

prečnih klinova čine tzv. *mrtve točke*. To su točke u prostoru u kojima je turbina nepomična i od kojih se toplinski širi i pomiče. Turbina prikazana na slici 67 ima dvije mrtve točke. Od prve od njih (točka A) sva se turbinska kućišta izduljuju ili skraćuju uzduž uzdužnih klinova kao jedna cjelina. Druga mrtva točka (točka B) učvršćuje položaj drugog niskotlačnog kućišta. Da ne bi ometalo međusobno premještanje niskotlačnih kućišta, kućište ležaja, smješteno između njih, opremljeno je elastičnim elementom.

Mrtva se točka postavlja u području izlaznih niskotlačnih kućišta. Time se u kondenzacijskim turbinama sprečava jače pomicanje kondenzatora, kojemu masa zajedno s vodom može biti veća od mase turbine, a u protutlačnim se turbinama sprečava pomicanje teško deformabilnih parovoda velikog promjera. Prilikom izbora broja i položaja mrtve točke za visokotlačna i srednjotlačna kućišta treba uzeti u obzir nekompenzirane toplinske dilatacije parovoda svježje pare i parovoda međupregrijanja.

## PROIZVODNJA I PRIMJENA TOPLINSKIH TURBINA

**Parne turbine.** Glavno je područje primjene parnih turbina pogon generatora za proizvodnju električne energije. Više od 84% instalirane snage električnih mreža krajem XX. st. otpada na toplinske turbine, a pritom više od 95% električne energije proizvedene u toplinskim turbinama daju parne turbine (kondenzacijske turbine ili turbine s oduzimanjem pare).

Razvoj parnih turbina, prema veličinama stanja pare, jediničnoj snazi i izvedenim konstrukcijama moguće je podijeliti u nekoliko etapa. Zbog toga što nije postojao materijal za visoke tlakove i temperature, do Prvoga svjetskog rata gradile su se turbine niskih parametara pare, tlaka  $1,2 \cdot 1,6$  MPa i temperature  $300 \cdot 350$  °C. Za izradbu turbina primjenjivalo se uglavnom lijevano željezo. Jedinčna snaga iznosila je do 6000 kW pri brzini vrtnje  $50 \text{ s}^{-1}$ , 15000 kW pri brzini vrtnje  $25 \text{ s}^{-1}$  i 30000 kW pri brzini vrtnje  $16,6 \text{ s}^{-1}$  i  $12,5 \text{ s}^{-1}$ .

U razdoblju između Prvoga i Drugoga svjetskog rata naglo se povećavaju jedinčna snaga, veličine stanja radnog fluida i ekonomičnost parnih turbina. Ustanovilo se da se najveća korisnost može postići preradbom manjega toplinskog pada u pojedinom stupnju. Teži se povećanju broja stupnjeva i pri nižim parametrima pare. Radi većeg broja stupnjeva grade se turbine s dva, tri i više kućišta. Za izradbu turbina primjenjivao se uglavnom lijevani čelik, a zatim i legirani čelik.

Turbine snage veće od 50 MW postižu u tom razdoblju brzinu vrtnje  $25$  i  $30 \text{ s}^{-1}$ , a turbine sa snagom većom od 85 MW obično imaju više osovine. Tvrtka Brown Boveri već je 1928. za termoelektranu u New Yorku proizvela dvoosovinsku parnu turbinu snage 160 MW. S povećanjem snage pojavljuje se i težnja za povećanjem brzine vrtnje. Godine 1937. Lenjingradski metalni zavod (LMZ) prvi je u svijetu proizveo dvokucišnu parnu turbinu snage 100 MW i brzine vrtnje  $50 \text{ s}^{-1}$ .

Istodobno s usavršavanjem konstrukcija parnih turbina većih snaga, umjerenog tlaka od  $2 \cdot 3$  MPa i temperature do 400 °C, u razdoblju od 1920. do 1940. teži se povećanju veličina stanja pare. One dostižu tlak od  $12 \cdot 18$  MPa i temperature od  $500 \cdot 550$  °C zahvaljujući primjeni legiranih čelika. Turbine tlaka do 18 MPa obično su bile protutlačne, manje snage, od kojih je izlazna para služila za turbine nižeg tlaka. To su bile tzv. turbine prethodnice. One su omogućile prijelaz na rad s višim veličinama stanja pare, a da se pritom nije moralo obnavljati cijelo postrojenje, dok su nova postrojenja većih snaga imala više veličine stanja. Tako npr. do 1940. jednoosovinske dvokucišne parne turbine američke tvrtke Westinghouse dostižu snagu 165 MW, tlak 9 MPa, temperaturu 500 °C i brzinu vrtnje  $30 \text{ s}^{-1}$ .

Poslije Drugoga svjetskog rata u svim tehnički razvijenijim europskim zemljama i u Americi, naglo se razvija energetika. To uzrokuje sve veći rast jediničnih snaga parnih turbina. Istodobno se teži visokim parametrima pare i međupregrijanju pare primjenom visokolegiranih čelika, tako da se danas u svijetu grade termoelektrane s kondenzacijskim parnim turbinama jedinične snage 1200 i 1300 MW. Veličine stanja pare na ulazu u turbinu klasične termoelektrane iznose danas  $12 \cdot 25$  MPa (katkad i 35 MPa) te  $520 \cdot 580$  °C, a u posebnim slučajevima do 650 °C. Temperature veće od 565 °C zahtijevaju primjenu još uvijek sku-

pih austenitnih čelika. Zbog toga se danas uglavnom za turbine većih snaga uzima para temperature 540 °C.

