

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 plinskoturbinog 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 plinskoturbinke 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. Plinskoturbinke postrojenje zatvorenog ciklusa tvrtke Escher Wyss izgrađeno je u Saint Denisu 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 paroturbinških 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 turbinska 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 goriva 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 turbinskog 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 paroturbinški 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 plinskoturbinke agregata uz jednu parnu turbinu. Tako se npr. uz paru 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.

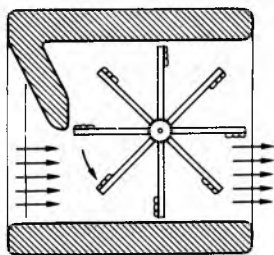
LIT.: Г. С. Журицкий, В. А. Струнин, Конструкция и расчет на прочность деталей паровых и газовых турбин. Машиностроение, Москва 1968. – H. Cohen, G. F. C. Rogers, H. I. H. Saravanamuttoo, Gas Turbine Theory. Longman, London 1972. – S. L. Dixon, Fluid Mechanics, Thermodynamics of Turbomachinery. Pergamon 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-

gon mlina sagrađena je u Nizozemskoj 1439. Otad se gradi sve više vjetrojenjača (sl. 2). U XIX. st. bilo je u Europi ~100 000 vjetrojenjača s promjerom lopatičnog kola do 25 m i snage do 30 kW koje su se upotrebljavale za pogon mlina i crpki.



Sl. 1. Staroperzijska mlinska vjetrojenjača



Sl. 2. Tradicionalna europska vjetrojenjača

U SAD razvio se poseban tip vjetrove turbine s više lopatica, prikladan za crpljenje vode iz bunara. Od 1880. do 1930. sagrađeno je više od 6,5 milijuna takvih turbina. U Danskoj je 1930. počelo iskorištavanje vjetra za proizvodnju električne energije; gradile su se vjetrove turbine snage 5...25 kW. U SAD je prva takva turbina sagrađena u saveznoj državi Ohio. S lopaticama dugim 21 m mogla je pri brzini vjetra od ~30 km/h proizvoditi struju snage 100 kW.

U prvoj trećini XX. st. usavršene su turbinske lopatice, pa se grade vjetrove turbine većih snaga i bolje korisnosti. To su, međutim, većinom bili samo eksperimentalni strojevi. Električna energija proizvedena u postrojenjima s vjetrenim turbinama nije bila konkurentna električnoj energiji proizvedenoj izgaranjem fosilnih goriva, pa nije bilo većeg zanimanja ni za razvoj ni za gradnju elektrana s vjetrenim turbinama. Povećano se zanimanje pojavljuje tek nakon naglog poskupljenja nafte 1973. i 1979. godine, pa se istražuju, projektiraju i grade postrojenja s vjetrenim turbinama malih, srednjih i velikih snaga. U tome prednjače razvijene zemlje s vjetrovitim obalama.

OSNOVNE ZNAČAJKE VJETRA

Vjetrom se naziva prirodno strujanje zraka. Vjetar je određen smjerom i brzinom. Brzina se vjetra mjeri anemometrom, a smjer se određuje vjetruljom. Anemograf mjeri i upisuje brzinu i smjer vjetra.

Zrak struji iz područja višega u područje nižeg tlaka, u smjeru gradijenta tlaka. Razlike tlaka zraka nastaju zbog nejednolike razdiobe toplinske energije u atmosferi. Osim toga, zbog rotacije Zemlje na čestice zraka djeluje i Coriolisova sila, koja ih na sjevernoj Zemljinoj polukugli skreće udesno, a na južnoj ulijevo. Kad su Coriolisova i gradijentna sila u ravnoteži, vjetar se naziva *geostrofičnim*. Ako se čestice zraka gibaju po zakrivljenoj putanji, pojavljuje se i centrifugalna sila. Nasuprot smjeru strujanja na čestice zraka djeluju i sile trenja, i to između tla i zračnog omotača te između samih čestica zraka.

U meteorologiji se pod vjetrom, u užem smislu, razumijeva horizontalno strujanje zraka. Energija strujanja vjetra procjenjuje se na $\sim 3,8 \cdot 10^{16}$ kWh godišnje, odnosno $\sim 2,5\%$ od dozračene energije Sunčeva zračenja. Strujanje zraka ovisi, između ostalog, o trenju zraka s podlogom u najdonjem sloju. Djelovanje se trenja smanjuje s porastom visine, pa na visini 500...1500 m, već prema svojstvima podloge, strujanje zraka poprima značajke geostrofičnog vjetra.

Iskustvo pokazuje da se tijekom dana i noći, a također tijekom godine, mijenjaju smjer i brzina vjetra. Velika planetarna strujanja zraka nazivaju se općom cirkulacijom i ona upravljaju središtima ciklona i anticiklona. Unutar područja sniženog tlaka (ciklona) u nas nastaju bure i jugo, koji mogu dosegnuti i olujnu brzinu. Tijekom premještanja ciklone smjenjuju se vjetrovi različitih smjerova i brzina, već prema reljefu, intenzivnosti i brzini premještanja ciklone. Za vrijeme anticiklone obično pušu slabi vjetrovi promjenljiva smjera. Iznimka je pojava jake bure kad se anticiklona nalazi istočnog dijela europskog kopna, a ciklona na području Sredozemlja. *Bura* je mahovit (*katabatičan*) vjetar velike brzine koji puše iz sjeveroistočnog kvadranta. Na Jadranu

se bura pojavljuje uzduž cijele obale i tijekom cijele godine, ali je češća u sjevernom dijelu, posebno zimi (osobito kod Senja).

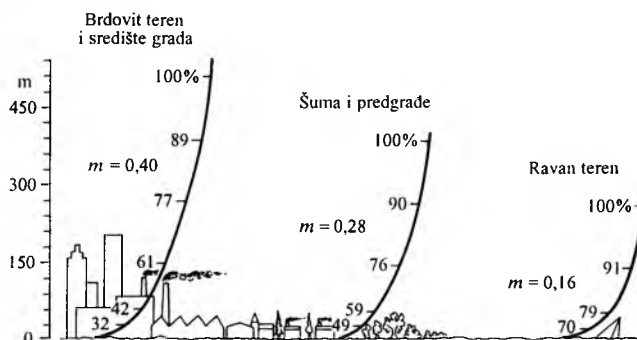
Za iskorištavanje vjetrove energije važni su vjetrovi srednjih brzina koji se češće pojavljuju. To su obično lokalni vjetrovi, kao npr. *burin* i *smorac* na jadranskoj obali, odnosno *gornjak* i *donjak* u planinskim predjelima. Prva dva vjetra nastaju zbog nejednake zagrijanosti kopna i mora tijekom dana i noći, a druga dva nastaju zbog zagrijavanja planinskih obronaka tijekom dana i njihova hlađenja tijekom noći. Za postrojenja s vjetrenim turbinama opasni su kratkotrajni udari vjetra koji se pojavljuju pri prolasku gmljavinskih oblaka s pljuskovima i hladnih fronta unutar ciklone.

