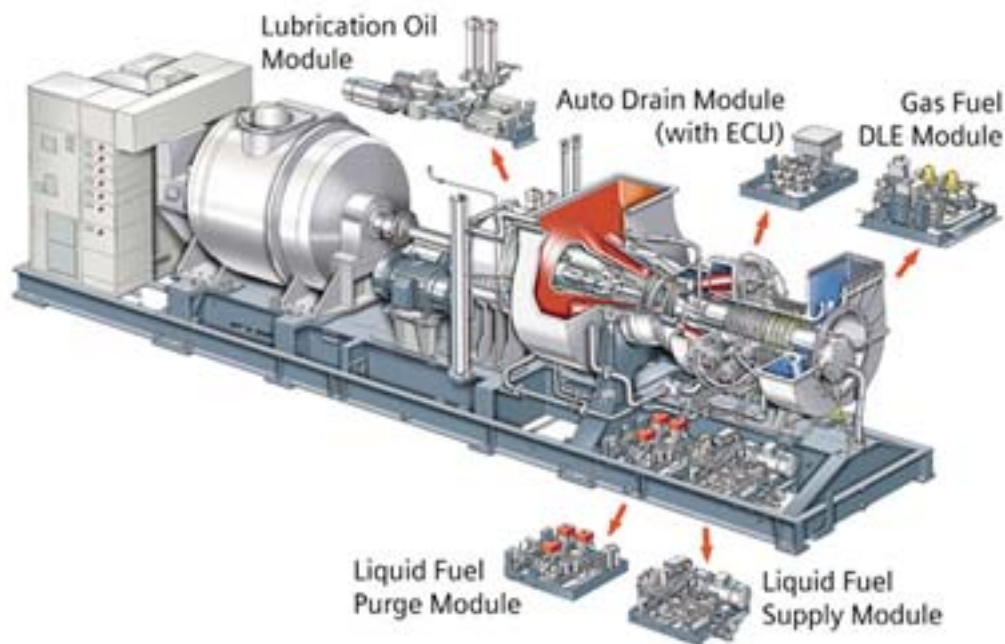
За све електричне и когенерацијске потребе, користи се верзија једног вратила SGT-200. Одржавање на лицу места и дубока поузданост чине ову турбину једну од првих избора код нафтне и гасне индустрије. Користи се на мору, на нафтној платформи, као и на копну, код складиштења нафте или када је потребно хитно генерисати енергију.

За механичке потребе, односно за пумпе и компресоре у индустрији нафте и гаса, користи се верзија SGT-200 са два вратила. За погон пумпи обично се брзина регулише мењачем, док већина компресора нема потребу за брзим мењањем степена преноса између снаге турбине и компресора гаса. SGT-200 са двоструким вратилом је дизајнирана за примене где брзина и оптерећење варирају. Ово се користи као погонско решење за пренос сирове нафте и других нафтних производа као и убризгавање гаса или воде.



Слика 21. Siemens (SGT-200)

Сиенс SGT-200 се лако транспортује, инсталира и одржава на лицу места. За производњу електричне енергије пакет подразумева гасну турбину, мењач генератора и цео тај систем монтиран на једној бази, слика 22.



Слика 22. Siemens (SGT-200) склоп са генератором

Rolls Royce (501-KC7)

Више од 2500 Ролс Ројсових 501-К гасних турбина (слика 23), је испоручено за индустријску употребу, резултирало је 65 милиона сати радног искуства 500 корисника из 40 земаља. Овај компактни дизајн пружа високу ефикасност, лако одржавање и изузетну поузданост.

Модуларна конструкција, поуздане перформансе, као и могућност да раде са широким спектром горива у све захтевнијим условима, чини 501-К гасну турбину погодну за разноврсно генерисање снаге или електричне енергије. Ова гасна турбина има доказано једну од најмањих емисија штетних гасова током широког спектра рада.