Turbine većih jediničnih snaga grade se danas s više kućišta, s visokotlačnim, srednjotlačnim i, već prema snazi, s jednim ili više niskotlačnih kućišta. Kućišta mogu biti povezana u seriju koja najčešće pokreće samo jedan generator. Zbog poteškoća oko gradnje velikih generatora, najveće jedinice turboagregata imaju katkad dvije osovine i pokreću dva generatora. Turbine srednjih snaga, od  $150 \cdot 300$  MW, radi smanjenja ukupne duljine obično imaju visokotlačni i srednjotlačni dio u jednom kućištu. Niskotlačno se kućište, zbog smanjenja duljine zadnjih lopatica, izvodi dvoprotočno. Turbine većih snaga grade se s dvoprotočnim srednjotlačnim kućištem, a turbine najvećih snaga i s dvoprotočnim visokotlačnim kućištem. Visokotlačna i srednjotlačna kućišta akcijske turbine obično imaju  $6 \cdot 12$  stupnjeva, a reakcijske turbine do 18 stupnjeva. Dvoprotočno niskotlačno kućište ima  $3 \cdot 8$  stupnjeva u jednom protoku u oba tipa turbina.

Jedinčna snaga turbina povećavala se poslije Drugoga svjetskog rata vrlo brzo. To razdoblje karakterizira i nagli razvoj turbina sa zasićenom parom za nuklearne elektrane. Prva nuklearna elektrana puštena je u pogon 1954. godine u tadašnjem SSSR, a imala je snagu 5 MW. Danas se za nuklearne elektrane grade turbine sa zasićenom parom najvećih snaga 1300 i 1400 MW, tlaka  $4 \cdot 7$  MPa, brzine vrtnje u Europi  $25 \text{ s}^{-1}$  (u Americi  $30 \text{ s}^{-1}$ ) i duljine rotorskih lopatica zadnjeg stupnja do 1450 mm. Gradnjom turbina velikih jediničnih snaga sa zasićenom parom svladani su problemi strujanja velikih protočnih volumena, separacije vlage, međupregrijanja nakon separacije vlage i strujanja vlažne pare u visokotlačnom dijelu turbine.

Parna turbina nije ograničavajući faktor veličine turbopostrojenja, već je to veličina ukupne instalirane snage u električnoj mreži i veličina električnoga generatora. S obzirom na mogućnost ispada bloka, njegova maksimalna snaga može biti 10% od snage u mreži. S povećanjem veličine bloka povećava se korisnost i djelotvornost konverzije energije, a smanjuje se specifična potrošnja topline i investicijski troškovi na jedinicu snage. Povećanjem snage bloka relativno najviše pojeftinjuju elektronička oprema i sustavi upravljanja, te građevinski dio elektrane, a poskupljuju jedino cjevovodi i armatura.

Osnovne su smjernice daljeg razvoja parnih turbina povećanje jedinične snage i korisnosti pri velikoj pouzdanosti i prilagodljivosti suvremenim potrebama eksploatacije, što zahtijeva velike znanstvene, konstrukcijske i tehnološke napore. Primjena visokih natkritičnih parametara i međupregrijanja pare do početne temperature izmijenila je konstrukciju turbina velikih jediničnih snaga i povećala broj kućišta. S povećanjem jedinične snage turbina ulazu se i naporu za smanjenje broja niskotlačnih kućišta povećanjem duljine lopatica zadnjeg stupnja. Granična snaga turbine određena je najvećim mogućim protokom pare kroz zadnji stupanj pri usvojenom tlaku u kondenzatoru. U današnjim je turbinama moguće uz tlak u kondenzatoru do 12 kPa postići snagu do 2000 MW.

Ako se ograniči broj kućišta turbine zbog duljine rotora, koji se lakše vibracijski uzbuđi što je dulji, jedini je put daljeg povećanja snage povećanje izlazne površine zadnjeg stupnja, tj. povećanje duljine rotorskih lopatica. Omjer srednjeg promjera zadnjeg stupnja i duljine lopatica nije u posljednje doba manji od 2,5. Povećanje jedinične snage pomoću dvoosovinskih turbina nije rješenje, jer su ekonomski pokazatelji dokazali prednost jednoosovinskih turbina. Bez obzira što su se 1957. godine u SAD ugrađivale dvoosovinske turbine od 500 MW, 1962. godine od 1000 MW i 1967. godine od 1300 MW, a jednoosovinske ih turbine stizale, ne treba očekivati dalje povećanje snage pomoću dvoosovinskih turbina.

U posljednje su doba proizvođači turbina razradili projektne varijante jednoosovinskih turbina snage  $1800 \cdot 2400$  MW. Te turbine imaju 4 i 6 izlaza, s duljinom rotorskih lopatica zadnjeg stupnja 1800 mm i 1900 mm. Smanjenjem brzine vrtnje od  $50 \text{ s}^{-1}$  na  $25 \text{ s}^{-1}$  pri jednakim naprezanjima stupnja moguće je povećati duljinu zadnjih rotorskih lopatica, a time i propusnu moć i snagu turbine. Međutim, postoji stalna težnja da se maksimalne snage postignute pri nižoj brzini vrtnje ostvare i pri brzini vrtnje od  $50 \text{ s}^{-1}$ , dakle pri manjoj masi i manjim izmjerama turbine.