Pri pojačanom nastrujavanju zraka na zapreku nastaju vrtlozi s velikim oscilacijama smjera i brzine vjetra, pa valja posebno paziti na izbor mjesta za postrojenja s vjetrenim turbinama.

Osnovna je značajka vjetra njegova brzina, koja se mijenja u prostoru i vremenu, a definira se kao horizontalni vektor. Iako su odnosi između toplinskog stanja atmosfere i značajki tla vrlo složeni, može se općenito prihvatiti da brzina vjetra raste s porastom visine prema izrazu

$$v_{z_2} = v_{z_1} \left(\frac{z_2}{z_1} \right)^m, \quad (1)$$

gdje su v_{z_1} i v_{z_2} brzine vjetra na visinama z_1 i z_2 , a m eksponent koji ovisi o svojstvima tla. Za orijentacijske proračune eksponent m ima vrijednost 0,16 za ravno tlo, 0,28 za šumu i gradsko predgrađe, a 0,40 za brdovito tlo i gradsko središte, pa vjetar iznad tih područja postiže svoj puni profil brzina (najveću brzinu, 100%) na različitim visinama (sl. 3).



Sl. 3. Profil brzina vjetra iznad različitih područja; m eksponent u jednadžbi (1)

Mjerenje brzine vjetra. Poznavanje energetske značajke vjetra moguće je samo na temelju statističkih podataka koji se dobivaju dugogodišnjim sustavnim mjerenjima.

Brzina se vjetra normalno mjeri na visini 10 m iznad tla ili se rezultati mjerenja svode na tu visinu. Da se dobiju prosječne vrijednosti, mjerenje traje od 10 minuta do jednog sata. Vrijednosti se za brzinu i smjer vjetra obično određuju analogno, pa se iz krivulja dobivaju prosječne vrijednosti. Istraživanja su pokazala da se prava slika o energetske potencijalu vjetra može dobiti statističkom obradom 10-minutnih ili najdulje jednosatnih prosječnih brzina vjetra. Računanjem s prosječnim vrijednostima kroz dulje razdoblje izbacile bi se iz računa mnoge velike vrijednosti brzina, a one najviše pridonose energetske potencijalu vjetra. Snaga je vjetra, naime, razmjerna trećoj potenciji njegove brzine što slijedi iz relacije

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho q_v v^2, \quad (2)$$

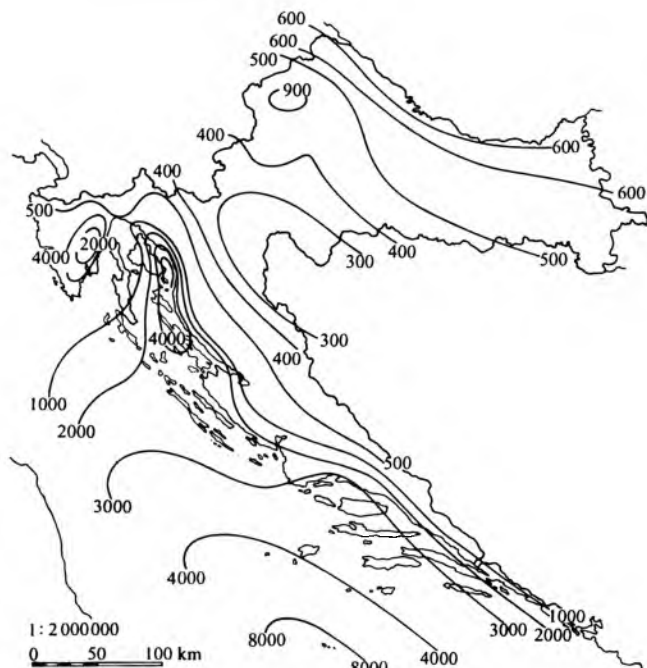
gdje je ρ gustoća zraka, q_v obujamni protok zraka, a v brzina vjetra. Ako se stavi da je $q_v = A v$, gdje je A površina kruga koji opisuju lopatice vjetrove turbine, dobiva se

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho A v^3. \quad (3)$$

Iz više prosječnih vrijednosti brzina vjetra mogu se odrediti krivulje trajanja pojedinih brzina za mjesec, sezonu ili godinu. Iz

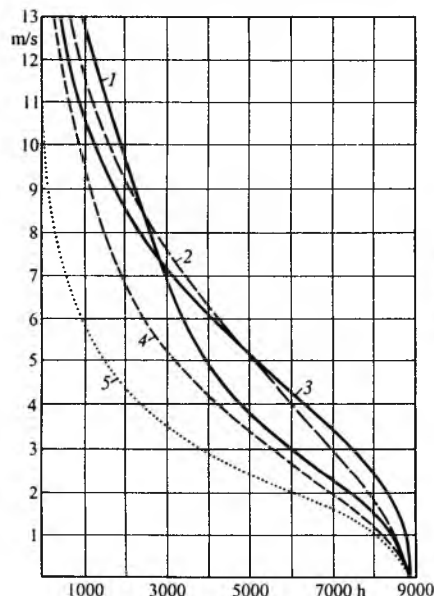
tih se krivulja određuju krivulje vjerojatnosti pojave brzina vjetra pomoću različitih funkcija razdiobe. Te krivulje vjerojatnosti pojave brzina vjetra osnovni su pokazatelji vjetrovitosti na određenom području i služe ne samo za proračun vjetrove energije, nego i za procjenu očekivanih ekstremnih brzina.

Raspored vjetrova. Veće se brzine vjetrova pojavljuju u blizini obala, dok se u unutrašnjosti kontinenta obično nalaze područja slabije vjetrovitosti. Velike brzine vjetra iznad morske površine uvelike se smanjuju na kopnu zbog neravnina tla. Pregled vjetrovitosti u Europi pokazuje da se na zapadnim obalama kontinenta pojavljuju jaki vjetrovi. Glavni je smjer strujanja zapad-istok, pa se na obalama Sredozemnog i Baltičkog mora u zavjetrini pojavljuju vjetrovi mnogo manjih prosječnih godišnjih brzina. Može se općenito reći da su u svim europskim zemljama koje imaju dugu atlantsku obalu mogućnosti za iskorištavanje vjetrove energije povoljne.



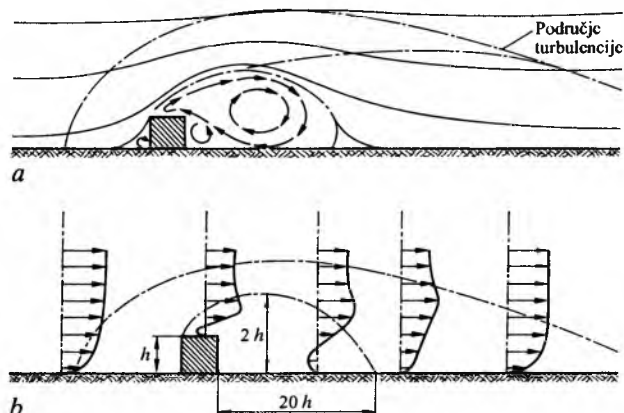
Sl. 4. Prosječni energijski tok vjetra (kWh/m^2) u Hrvatskoj na visini od 50 m (D. Poje i B. Cividini)

Prema krivuljama na slikama 4 i 5 vidi se da je čitava hrvatska obala s otocima povoljna za iskorištavanje vjetrove energije. Najveći potencijal imaju područja Senja, Palagruže i Lastova. Povoljne su prilike i na nekim planinama.