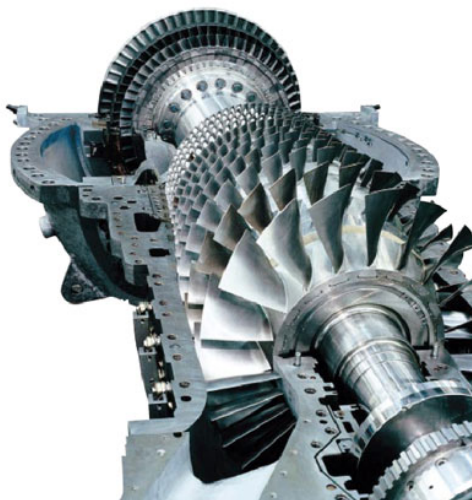


Слика 23. Rolls Royce (501-KC7)

General Electric (GE-10)

Генерал електрик GE-10 је тешка гасна турбина и доступна је са једним или два вратила. Дизајн мотора GE-10 (слика 24) је одлично урађен на основу великог искуства стеченог у раду у свим окружењима. Постоји преко две стотине јединица GE-10, који раде под условима који су у распону од хладноће Аљаске и Сибира до топлоте у пустињи и влажности тропских предела.

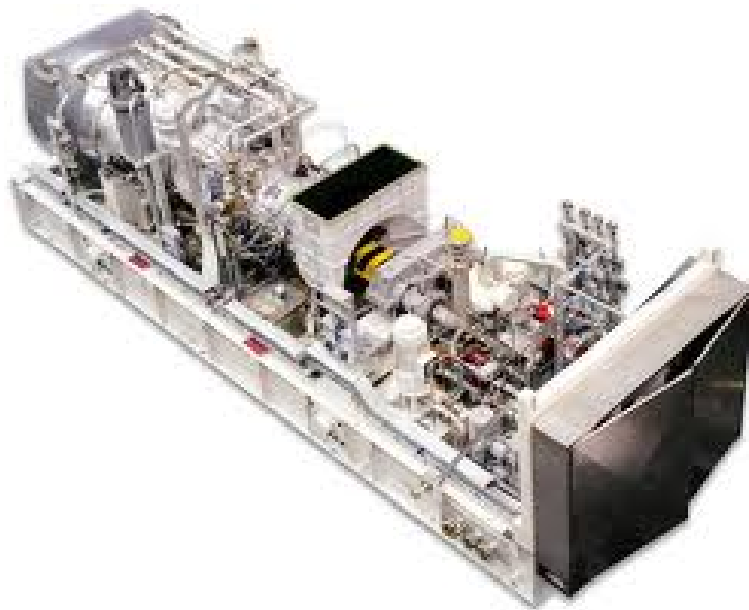
Верзија GE-10 са једним вратилом, је намењена генерисању електричне енергије. Турбина се састоји из три реакциона дела. У прва два дела, делови врућег гаса се хладе ваздухом који је издвојен из аксијалног компресора. Други и трећи део су међусобно повезани деловима да би ограничили преоптерећење и вибрације оштрица. Верзија са два вратила се користи за механички погон. Састоји се из два ваздушно хлађена, високо-притисна и два ниско-притисна дела, спојена са главним вратилима.



Слика 24. General Electric (GE-10)

Man Group (THM 1304-9)

Концепт ТНМ 1304-9 (слика 25) гасне турбине за механички погон је прилагодљивост решења, тако да омогућава купцу што ширу примену. Разне опције дозвољавају турбини да се прилагоди и задовољи спецификације клијената, стандарда и правила праксе. Ове турбине су самосталне, имају аксијалан ток, и имају најчешће два вратила. Због конструкције са два вратила компресор и турбина су механичке независне једна од друге, што је пресудно у погледу брзог инсталирања и одржавања. Још једна предност ових турбина из породице ТНМ, је та што могу да функционишу на великим температурама гаса и под великим притиском, што обезбеђује сигурност дугог века трајања од главних ротирајућих делова па све до стационарних компонената. Примењује се за транспорт гаса, код производње нафте и гаса на нафтним платформама, механички погон у електранама. ТНМ гасне турбине су постављене у гасним станицама, на транспорту гаса и нафте, у многим земљама широм света, као што су Алжир, Немачка, Мексико, Нигерија, Русија, САД,



Слика 25. Man Group (THM 1304-9)

3.3. Перформансе гасних турбина

У прошлости, један од главних недостатака гасне турбине била је њена ниска ефикасност (отуда употреба више горива) у односу на моторе СУС и парне турбине сличне снаге. Међутим, током последњих педесет година, континуиран рад на инжењерском развоју је повећао термалну ефикасност (18% за Неуцхателову гасну турбину) на садашњи ниво од 40% за једноставнији циклус, и 55% у комбинованом циклусу. Чак се и горивна ефикасност повећала, у једноставнијем циклусу је ефикасност 40%, а у комбинованом циклусу иде и до 60%. Ове вредности су знатно више од осталих машина, као што су парне турбине сличне снаге.