Za dalje povećanje jedinične snage turbina na 3 000 MW i više potrebna su nova projektna i konstrukcijska rješenja i zajednički razvoj turbine, generatora pare i električnoga generatora. Također je potrebno istražiti parametre pare i principijelnu strukturu energetskog postrojenja. Zbog porasta cijene goriva, a radi povećanja korisnosti, postoji tendencija povećanja veličina stanja pare na ulazu u turbinu.

U zemljama s perspektivom razvoja nuklearne energetike oslabio je interes za povećanje snaga klasičnih turbina visokih ulaznih veličina stanja na osnovi principijelno novih tehničkih rješenja. Te su zemlje razvoj usmjerile na povećanje snaga turbina sa zasićenom parom za nuklearne elektrane. U posljednje je doba nastao zastoj u povećanju jediničnih snaga i u klasičnim i u nuklearnim elektranama zbog mišljenja da se povećanjem snage smanjuje raspoloživost bloka. Iako je povećanje jedinične snage turbina moguće, ekonomska svrsishodnost takvih postrojenja još nije dokazana.

Kondenzacijske turbine s reguliranim oduzimanjem pare nose se u početku naziv industrijske turbine, jer su pojedine industrijske pogone opskrbljivale, osim električnom energijom, i tehnološkom parom različitih tlakova i određenih temperatura potrebnih za provođenje industrijskih procesa. Iako u mnogim jedinicama i danas rade u industrijskim pogonima, postupno su prerasle u toplanske turbine, koje opskrbljuju središnju gradsku mrežu toplom vodom, zagrijanom toplinom oduzete pare pri tlaku od ~2,5 bar, a često istodobno i industrijskom parom oduzetom turbini na tlaku od 1...4 MPa. U skandinavskim zemljama, zemljama bivšeg SSSR i zemljama istočne Europe, djelomice zbog dugog razdoblja niskih temperatura i zbog centraliziranog gospodarenja energijom, izgrađeno je mnogo toplana s turbinama snage do 250 MW, pa i 300 MW. Dakako da je paru za grijanje moguće oduzeti i od turbina nuklearnih elektrana, no kako su one iz sigurnosnih razloga udaljene od naseljenih područja, provođenje tople vode do potrošača nije ekonomično. U SAD, unatoč vodećem mjestu u Carterovu programu štednje energije izdanom povodom naftne krize 1973. godine, kogeneracija (zajednička proizvodnja električne i toplinske energije) nije doživjela širu primjenu. Kogeneracija se šire primjenjuje samo u industrijskim pogonima, ali uz obvezan otkup viška proizvedene električne energije od poduzeća za opskrbu električnom energijom.

Protutlačne turbine pretvaraju u mehanički rad samo dio toplinskog pada dobavljene pare, s prekidom ekspanzije pare pri određenom tlaku, a izlazna para kondenzira u grijalici, opskrbljujući parom najčešće industrijske potrošače. Masa, a i cijena tih turbina iznose samo do trećine mase i cijene kondenzacijskih turbina jednake nazivne snage, jer one nemaju glomazni, teški i skupi niskotlačni dio turbine i kondenzator.

U određenim razdobljima razvoja parne su se turbine intenzivno upotrebljavale za brodski pogon, a i danas se upotrebljavaju za pogon velikih tankera i putničkih brodova, te uopće brzih brodova s pogonskim postrojenjima snage veće od 20 MW. Isto se tako nekada važan pogon pamoturbinskih ratnih brodova sada primjenjuje samo na brodove velike istisnine, bilo s klasičnim bilo s nuklearnim pogonom.

**Plinske turbine.** Taj su tip energetskog postrojenja u ranijim razdobljima razvoja entuzijasti smatrali sposobnim da ozbiljno potisne, pa čak i eliminira, mnogo teži, glomazniji i intermitentnim djelovanjem opterećen motor s unutrašnjim izgaranjem, ali se nije vjerovalo da bi u području opskrbe električnom energijom mogao ozbiljnije ugroziti pamoturbinsko postrojenje većih i velikih jediničnih snaga.

Razvoj i primjena plinskih turbina mogu se razmatrati u četiri područja. To su zrakoplovna propulzija, pogon vozila, pogon brodova i primjena u termoelektranama.

Prve su se upotrebljive konstrukcije plinskih turbina pojavile iz dva, po koncepciji bitno različita smjera: jedne su bile vezane na iskustvo graditelja parnih turbina, predviđene za veliki broj (do 100 000) pogonskih radnih sati i upotrebu teških goriva, a druge su bile potaknute željom za pronalaženjem zamjene za do maksimuma usavršen i najsuvremenijom tehnologijom građen zrakoplovni klipni motor, sve radi povećanja brzine i nosivosti letjelica.

**Zrakoplovna propulzija.** Primjena propulzijskog mlaznog motora pogonjenog plinskom turbinom omogućila je let bez pro-

pelera, a time i prekoračenje granice brzine od 700 km/h, pri kojoj je nedjelotvoran rad propelera poništavao učinak daljeg povećanja snage klipnog motora.