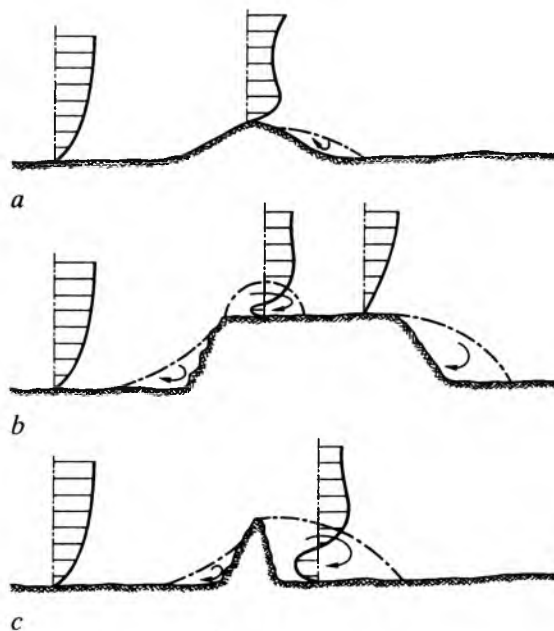
Sl. 5. Krivulje prosječnoga godišnjeg trajanja vjetra uz hrvatsku obalu na visini od 10 m (D. Poje i B. Cividini). 1 Senj, 2 Palagruža, 3 Lastovo, 4 Split, 5 Pula

Strujanje vjetra preko zapreka. Vjetrove turbine obično imaju rotor u graničnom sloju koji se stvara zbog hrapavosti okoliša. Utjecaj smetnji zbog zapreka ovisi o omjeru promjera rotora i visine na kojoj se nalazi turbinska osovina. Zapreke na tlu i njegove neravnine mogu imati i pozitivne i negativne utjecaje.



Sl. 6. Strujanje (a) i profili brzina vjetra (b) iznad zgrade s ravnim krovom

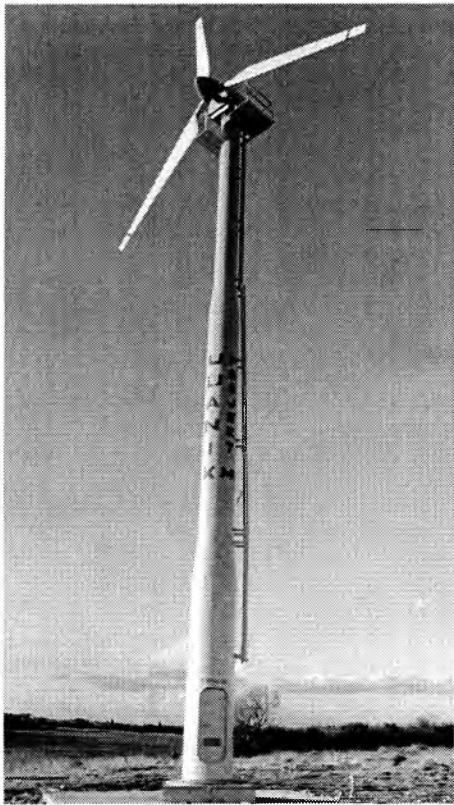
Da zapreke ne bi utjecale na djelotvornost vjetrove turbine, potrebno je da vrh donje rotorske lopaticice bude na visini tri puta većoj od visine zapreke. Posebnu pozornost treba obratiti na strujanje zraka oko većih građevina (sl. 6). Strujanje se može poboljšati ako su prirodne uzvisine zemljišta pogodno profilirane. Brzina se vjetra preko vrha zaobljena brda povećava u prvom redu zbog koncentracije strujanja zračne mase u donjim slojevima (sl. 7a). Prekine li se struja zraka zbog naglog otklona (rubovi stijena, strmi obronak i sl.), navrh će se brda neznatno povećati brzina vjetra uz veliko vrtloženje (sl. 7b), koja će nastati i u zavjetrini (sl. 7c).



Sl. 7. Profili brzina vjetra za različite presjeka uzvisina

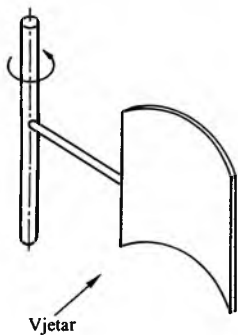
VRSTE I PRINCIP RADA VJETRENIH TURBINA

Vjetrove turbine se smatraju u prvom redu one kojima je rotor na otvorenom prostoru i na koje vjetar puše prirodno i slobodno (sl. 8). One imaju jedan od dva pogonska principa: otpornički ili uzgonski princip, a konstrukcijski se razlikuju turbine s vertikalnom i one s horizontalnom osovinom.



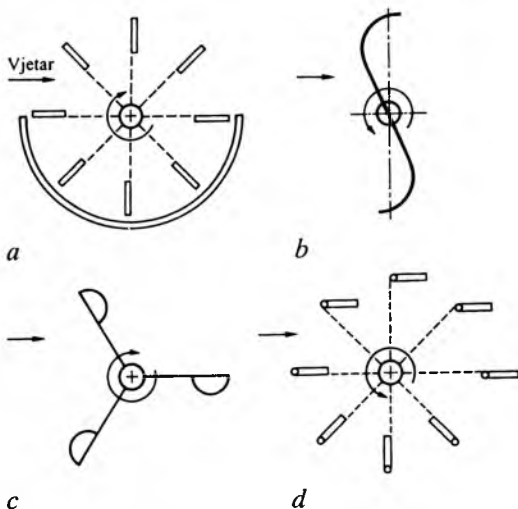
Sl. 8. Suvremena vjetrena turbina, proizvod Uljanika iz Pule

Vjetrene turbine s vertikalnom osovinom. To su većinom otporničke turbine, tj. na plohe rotora djeluje sila nastala strujanjem zraka (sl. 9). Ako rotorske plohe nisu posebno oblikovane, ro-



Sl. 9. Princip rada otporničke vjetrene turbine s vertikalnom osovinom

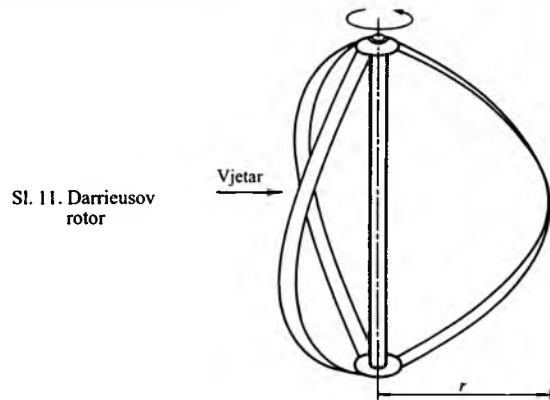
tacija se ostvaruje samo ako se polovica rotora, tj. područje gibanja ploha protiv vjetra, ogradi zaštitnim zidom (sl. 10 a). Ako



Sl. 10. Rotori otporničkih vjerenih turbina s vertikalnom osovinom (pogled odozgo)

su plohe polukružnog oblika (sl. 10 b i c), može se i bez ograđivanja polovice ploha postići pozitivan zakretni moment. Sličan se učinak dobiva upotrebom prijeklopnih zaklopaka (sl. 10 d). Maksimalna je korisnost otporničkih postrojenja malena, tek trećina vrijednosti uzgonskih postrojenja. Takve su turbine razmjerno jeftine, a prikladne su kad su potrebni veliki zakretni momenti i male snage. Mnogo se upotrebljavaju rotori Savoniusova tipa (sl. 10 b) za pogon vagonskih ventilatora i kao lopatični mjerni anemometri.