У поређењу са осталим машинама, као што су дизел мотори, гасна турбина има веома низак ниво загађења који је продукт сагоревања. Гасови који су штетни за околину су угљен-моноксид, несагорели угљоводоник, оксиди азота (NO_x) и дим. А управо ове гасове, гасна турбина најмање емитује у поређењу са осталим моторима. Тако је на пример учешће малзних авиона у атмосферском загађењу мањи од 1%.

Закључак

Презентована је анализа гасне турбине, њени делови, принцип рада као и примена гасних турбина у когенеративним постројењима.

Потрошња енергије је у порасту, па ће бити потребно проналажење нових извора енергије и повећање ефикасности искоришћења постојећих извора енергије, како за потребе индустрије тако и за сектор опште потрошње. Когенерацијска постројења су један од начина максималног искоришћења примарне енергије. Њихова предност је у виском степену искоришћења, као и еколошкој и економској прихватљивости њихове употребе. Примена гасних турбина у постројењима за комбиновану производњу топлоте и снаге је веома повољна због високе ефикасности која се добија у том случају, али и због релативно велике излазне снаге у односу на димензије саме турбине..

Од приказаних модела гасних турбина најбољу ефикасност при генерисању снаге има *Kawasaki Heavy Industries (M7A-02)* и то од 33,7%, док највећу температуру излазних гасова, који може да се користи као извор топлоте за даљу употребу, има *Rolls Royce (501-KC7)* гасна турбина и температура тог излазног гаса је 520° С. За места у којима је потребна сигурност напајања, као што су здравствене установе, најповољнија је употреба турбине *Kawasaki Heavy Industries (M7A-02)*, док *Siemens (SGT-200)* повољна због своје компактне конструкције која омогућава једноставан транспорт и инсталирање и добро разрађене сервисне мреже. Уколико је потребно да гасна турбина ради у екстремним временским условима најповољније решење представља *General Electric (GE-10)*. У погледу заштите животне средине најповољније решење представља *Rolls Royce (501-KC7)* гасна турбина, коју одликује низак степен емисије гасова стаклене баште, док је по питању прилагодљивости потребама корисника најпогоднија гасна турбина *Man Group (THM 1304-9)*.

Литература

- [1] Милун Бабић, Светислав Стојковић, *Турбомашине – теорија и математичко моделирање*, Машински факултет Крагујевац 1997.
- [2] Н. Cohen and CFC Rogers, *Gas turbine theory*, Longman Group Limited, England, 1996.
- [3] <http://www.netl.doe.gov/technologies/coalpower/turbines/refshelf/handbook/1.1.pdf>
- [4] Милан Љ Трифуновић, *Гасне турбине и млазни погон*, Виша поморска школа, Титоград 1960.
- [5] Војин Грковић, *Топлотне турбомашине*, Факултет техничких наука, Нови Сад, 2004.
- [6] Милорад Бојић, Емил Хнатко, *Термотехника*, Машински факултет Крагујевац 1987
- [7] www.cogen.org
- [8] Major, G. *Small scale cogeneration*, The Netherlands: Centre for the Analysis and Dissemination of Demonstrated Energy Technologies. CADDET Energy Efficiency Analysis Series 1. IEA/OECD; 1995
- [9] Петровић, М. и др.: *Анализа примене гасних турбина и гасних мотора за комбиновану производњу топлотне и електричне енергије у топлани „Церак“ у Београду - елаборат*, Београд, 2004.
- [10] Каталог Kawasaki Heavy Industries: <http://www.khi.co.jp/english/gasturbine/pdf/gtgs100621.pdf>
- [11] Каталог Siemens: <http://www.energy.siemens.com/co/en/power-generation/gas-turbines/sgt-200.htm#content=Technical%20Data>
- [12] Каталог Rolls Royce: http://www.rolls-royce.com/Images/fs_501_tcm92-6730.pdf
- [13] Каталог General Electric: http://www.ge-energy.com/content/multimedia/_files/downloads/gas_turbines_cat.pdf
- [14] Каталог Man Group: http://www.mandieselturbo.de/files/news/files_of12079/922e_96dpi_rgb.pdf