Takvom se koncepcijom gradnje odustalo od dugog radnog vijeka i uz upotrebu kerozina svele mogućnosti na samo nekoliko tisuća sati rada, nakon čega su se morali mijenjati toplinski vrlo opterećeni dijelovi komora za izgaranje i strujnog aparata turbine. Danas je ta koncepcija gradnje plinskih turbina ipak sasvim potisnula nastojanja da se suvremena plinska turbina razvije na temelju tehnologije gradnje parnih turbina.

Dominacija plinskih turbina u zračnom je prometu praktički apsolutna (v. *Pogonski sistemi letjelica*, TE10, str. 533) i klipnom je motoru ostalo samo područje pogona malih i sportskih zrakoplova, gdje su dovoljne male brzine leta i male snage.

Često se čak i cijeli motori, i pošto su odslužili svoj vijek u pogonu zrakoplova i kad više ne zadovoljavaju strogim uvjetima velike pouzdanosti, katkad uz ograničenu obnovu, upotrebljavaju za pogon stacionarnih turbina električnih centrala srednjeg vijeka trajanja od 10 000...60 000 pogonskih radnih sati.

**Pogon vozila.** Od svih očekivanih uspjeha najmanji je prodor u proteklih pedeset godina intenzivnog razvoja plinskih turbina učinjen u području pogonskih uređaja za automobile, kamione, lokomotive i ostala vozila.

Za pogon *automobila* plinska se turbina čini idealnom zbog najvećeg zakretnog momenta pri maloj brzini vrtnje, što bi uklonilo nužnost zamornog mijenjanja brzina pri prilagođavanju uvjetima vožnje. Posebno je povoljan mali broj pogonskih sati koje trebaju izdržati automobilski motori putničkih vozila. Manji je i broj dijelova i bitno manje trenje prema onome koje svladavati motor s unutrašnjim izgaranjem, a zanemariv je i potrošak mazivog ulja. Osnovni je nedostatak povećana potrošnja, doduše jeftinijeg, goriva.

Osnovne konstrukcije plinskih turbina za automobile imaju najčešće radijalni kompresor i radijalnu turbinu. Međutim, snaga i najvećih pokretača putničkih automobila nedovoljna je da se pokaže potpuna prednost tog pogonskog stroja, pa je uz neke sporadične komercijalne pokušaje i mnoga eksperimentalna rješenja pojedinih proizvođača očekivani prodor u tom području izostao.

Povećani potrošak goriva mogao bi se kompenzirati malim rotacijskim izmjenjivačem topline rekuperativnog tipa, no to bi povećalo cijenu automobilskog plinskoturbinskog agregata. Međutim, cijena bilo kojeg proizvoda ovisi i o veličini serije koju prihvaća tržište, a ta je za bilo koji tip automobilskog klipnog motora tolika da bi i s najuspješnijim plinskoturbinskim rješenjem mogla biti dostignuta tek nakon mnogo godina uspješne prodaje novog tipa automobila. Plinske se turbine ugrađuju tek u najveće tipove kamiona sa snagom motora većom od 220 kW te u vojna vozila (npr. tenkovi).

**Lokomotive** sa snagama od 2...6 MW moraju imati pogonski uređaj za dugi vijek trajanja, što smanjuje mogućnost primjene visokih temperatura, a time se smanjuje i ekonomičnost te vrste pogona. Zbog učestalih potreba za kretanjem lokomotive naprijed-natrag, s elektromotorima za pogon kotača koji se godinama upotrebljavaju u dizelsko-električnim lokomotivama, plinska turbina u lokomotivi pokreće električni generator. Taj se pogon upotrebljava u SAD i bivšem SSSR sa zadovoljavajućim uspjehom.

U transportu se upotreba vozila pogonjenih plinskom turbinom djelomice afirmirala, i to tamo gdje je bilo moguće provesti koncentraciju vozila na unaprijed određenim pravcima s velikim opsegom prometa, npr. na Pacifičkoj željeznici za vuču vlakova mase i do 5 000 t s turbinama General Electric od 6 MW. Na europskim maksimalno elektrificiranim željeznicama primjena plinskoturbinskih lokomotiva ne dolazi u obzir.

Pogon *trgovačkih i ratnih brodova* drugo je područje prodora plinskih turbina, gdje se očekivala skokovita zamjena sporohodnih brodskih Diesellovih motora, pa i parnih turbina, već pred više od 50 godina. Izbacivanje pomalo zastarjelog sporohodnog motora nastalog modifikacijom stapnog parnog stroja bio je cilj mnogih konstruktora.

Prvi put je plinska turbina ugrađena na Shellov eksperimentalni tanker *Aoris* korisne nosivosti 21 000 t, pogonjen s 4 brzohodna dizelsko-električna istosmjerna agregata od po 750 kW, s tim da je jedan uklonjen i na njegovo mjesto ugrađen jači plinsko-

turbinski agregat s električnim dinamom snage 900 kW. Eksperimentalni je brod 1951. preplivao jednom Atlantski ocean pogonjen samo plinskom turbinom, koja je inače bila u pogonu samo u razdobljima nužnog razvijanja pune snage. Osnovni je nedostatak takva rješenja bila velika razlika u brzini vrtnje između plinske turbine i srednjohodnih Diesellovih motora te brodskog vijka, koja se premostila ugradnjom električnog prijenosa. Nakon kraće plovidbe demontirana je čitava pogonska oprema i ugrađena brodska plinska turbina od ~2575 kW s hidrauličnim prijenosom.