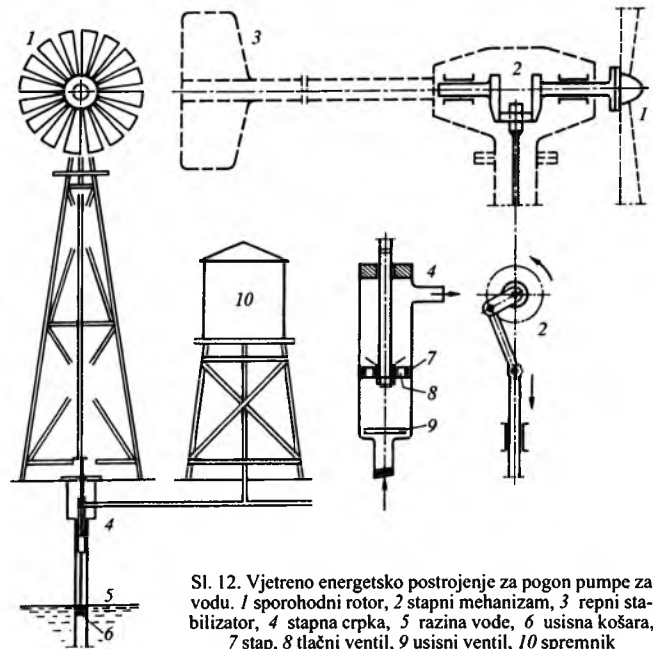
U novije se vrijeme intenzivno istražuje *Darrieusov rotor* (sl. 11) sa zakrivljenim profiliranim krilima koja dobivaju horizontalni zakretni moment na temelju uzgona. Takav rotor ne može sâm postići pogonsku brzinu vrtnje, pa je za pokretanje potreban pomoćni uređaj. Međutim, kako su malena ulaganja, a korisnost velika, Darrieusov rotor ozbiljno konkurrira turbinama s horizontalnom osovinom. Njegove su prednosti: neovisnost o smjeru vjetra, jednostavna konstrukcija krila, te položaj prijenosnika i generatora u blizini tla. Ima i nedostataka: nešto složeniji vertikalni noseći stup, teškoće u regulaciji brzine vrtnje i lošiji profili krila.



Sl. 11. Darrieusov rotor

Vjetrene turbine s horizontalnom osovinom. To su najbrojnije vjetrene turbine. Sve do XX. st. gradile su se samo kao otporničke turbine s rotorskim lopaticama postavljenim koso na smjer vjetra. Na rešetkaste lopatice od greda i letvica razvlačilo se manje ili više jedrenog platna, već prema brzini vjetra. Obično su imale 4-6 lopatica, a rijetko više od osam. Poslije se spoznalo da se veća korisnost može postići uzdužnim izvijanjem lopatica.

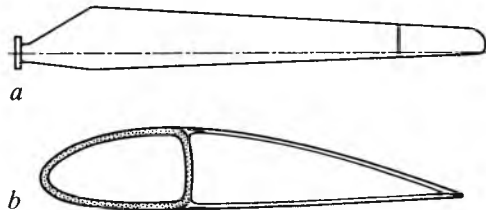
Poslije su se razvili rotori s mnogo lopatica koje su bile od savijena lima, čvrsto ugrađene, jednostavne i jeftine. Takvi su rotori sporohodni (male brzine vrtnje), ali imaju velik zakretni moment i pri malim brzinama vjetra, pa su vrlo prikladni za pogon stepnih pumpa, npr. za crpljenje vode (sl. 12). Rotor se pomoću



Sl. 12. Vjetreno energetska postrojenje za pogon pumpe za vodu. 1 sporohodni rotor, 2 stepni mehanizam, 3 repni stabilizator, 4 stepna crpka, 5 razina vode, 6 usisna košara, 7 stap, 8 tlačni ventil, 9 usisni ventil, 10 spremnik

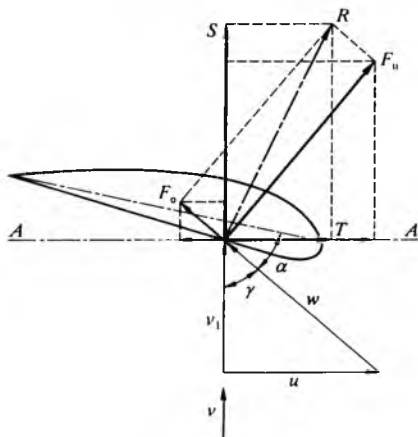
repnog stabilizatora uvijek postavlja okomito na smjer vjetra. Sve se sile i momenti kojima su opterećene lopatice takva rotora prenose nesmanjeno na turbinsku osovinu i na noseći stup. Da bi se to smanjilo, u većim su postrojenjima lopatice elastično povezane s rotorom.

U novije su se doba počele vjetrene turbine upotrebljavati za pogon električnih generatora, odnosno za proizvodnju električne energije. Za to, međutim, nisu pogodni otpornički i sporohodni rotori. Zbog toga su se razvile brzohodne vjetrene turbine s aerodinamički profiliranim lopicama (sl. 13), koje rade na uzgonskom principu. Iako su takve turbine skuplje i složenije, one danas prevladavaju jer im je korisnost mnogo veća.



Sl. 13. Trapezni oblik standardne aerodinamički profilirane lopatice (a) i presjek lopatice od polimernog materijala (b)

Aerodinamički proračun. Ako na aerodinamički profil lopatice dostrujava zrak, ta će struja zraka djelovati aerodinamičkom silom (v. *Aerodinamička sila i moment*, TE 1, str. 10) koja je



Sl. 14. Djelovanje sila na aerodinamički profiliranu lopaticu kad na nju struji zrak. A-A ravnina rotora okomita na smjer vjetra (osovina rotora leži na pravcu koji se poklapa sa smjerom vjetra)

rezultanta aerodinamičkog uzgona F_u okomitog na pravac strujanja i otpora F_o u smjeru strujanja (sl. 14).

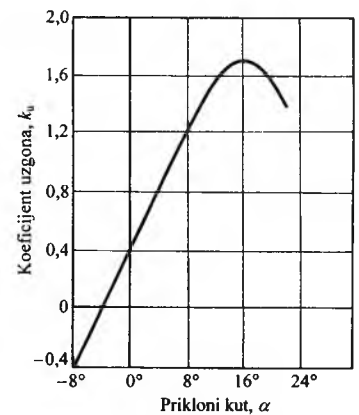
Uzgon iznosi

$$F_u = \frac{1}{2} \rho k_u w^2 A_p, \quad (4)$$

dok je otpor

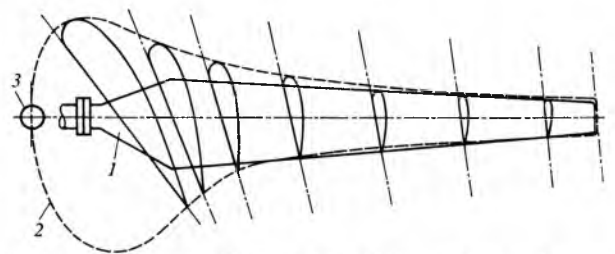
$$F_o = \frac{1}{2} \rho k_o w^2 A_p, \quad (5)$$

gdje je k_u koeficijent uzgona, k_o koeficijent otpora, w rezultantna brzina dostrujavanja zraka, a A_p površina najveće projekcije lopatice. Koeficijenti k_u i k_o bezdimenzijske su veličine koje ovise o profilu lopatice i o kutu α s obzirom na pravac strujanja (sl. 15). Rezultantna brzina dostrujavanja w na određeni profil lopatice dobiva se kao vektorska razlika lokalne obodne brzine u i stvarne brzine zraka v_1 na istom mjestu, koja je uvijek manja od nesmetane brzine vjetra v (sl. 14). U optimalnim prilikama ona iznosi dvije trećine od nesmetane brzine v i ne mijenja se uzduž lopatice. Obodna je brzina razmjerna polumjeru r i kutnoj brzini, $u = r\omega$, pa se s porastom polumjera povećava lokalna obodna brzina. Zbog toga se, uz promjenu smjera, povećava i rezultantna



Sl. 15. Ovisnost koeficijenta uzgona k_u o priklonom kutu α

brzina dostrujavanja. Zbog promjene smjera dostrujavanja uzduž lopatice potrebno je da lopatica bude izvijena (sl. 16), kako bi zrak dostrujavao na lopaticu pod najpovoljnijim kutom α po čitavoj njoj duljini.



Sl. 16. Stvarni, trapezni oblik (1) i teorijski oblik (2) izvijene lopatice, 3 osovina

Aerodinamička sila može se rastaviti na tangencijalnu komponentu:

$$T = F_u \cos \gamma - F_o \sin \gamma \quad (6)$$

i na aksijalnu

$$S = F_u \sin \gamma + F_o \cos \gamma. \quad (7)$$

Tangencijalna komponenta stvara korisni zakretni moment koji se prenosi na osovinu turbine, dok aksijalnu komponentu preuzima noseći stup.

Omjer uzgona i otpora, nazvan finesom profila ili koeficijentom klizanja, za neke je profile vrlo povoljan i iznosi $100 \cdots 130$, što znači da se otpor u nekim proračunima može i zanemariti. Tada tangencijalna i aksijalna sila iznose

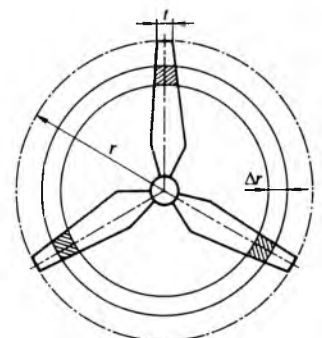
$$T = F_u \cos \gamma, \quad (8)$$

$$S = F_u \sin \gamma, \quad (9)$$

pa je

$$\tan \gamma = \frac{S}{T} = \frac{u}{v_1} = \lambda_e, \quad (10)$$

što je *efektivna brzohodnost* na elementu lopatice.



Sl. 17. Karakteristične dimenzije jednog dijela lopatice

Budući da se uzgon i otpor mijenjaju uzduž lopatice, treba ih promatrati odvojeno po pojedinim lokalnim elementima površine lopatice (sl. 17):

$$F'_u = \frac{1}{2} \rho k_u w^2 A', \quad (11)$$

$$F'_o = \frac{1}{2} \rho k_o w^2 A', \quad (12)$$

gdje je A' površina lokalnog elementa ($A' = t \Delta r$).

Tangencijalna će sila na element lopatice iznositi

$$T' = F'_u \cos \gamma' - F'_o \sin \gamma, \quad (13)$$

pa će ona na elementu lopatice s krakom r dati zakretni moment:

$$M' = T' r, \quad (14)$$

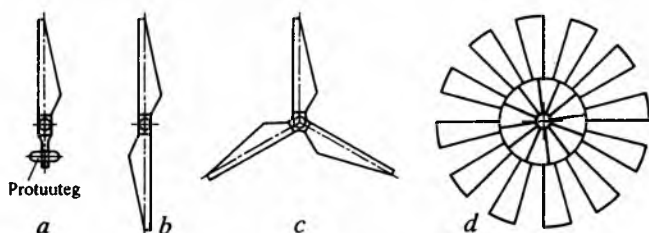
a ukupni se moment dobiva zbrajanjem momenata svih elemenata lopatice. Jednako tako, da bi se dobila ukupna sila na lopaticu, valja zbrojiti sile na sve njezine elemente.

Duljina Δr elementa lopatice (sl. 17) uzima se u skladu s lokalnom širinom lopatice, a ona se određuje prema broju lopatica i uvjetu za optimalno smanjenje brzine strujanja. Za z lopaticâ lokalna će širina biti

$$t = \frac{2r\pi}{z} \frac{8}{9k_u} \frac{w^2}{uv_1}. \quad (15)$$

Širina se lopatice može smanjiti ako se poveća broj lopatica ili koeficijent k_u . Rotori veće brzohodnosti imaju uže lopatice, a najčešće se upotrebljava trapezni oblik lopatice.

Efektivna brzohodnost na elementu lopatice znatno utječe na korisnost. Ako je vrijednost $\tan \gamma$ velika, kao npr. u rotorâ s dvije lopatice, mora i koeficijent klizanja biti velik. Zbog toga se *brzohodni rotori* izrađuju s manje lopatica i s tanjim profilima koji imaju velik koeficijent klizanja. S druge strane, *sporohodni rotori* imaju više lopatica koje ne moraju imati visokovrijedne aerodinamičke profile (sl. 18).