Za razliku od Diesellova motora, gdje je u četverotaktnoj izvedbi dovoljno pomakom položaja skupine ekscentričnih podizača ventila, a u dvotaktnim motorima upuštanjem komprimiranog zraka u cilindar u kojem stap još nije dostigao gornju mrtvu točku uputiti motor u suprotni smjer vrtnje i u manje od jedne minute razviti punu snagu krmom, plinske se turbine ne mogu pokretati u suprotnom smjeru, a zbog vrlo velikih gubitaka zbog trenja i ventilacije ugradnja posebne turbine za vožnju krmom kao u parnim brodskim turbinama nije moguća.

Već na prvom probnoj vožnji novog postrojenja, toga puta s hidrauličnom spojkom, prilikom prvog prekreta slomio se skupljeni prekretni uređaj. Brod *Aoris* primjer je da usprkos ogromnim ulozima sredstvima volunтарыstički pristup u gradnji plinskih turbina, tj. prema načinu gradnje prvih parnih turbina ili motora s unutrašnjim izgaranjem, nije mogao imati uspjeha.

Na brod *John Sergeant* tipa Liberty od 10000 t nosivosti ugrađena je turbina General Electric od 4500 kW s jednostavnim otvorenim ciklusom s regeneracijom. Radilo se o osuvremenjenju parnog pogona ugradnjom neke druge vrste pogona u isti prostor, uz dakako bitno veću snagu postrojenja i povećanje brzine s 10 na 15 milja na sat sa što manjim utroškom što jeftinijeg goriva. Prijenos snage bio je mehanički, a prekrat sa, u tom području snage, suvremenim propelerom sa zakretnim lopaticama. Jednostupanj-ska turbina visokog tlaka pogonila je kompresor visokog tlaka, a jednostupanj-ska turbina niskog tlaka propeler preko dvostupanj-skog reduktora. Termodinamička je korisnost bila ~0,25, uz nominalnu korisnost otpadne topline ispušnih plinova od 80% i uz upotrebu srednje teškog goriva. Za start je služila parna turbina od ~500 kW i pomoćni parni kotao upotrebljavan u vožnji i za zagrijavanje goriva, a parna je turbina mogla poslužiti za pogon broda i u slučaju kvara na glavnom postrojenju s plinskom turbinom. Ostalih nekoliko stotina brodova predviđenih za pregradnju nikada nije bilo pregrađeno.

U bivšem SSSR od 1961. do 1966. u eksploataciju je godišnje pušten po jedan teretni brod tipa Vinogradov s plinskom turbinom od 3000 kW i 5800 t nosivosti, a 1967. i brod *Pariška komuna* od 16000 t nosivosti s plinskom turbinom od 7500 kW.

Prvi iz komercijalnog razdoblja primjene brodskog plinskoturbinskog pogona u SAD, koje počinje 1967. godine, bio je brod za prijevoz tereta na kotačima *Admiral William Chalagan*, osposobljen za prijevoz teških vojnih vozila. Brod je imao dva generatora plina od po 18500 kW, izvedena od mlaznog motora Pratt and Whitney JT 4 koji je služio za pogon putničkih motora Boeing 707 i DC 8. Plinovi iz generatora plina idu u slobodnu dvostupanj-sku turbinu. Brod razvija brzinu od 25 milja na sat.

Od 1971. do 1973. u eksploataciju ulazi serija od četiri broda tipa *Euroliner* građena u Velikoj Britaniji za prijevoz kontejnera s 28000 t nosivosti i s plinskoturbinskim pogonom sa sličnim postrojenjem (Part and Whitney JT 75) generatora plina i ekspanzijske turbine od 2 × 22000 kW, s brzinom od 26 milja na sat.

Činilo se da je epoha plinskoturbinskih brodova započela, posebno s gradnjom tankera *Shevron Oregon*, puštenog u eksploataciju 1975. godine, s najavom gradnje još pet brodova istog tipa do 1977. godine. To su tankeri od 35000 t nosivosti, s turbinama General Electric i s električnim prijenosom. Tu su i brodovi za rastresiti teret *Iron Duke* i *Iron Monarh* od 15000 t nosivosti i s već oprobanim turbinama General Electric od 14000 kW. Najavljena je i dalja gradnja brodova za rastresiti teret za istog naručitelja iz Australije, zatim norveškog tankera *Lucian* za prijevoz ukapljenog prirodnog plina s 14700 t nosivosti, te šest brodova gornjih tipova i jednog trajekta u Finskoj s turbinama od 2 × 27000 kW, sve do 1977. godine. No naftna kriza s naglim porastom cijena nafte pomela je preko noći sva skupo plaćena, sofisticirana usavršavanja brodskih plinskoturbinskih postrojenja. U tom je raz-

doblju Diesellov motor, prelaskom na teška goriva i uvođenjem nabijanja cilindra pomoću turbopuhala pogonjenih plinskim turbinama na ispušne plinove, zadržao svoju prednost zbog bitno manjeg potroška goriva, a istodobno smanjio svoju specifičnu težinu i uz sve poznate nedostatke (velik potrošak ulja, stalno čišćenje i zamjena dijelova) eliminirao ideju o upotrebi plinske turbine za pogon brodova trgovačke mornarice, ili je bar odložio za neko buduće vrijeme, uz neka još neotkrivena rješenja.