Sl. 18. Rotori vjetrovne turbine s horizontalnom osovinom. a, b, c brzohodni rotori, d sporohodni rotor

Snaga vjetrovne turbine. Snaga vjetra određuje se izrazom (3). Ta bi se snaga u turbini postigla kad bi nakon prolaska kroz turbinu strujanje zraka potpuno prestalo, što je nemoguće jer bi tada prestalo i dostrujavanje zraka turbini zbog izjednačenja tlakova ispred i iza turbine. Prema tome, zrak koji struji k turbini brzinom v mora se odvoditi brzinom v_2 koja je manja od brzine v jer se iskoristava dio kinetičke energije strujanja. Za iskoristivu snagu vjetra može se postaviti izraz

$$P_i = \frac{1}{2} \rho A \frac{v + v_2}{2} (v^2 - v_2^2), \quad (16)$$

gdje je $(v + v_2)/2$ prosječna brzina kojom zrak struji kroz rotor. Diferencijalnim izrazom (16) i (3) dobiva se

$$\frac{P_i}{P_0} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{v_2}{v} \right) \left[1 - \left(\frac{v_2}{v} \right)^2 \right]. \quad (17)$$

Diferenciranjem omjera P_i/P_0 po omjeru v_2/v dobiva se da je vrijednost omjera P_i/P_0 maksimalna kad je $v_2/v = 1/3$. Uvrštenjem u izraz (17) dobiva se da je

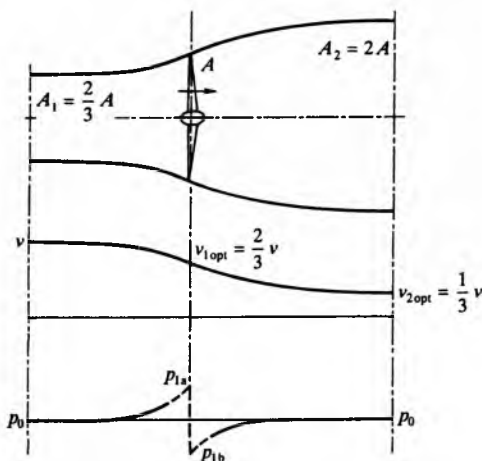
$$P_i = \frac{16}{27} P_0 = 0,593 P_0. \quad (18)$$

To znači da se od vjetrovne energije može maksimalno iskoristiti 59,3%. Ako se u izrazu (3) površina kruga izrazi promjerom d , a

za prosječnu se gustoću zraka uvrsti $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$, izraz (18) za iskoristivu snagu vjetra (u vatima) glasi

$$P_i = 0,29 d^2 v^3. \quad (19)$$

Idealizirani protok zraka kroz rotor turbine s horizontalnom osovinom prikazan je na slici 19. Vanjske strujnice zbog zapreka u zoni rotora skreću prema rubovima. One zaobilaze rotor i ne sudjeluju u energetskej pretvorbi. Zbog malih brzina vjetra, koje se pojavljuju u normalnim uvjetima, može se smatrati da zračna struja nije kompresibilna, pa smjerovi strujanja divergiraju pri prolazanju kroz rotor. Računa se da brzina strujanja izvan graničnih strujnica ostaje stalna. To vrijedi i za tlak na određenoj udaljenosti ispred i iza rotorskih lopatica. Tlak se zraka u ravnini rotora skokovito mijenja, da bi se zatim opet izjednačio s tlakom okoliša.



Sl. 19. Dijagrami strujnica, brzina i tlakova za idealizirani protok zraka kroz rotor turbine s horizontalnom osovinom; A površina pripadnog kruga

Najveći gubici nastaju zbog otpora profila lopatica, vrtloženja što ga rotor stvara u zračnoj struji i gubitaka u prijenosu snage. Snaga na osovini vjetrovne turbine (u vatima) može se odrediti iz izraza

$$P_e = 0,29 d^2 v^3 \eta_l, \quad (20)$$

gdje je η_l korisnost lopatica.

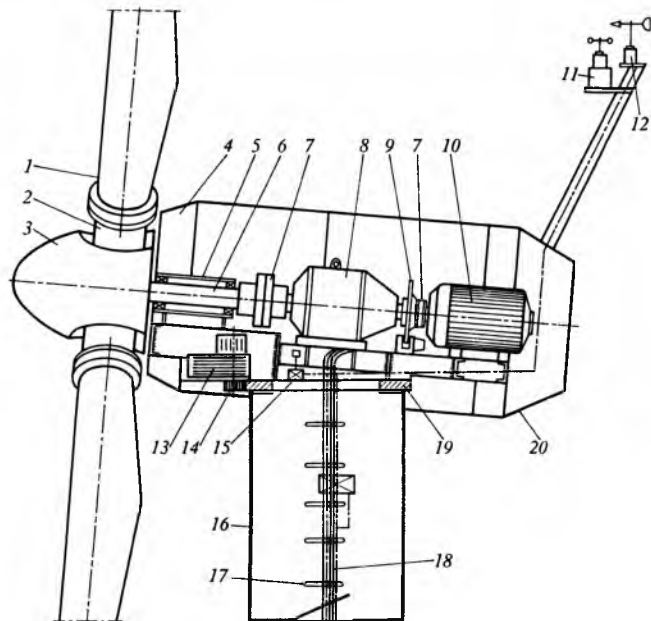
Tablica 1 sadrži podatke o približnim snagama nekih vjetrovne turbine s korisnošću lopatica od 0,714.

Tablica 1
SNAGE VJETRENIH TURBINA (kW) UZ KORISNOST
LOPATICA $\eta_l = 0,714$

Promjer rotora m	Brzina vjetra m/s		
	10	12	15
1	0,20	0,35	0,68
1,5	0,46	0,79	1,55
2	0,81	1,40	2,73
3	1,84	3,18	6,21
4	3,26	5,63	11,0
6	7,33	12,7	24,7
8	13,0	22,5	43,9
10	20,4	35,3	68,9
15	45,8	79,1	155
20	81,5	141	275
30	183	316	618
40	326	563	1100
60	733	1267	2474
80	1304	2253	4401
100	2037	3520	6875

KONSTRUKCIJA VJETRENE TURBINE

Vjetrena turbina srednje snage s horizontalnom osovinom sastoji se od rotora s lopaticama i gondole, a nalazi se na nosećem stupu (sl. 20). Na vrhu je stupa noseći ležaj s vanjskim ozubljenjem, a na njemu okvir s gondolom koja se okreće prema smjeru strujanja vjetra.



Sl. 20. Konstruktivni elementi suvremene vjetrene turbine srednje snage s horizontalnom osovinom. 1 rotorske lopatice, 2 glavina rotora, 3 profilirani naglavak, 4 poklopac oplošja gondole, 5 kućište glavnih ležaja, 6 glavna sporohodna osovina, 7 elastična sigurnosna spojka, 8 multiplikator brzine vrtnje, 9 hidraulična disk-kočnica, 10 električni generator, 11 mjerilo brzine vjetra, 12 osjetnik pravca vjetra, 13 elektromotor i pužni reduktor, 14 zupčanik zakretnog uređaja, 15 kontrola vibracija, 16 noseći stup, 17 unutrašnje stube, 18 kabeli, 19 ležaj sa zupčanikom, 20 oplošje gondole

Gondola (kućište) ima aerodinamički oblik, a sastoji se od čeličnog okvira i oplošja koje se može rastaviti za ugradnju i pregled. Prednji je kraj osovine obično izdignut od horizontale za $5 \dots 6^\circ$. Taj je nagib potreban da bi se povećao razmak između lopatica i stupa, te smanjila udaljenost ovjesišta rotora od osi ležaja. Povećanjem udaljenosti između lopatica i stupa smanjuje se istodobno djelovanje vjetra na lopatice i stup, koje uzrokuje gubitke energije i povećava neugodno dinamičko opterećenje stupa i lopatica. Svrha je smanjenja udaljenosti ovjesišta od osi ležaja da se smanje momenti sila na rotor koji nastoje zakrenuti sklop oko vertikalne osi stupa, što negativno utječe na orijentaciju rotora.

Rotorske lopatice. Donedavno su se upotrebljavale lopatice od drva i od lameliranog drva, a i sada se često upotrebljavaju za turbine manjih snaga. Na lopaticama od aluminijskih slitina opažen je umor materijala, pa izgleda da one nisu pogodne za siguran dugotrajni pogon. Čelik se mnogo upotrebljava za izradbu lopatica jer se lako obrađuje. Potrebna je samo kvalitetna antikorozijska zaštita, pogotovo za postrojenja u blizini morske obale. Velika težina i povećane smetnje televizijskog prijama u okolini turbine nedostaci su čeličnih lopatica. Danas se za lopatice sve više upotrebljavaju ojačani polimerni materijali. Oni su dovoljno čvrsti, a i otporni su na umor i koroziju. Krutost se postiže pogodnom konstrukcijom, vrstom vlakana i materijala. Kad se proizvode male serije, takve su lopatice skuplje od čeličnih jer su potrebni složeni kalupi, ali su za veće serije lopatice od polimernih materijala jeftinije od čeličnih.

Orijentacija rotora. Vjetrena turbina s horizontalnom osovinom mora imati uređaj za postavljanje rotorske plohe okomito na smjer vjetra, koji može biti pasivan i aktivan. U pasivnom se uređaju rotor zakreće djelovanjem aerodinamičkih sila vjetra na repni stabilizator smješten niz vjetar, na rotor turbine postavljen u zavjetrini ili na pilotnu turbinu smještenu bočno. U aktivnom se uređaju rotorska ploha zakreće pomoću elektromotora.

Rotor se turbine, s obzirom na smjer vjetra, može postaviti ispred stupa (uz vjetar) i iza stupa (niz vjetar). Ako je rotor ispred

stupa, vjetar najprije nstrujava na lopatično kolo turbine, a zatim na stup. Tako se bolje iskorištava vjetrena energija i manji su dinamički udari pri prolasku lopatice iza stup. Za takvo postrojenje manje snage upotrebljava se *repni stabilizator*, vertikalno zračno kormilo u obliku ploče. Prigušivanje zakretanja nije potrebno, jer zakretani momenti nisu veliki zbog malih masa. Ako se turbinski rotor nalazi u zavjetrini stupa, natražno djelovanje može biti dovoljno veliko da se održava stabilan smjer. Pritom se pretpostavlja da je osovina rotora okomita na os zakretanja i da je rotorska glavina kruta.

Za veća se postrojenja preporučuje mehaničko upravljanje pomoću male *pilotne turbine* gonjene vjetrom. Ona je ugrađena bočno i njezino je lopatično kolo okomito na kolo glavnog rotora. Pilotna turbina reagira na svaku promjenu smjera vjetra. Budući da je bočno kolo sporohodno, zakretni će moment biti dovoljno snažan i pri malim brzinama vjetra. Ako je prijenosni omjer 1 : 1000 do 1 : 2000, bit će zakretanje vrlo polagano, tj. pri brzim promjenama smjera zbog turbulencije ravnina rotora neće previše oscilirati.

Potpuno samostalan zakretni uređaj pogodan je zbog svoje pouzdanosti, ali mu treba poseban izvor energije. Ako vjetrena elektrana radi paralelno s električnom mrežom, rotor se zakreće u smjer vjetra pomoću elektromotora. To je danas standardna izvedba s osjetnikom smjera i regulatorom te s velikim prijenosnim omjerom reduktora (1 : 1000). Brzina zakretanja rotora iznosi $30 \dots 45^\circ$ u minuti. Ako reduktor nema samokočenja (kao pužni pogon), potrebna je posebna kočnica.

Prijenosnici snage. Brzina vrtnje rotora vjetrene turbine određuje se prema izrazu

$$n = \frac{v\lambda}{2r\pi}, \quad (21)$$

gdje je $\lambda = u_r/v$ opći koeficijent brzohodnosti, tj. omjer obodne brzine vrška lopatice u_r i brzine vjetra v , a r polumjer rotora (tabl. 2). Za veće je snage potreban veći polumjer rotora, što smanjuje brzinu vrtnje. Zbog toga je između rotora i generatora potrebno ugraditi prijenosnik snage, odnosno multiplikator brzine vrtnje. Mogućnost da se brzina vrtnje poveća većom brzohodnošću uglavnom je već iskorištena; danas se grade rotori s velikim koeficijentom brzohodnosti, pa je skoro dostignuta gornja granica. Najčešće se upotrebljavaju prijenosnici sa zupčanicima, a prevladavaju planetarni ili višestupanjski prijenosnici s kosim zupcima. Za turbine malih snaga ponekad se upotrebljava jeftiniji prijenos lancem ili remenjem (klinastim i zupčastim). Ima pokušaja da se upotrijebi hidraulički prijenos kako bi se omogućila kontinuirana regulacija brzine vrtnje. Taj prijenos nije prihvaćen zbog visokih troškova, slabije korisnosti i manje sigurnosti.

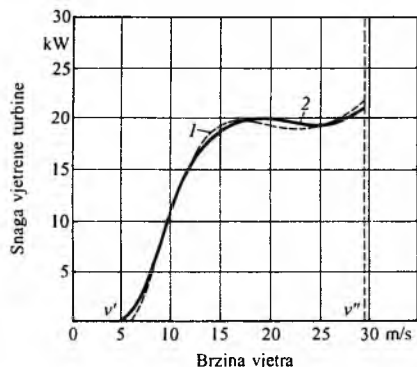
Tablica 2

OVISNOST BRZINE VRTNJE (min^{-1}) VJETRENE TURBINE O KOEFICIJENTU BRZOHODNOSTI I PROMJERU ROTORA UZ BRZINU VJETRA 10 m/s

Koeficijent brzohodnosti	Promjer rotora m							
	2	4	6	10	20	40	60	100
1	95,5	47,7	31,8	19,1				
2	191	95,5	63,7	38,2	19,1			
4	382	191	127	76,4	38,2	19,1	12,7	
6	573	286	191	115	57,3	28,6	19,1	11,5
8	764	382	255	153	76,4	38,2	25,5	15,3
10	955	477	318	191	95,5	47,7	31,8	19,1

Regulacija snage. Zbog promjene brzine vjetra vjetrene turbine moraju imati kvalitetan mehanizam za regulaciju i upravljanje da bi se brzina vrtnje i snaga turbine, odnosno generatora, regulirala i ograničila pri jakom vjetru. Snaga turbine povećava se s trećom potencijom brzine vjetra do određene granice, zatim se malo smanjuje, pa se opet lagano povećava (sl. 21). Takvo ponašanje turbine u području velikih brzina vjetra nastaje zbog promjene trokuta brzina na lopatici. Zbog toga se smanjuju aerodinamičke sile i snaga turbine. To je smanjenje snage neka vrsta samoregulacije turbine i vrlo je važno prilikom pobjega turbine. Pogonsko se područje turbine nalazi između brzina vjetra v'

i v'' . Kad se postigne brzina vjetra v'' , pogon se postrojenja obustavlja zbog opasnosti od preopterećenja elemenata postrojenja.