No, istodobno, u pogonu ratnih brodova plinska turbina postaje vrlo važna, i to za pogon korveta, torpiljarki, razarača, pa i krstarica. Ratni brod vozi samo 3% vremena sa snagom većom od 40% najveće ugrađene snage pogonskog stroja, pa se parnoturbinsko postrojenje s glomaznim kotlovima i pomoćnom opremom ostalo vrijeme samo beskorisno vozi i svojom težinom degradira pozitivne karakteristike ratnog broda.

Idealna rješenja nametnula su se upotrebom plinskih turbina, zapravo uvjetima na moru tek malo prilagođenih mlaznih motora, gdje se uz navedene proizvođače javljaju engleski Rolls Royce i ruski proizvođači. Englezi i Rusi prvi uvelike prelaze na manje raketne jedinice povećane vatrene moći, na kojima nema mjesta za glomazna parnoturbinska postrojenja, i grade različite kombinirane sustave s Diesellovim motorom, parnoturbinskim pogonom ili plinskoturbinskim pogonom.

Danas je najčešći kombinirani sustav s Diesellovim motorom i plinskoturbinskim pogonom, gdje za pretežni dio radnih sati i manevar služe lagani brzohodni motori sa snagom potrebnom za postizanje brzine krstarenja, a za dvostruko veću brzinu, odnosno za nju potrebnu 8 puta veću snagu, pale se plinskoturbinski generatori plina i pokreću slobodne turbine. Mrtvi teret, pa i ukupno postrojenje, nekoliko je puta manje od parnoturbinskog postrojenja, a bitno se poboljšanje sastoji u tome što se puna snaga plinskih turbina može razviti u nuždi za dvije minute, a s parnoturbinskim pogonom tek za 30 minuta.

Sustav s Diesellovim motorom i s plinskoturbinskim pogonom omogućuje istodobnu upotrebu 7/8 snage iz plinskih turbina i 1/8 snage iz Diesellovih motora, pa se čini boljim od prije opisanog sustava, gdje u trenutku najveće upotrebe snage Diesellovi motori stoje. Zbog malog broja potrebnih sati rada mogu se povećati maksimalne temperature na ulazu u turbinu, a time i specifična snaga, pa su stoga cijela engleska flota i flota bivšeg SSSR prešle na jedan od dva opisana pogonska sustava, dok se novi nosači zrakoplova u SAD i po koja krstarica grade na nuklearni parni pogon.

U pogonu ratnih brodova već je krajem 70-ih godina plinska turbina prilagođena uvjetima na moru doživjela potpunu supremaciju i bila ugrađena na brodove 17 zemalja, npr. u bivšem SSSR na 166 brodova s više od 5000 MW, u Velikoj Britaniji na 40 brodova s više od 1350 MW i u SAD na 182 broda s 1500 MW.

U uvjetima plovidbe s najvećom snagom, koji povremeno vladaju u ratnoj mornarici, osnovne prednosti plinske turbine, a to su jednostavnost, mala specifična težina, odnosno velika specifična snaga, mali broj pogonskih sati s mogućnosti primjene visokih temperatura izgaranja, a prije svega brzi start i brzo postizanje najveće snage, te sigurnost u pogonu i jednostavnost održavanja ili brza zamjena čitave jedinice, umnogu su nadmašile veliki potrošak goriva kroz mali broj pogonskih sati kao osnovni nedostatak. Do danas se upotrebom novih materijala, poboljšanim hlađenjem visokotemperaturno opterećenih dijelova, a odatle i daljim povećanjem temperatura izgaranja taj nedostatak sve više smanjivao.

U *stacionarnom pogonu* plinska turbina nije ugrožavala pri-mat parnoturbinskog pogona u prvom redu stoga, što se za parnoturbinsko postrojenje kao pogonsko gorivo dobrim dijelom upotrebljavao ugljen. Pokušalo se i s plinskom turbinom s pogonom na ugljenu prašinu, ali, iako je postrojenje radilo u eksperimentalnom uređaju tvornice General Electric, već nakon pedeset sati rada čitav je prostor statorskih i rotorskih kanala bio doslovce začepljen troskom, pa pokusi nikad više nisu bili nastavljeni.

Plinska turbina može, posebno pri nižim maksimalnim temperaturama i uz primjenu aditiva, izgarati i najteža goriva, pa su prva rješenja težila ka gradnji turbina koje bi i do 100000 sati, tj. kroz dugi vijek trajanja, radile u okviru javnih mreža za opskrbu električnom energijom i u industrijskom pogonu zbog tada malih i srednjih jediničnih potrebnih snaga. Iako takav pristup, danas

dakako na bitno višoj razini, neki proizvođači nisu napustili, vijek trajanja ipak se ograničava na 60 000 sati rada.

U težnji ka što savršenijim karakteristikama strujnog aparata primjenom visokih temperatura na ulazu u turbinu i prikladnim povećanjem stupnja kompresije dobiva se povoljnija termodinamička korisnost, čemu se može težiti i usložnjavanjem toplinske sheme postrojenja ugradnjom izmjenjivača topline, hlađenjem zraka pri kompresiji i međuizgaranjem. Usložnjavanje toplinske sheme uzrokuje povećanje specifične težine s obzirom na nominalnu snagu postrojenja, a time i povećanje cijene agregata te umanjuje osnovne prednosti plinske turbine: sposobnost brzog starta iz hladnog stanja, veliku pouzdanost u pogonu te male troškove održavanja. Bitna prednost plinskoturbinškog postrojenja, posebno jednostavnih shema, jest i mali broj posade, pa i mogućnost potpuno automatiziranog rada.

Prva komercijalno upotrebljiva plinska turbina proradila je 1939. u električnoj centrali u Neuchatelu u Švicarskoj (tvrtka Brown Boveri). Predviđena je za rad i u ratnim prilikama u podzemnoj električnoj centrali u granitnoj stijeni sa snagom od 4 000 kW po najjednostavnijem otvorenom ciklusu bez izmjenjivača topline, s danas nevjerojatno niskom temperaturom plinova izgaranja na ulazu u turbinu od samo 550 °C, uz stupanj kompresije od 4,38 i s toplinskom iskoristivosti od 18%. Ipak, parne su turbine toga vremena jedva dostizale temperature od 475 °C, pa je temperatura od 550 °C za tadašnje materijale bila rekordna.

Potom se u Švicarskoj grade plinskoturbinške elektrane dugog vijeka trajanja tipa Sulzer od 15 MW i Brown Boveri s agregatima od 13 i 27 MW, s otvorenim ciklusom i s najvećim mogućim izmjenjivačem topline. Plinskoturbinško postrojenje zatvorenog ciklusa tvrtke Escher Wyss izgrađeno je u Saint Denis kraj Pariza. Te su turbine u pedesetim godinama smatrane vrhunskim uspjehom u gradnji stacionarnih strojeva s ulaznim temperaturama od 600 i 650 °C. Godine 1951. sve stacionarne turbine u svijetu jedva su prelazile ukupnu instaliranu snagu od 100 MW. Već u sljedećih 15 godina, do 1965. godine, instalirana snaga postrojenja s plinskim turbinama iznosi više od 1 100 MW.

U javnoj mreži za opskrbu električnom energijom plinske turbine čine i do 16% instalirane snage, no one proizvode malu količinu električne energije. Zbog velikog potroška goriva jednostavne plinske turbine otvorenog ciklusa rade kratko, npr. u SAD u prosjeku samo 500 sati godišnje ako je gorivo plin, a 1 000 sati godišnje s lakim dizelskim gorivom, za tu namjenu posebne čistoće. Takvi agregati služe za pokrivanje vršnih opterećenja, zbog brzog starta iz hladnog stanja istodobno su i hladna, ali po funkciji i topla rezerva, a često djeluju brže ili mogu poslužiti i za smanjivanje potrebne rotirajuće rezerve velikih parnoturbinških agregata.

Jedan dio proizvodnje plinskih turbina služi za tzv. mehanički pogon, tj. one pokreću s preostalom razvijenom snagom, umjesto električnog generatora, industrijske rotacijske kompresore na kompresorskim stanicama uzduž kilometrima dugačkih plinovoda radi svladavanja otpora strujanju plina uz izgaranje malog dijela komprimiranog plina. Već 1952. General Electric je imao u pogonu pedesetak takvih postrojenja s ~230 000 sati rada, što je bilo dovoljno iskustvo za rad i na drugim tipovima turbina. Danas su glavni korisnici plinskih turbina tog tipa kemijska i petrokemijska, metalna i prehrambena industrija, gdje turbine služe za pogon velikih kompresora za zrak, amonijak, ugljični dioksid i druge plinove.

U zadnjih 25 godina počela su se primjenjivati i kombinirana plinska i parna turbinška postrojenja. Tome je više razloga. Jednostavna plinska turbina ispušta izlazne plinove s temperaturama i do 600 °C. I uz vrlo visoke temperature na ulazu u turbinu, koje iznose do 980 °C bez hlađenja te i do 1 100 °C uz jače hlađenje, zbog velikih gubitaka topline sadržane u ispušnim plinovima suvremene će turbine teško dosegnuti granicu od 28·29%-tnog iskorištenja pogonskog agregata bez upotrebe međuizgaranja i izmjenjivača topline. Ugradnjom izmjenjivača topline, u kojem bi izlazni plinovi izgaranja grijali komprimirani zrak za izgaranje pred ulazom u komoru za izgaranje, omogućilo bi se postizanje toplinske iskoristivosti od 32·34% uz znatno povećanje agregata i probleme s čišćenjem i pregaranjem vrlo velikih izmjenjivačkih površina zbog lošeg prijelaza topline s plinova izgaranja

na cijev i s cijevi na zrak. Gubitci su zbog otpora strujanju zraka i plinova izgaranja u izmjenjivaču znatni. Oni povećavaju rad kompresora, a smanjuju rad turbine, pa se jedan dio uštede na gorivu zbog zagrijavanja zraka na ulazu u komoru za izgaranje gubi zbog nužno povećanog dodatka goriva za razvijanje potrebne snage. Stoga, kako se željelo postići bolju toplinsku iskoristivost, nametnula se potreba ugradnje kotla na ispušne plinove za zagrijavanje vode i proizvodnju pare, da bi se bitno poboljšao prijelaz topline s plinova izgaranja na cijev i vodu ili paru te da bi se toplina odvodila na približno okolišnoj temperaturi u kondenzatoru u ciklusu uključene parne turbine. Tako se danas može toplinska korisnost kombiniranog plinskog i parnog turbinškog postrojenja poboljšati do rekordne granice od ~58% s plinskom turbinom s dvostrukim međuizgaranjem, koja, kad radi sama, postiže korisnost od 37% s temperaturom ispuha od 610 °C. Podatci se odnose na turbinu GT 124 Asea-Brown Boveri, s plinskim gorivom i snagom od 165 MW iz plinske turbine, a s ukupnom snagom od 251 MW.

Dakako, postoje i manja postrojenja koja se često dograđuju na postojeće stare parne turbine u elektranama koje su zatvaranjem pripadnih nerentabilnih rudnika ugljena ostale bez prijašnjeg goriva, no te turbine manjih snaga rade tada pretežno za pokrivanje međuvršnih opterećenja s ~2 000 sati godišnje uz manju toplinsku korisnost. Poslije starta parnoturbinški dio i uz klizno povećanje tlaka u kotlu na ispušne plinove treba barem pola sata da postigne najveću snagu.

Najveća se snaga postrojenja može postići povećanjem broja plinskih turbina na 2, 3 ili 4 plinskoturbinška agregata uz jednu parnu turbinu. Tako se npr. uz parnu turbinu od 335 MW ugrađuju i 4 plinske turbine, sveukupno 634 MW. Toplinska korisnost dosadašnjih postrojenja ovisi o njihovoj veličini i iznosi od 45% za kombinirana postrojenja male snage (14 MW plinska i 4,6 MW parna turbina) do gore navedene rekordne korisnosti, no obično rijetko prelaze korisnost od 50%.

Velika se očekivanja polažu u generatore plina u kojima bi se ekološki prihvatljivo rasplinjavao ugljen i druga kruta goriva, pri čemu bi plin izgarao u komorama plinskih turbina kombiniranih postrojenja. Međutim, za sada se nije stiglo dalje od probnog postrojenja.

Sve veće količine prirodnog plina kao ekološki najčistijeg energenta, uz njegovu povoljnu cijenu, temelj su predviđenom naglom širenju plinskih turbina u području stacionarne upotrebe.

LIT.: Г. С. Журицкий, В. А. Струнин, Конструкция и расчет на прочность деталей паровых и газовых турбин. Машиностроение, Москва 1968. – H. Cohen, G. F. C. Rogers, H. I. H. Saravanamuttoo, Gas Turbine Theory. Longman, London 1972. – S. L. Dixon, Fluid Mechanics, Thermodynamics of Turbomachinery. Pergamon Press, Oxford–New York–Toronto–Sydney 1975. – A. В. Шейлаев, Паровые турбины – Теория термодинамического процесса и конструкции турбин. Энергия, Москва 1976. – K. J. Müller, Thermische Strömungsmaschinen, Auslegung und Berechnung. Springer-Verlag, Wien–New York 1978. – В. И. Зайцев, Л. Л. Грушай, А. А. Мусеев, Судовые паровые и газовые турбины. Транспорт, Москва 1981. – R. K. Turton, Principles of Turbomachinery. E. & F. N. Spon, London–New York 1984. – T. D. Eastop, A. McConkey, Applied Thermodynamics for Engineering Technologists. Longman, Hong Kong 1986. – A. Kastyuk, V. Frolov, Steam and Gas Turbines. Mir Publishers, Moscow 1988. – А. Д. Трухний, Стационарные паровые турбины. Энергоатомиздат, Москва 1990.

Z. Guzović M. Majcen

**TURBINA, VJETRENA**, stroj u kojem se kinetička energija vjetra pretvara u mehanički rad, u vrtnju rotora s profiliranim lopaticama, što omogućuje rad električnih generatora, crpki, mlina i sl. I vjetrenjača je vjetrena turbina, a tako se nazivaju uglavnom starije turbine jednostavnije konstrukcije.

Vjetar je obnovljiv i čist energetski izvor, i jedan je od prvih energetskih izvora koji je čovjek počeo iskorištavati. Prve vjetrenjače za pogon mlina upotrebljavale su se u Starom Egiptu, Mezopotamiji, Perziji i Kini. Oblici tih jednostavnih vjetrenjača s vertikalnom osovinom još se mogu naći u Iranu (sl. 1). U Hamurabijevim zapisima (←XVII. st.) ima podataka o natapanju polja pomoću naprava pokretanih vjetrenjačama. U VII. st., za vrijeme kalifa Omara I, upotrebljavale su se vjetrenjače za pogon mlina i crpki na čitavu Bliskom istoku. Nakon križarskih ratova počele su se u Europi graditi vjetrenjače s horizontalnom osovinom. Najstarija poznata vjetrenjača u Engleskoj sagrađena je 1191. Prva vjetrenjača za po-