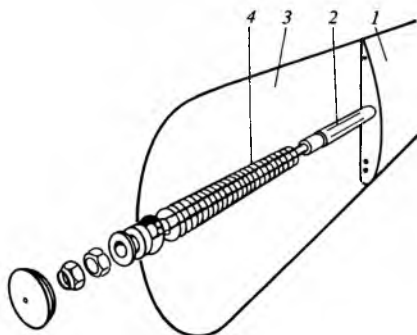


Sl. 21. Ovisnost snage vjetrene turbine o brzini vjetra; krivulja dobivena mjerenjem (1) i računski (2)

Spojeni maksimumi krivulja ovisnosti snage turbine o brzini vjetra i brzini vrtnje rotora određuju kutnu brzinu rotora s kojom se, uz određenu brzinu vjetra, ostvaruje najveća korisnost. Snagu turbine potrebno je ograničiti do nazivne snage generatora za brzine vjetra uz koje je snaga turbine veća od nazivne snage generatora, a to je zadatak regulacijskog sustava. Vjetrene se turbine obično projektiraju tako da se nazivna snaga postigne pri razmjerno malenim, ali češćim brzinama vjetra. Za to je potreban uređaj za zaštitu generatora od preopterećenja pri većim brzinama vjetra.

Snaga se turbina može regulirati zakretanjem cijele lopatice ili jednog njezina dijela. Za zakretanje cijele lopatice postoje dva načina. Jednom se lopatica zakreće u smjer vjetra, pa se smanjenjem napadnog kuta smanjuju sile koje nastaju zbog strujanja zraka. Takva se regulacija često upotrebljava zbog svoje osjetljivosti i malog opterećenja lopatica. Druga je mogućnost toliko povećanje napadnog kuta da se zračna struja odvoji od dijela lopatice. Nedostatak je takve regulacije povećanje opterećenja lopatice, jer povremeno odvajanje zračne struje uzrokuje jake udare.

Regulacija snage zakretanja jednog dijela lopatice ostvaruje se pomoću vršnog krilca (tzv. spojlera, sl. 22), koje djeluje kao zračna kočnica. Kad se brzina vrtnje toliko poveća da centrifugalna sila nadjača oprugu, krilce se izvlači i istodobno se po žlijebu lopatične osovine zakreće, najviše do 90° . Kad se smanji brzina vrtnje, krilce se samo vraća u normalan položaj.



Sl. 22. Zakretanje vršnog krilca. 1 lopatica, 2 osovina, 3 vršno krilce, 4 tlačna opruga

Rotori velike brzohodnosti teško se pokreću pri slabom vjetru. Njihovo se pokretanje može olakšati samo zakretanjem lopatica u povoljniji položaj s obzirom na napadni kut uz koji se može proizvesti dovoljan zakretni moment i uz slab vjetar. S porastom brzine vjetra i brzine vrtnje mora se napadni kut mijenjati u skladu s promjenom strujanja dok se ne postigne optimalni kut za područje pogonskih brzina vjetra.

Ako je generator vjetrene elektrane namijenjen za punjenje akumulatora, regulacija snage razmjerno je jednostavna. Ako se, međutim, upotrebljava sinkroni generator, regulacija je složena i skupa jer se mora održavati konstantna brzina vrtnje.

Zaštita, sigurnost i nedostaci. Sustav zaštite mora kontrolirati sve parametre važne za normalan rad vjetrene turbine: brzinu vjetra, brzinu vrtnje rotora, opterećenje generatora, temperaturu ulja za ležaju, tlak ulja u kočnici i vibracije postrojenja.

Kad se premaše dopuštene granične vrijednosti, aktivira se sustav kočenja i rad se turbine usporuje, odnosno obustavlja. Da bi se povećala sigurnost, ugrađuje se nekoliko paralelnih sustava kočenja i zaštite: mehaničke kočnice na osovini, zračne kočnice na lopaticama, zakretanje rotorskih lopatica i skretanje rotora s pravca vjetra.

Način obustave pogona i sprečavanje pobjega turbine ovisi o snazi turbine. Primarna se zaštita turbine veće snage ostvaruje zakretanjem lopatica, a tako se ujedno regulira i snaga, dok mehanička kočnica ima sekundarnu zaustavnu funkciju. Turbina srednje snage ima mehaničku kočnicu kao osnovnu, a zračnu kočnicu kao pomoćnu zaštitu od pobjega pri većim brzinama vjetra. Turbine malih snaga često imaju sustav za skretanje rotora s pravca vjetra, a rijetko i skupu mehaničku kočnicu.

Zračna kočnica služi kao rezervna zaštita, a djeluje kad zataji mehanička kočnica. Ona ograničuje brzinu vrtnje, kako je to već opisano i za regulaciju snage, zakretanjem vršnog krilca lopatice (spojlera).

Otklanjanje osovine rotora od smjera vjetra utječe na vjetrenu energiju koja se predaje rotoru, jer se smanjuje površina nastrujavanja zraka i tako ostvaruje potrebna zaštita. Takva je zaštita moguća samo u manjih postrojenja, jer velika postrojenja imaju razmjerno velik moment tromosti koji onemogućuje dovoljno brzo djelovanje.

Većina zaštitnih sustava vjetrorenih turbina radi na principu samokočenja, pa oni automatski djeluju kad se prekorači vrijednost veličine na koju je zaštitni uređaj osjetljiv.

I pored svih zaštitnih uređaja mogu se oštetiti i polomiti dijelovi postrojenja (noseći stup, lopatice, zupčanici i dr.). Osobito bi bilo opasno da se otkine lopatica pri maksimalnoj brzini vrtnje kad sa stupom zatvara kut od $\sim 45^\circ$. Proračuni za vjetrenu turbinu promjera 40 m pokazuju da najveća udaljenost na koju bi mogla pasti otkinuta lopatica iznosi ~ 165 m. U SAD i Švedskoj smatraju da i za velika postrojenja s vjetrorenim turbinama polumjer zone zabranjene za stanovanje ne bi trebao biti veći od 200 m. Suvremene se vjetrene turbine tako projektiraju da izdrže ekstremna opterećenja vjetra i dinamička naprezanja, pa je vjerojatnost loma vrlo malena. Osim toga, veća postrojenja imaju kontrolni sustav koji otkriva pukotine na opasnim mjestima. Dodatna je sigurnosna mjera i automatsko zaustavljanje pogona kad osjetnik otkrije prekomjerne vibracije ili dinamičku neuravnoteženost.

Vjetrene turbine u pogonu stvaraju buku, ometaju televizijski prijam i opasne su za neke vrste ptica.

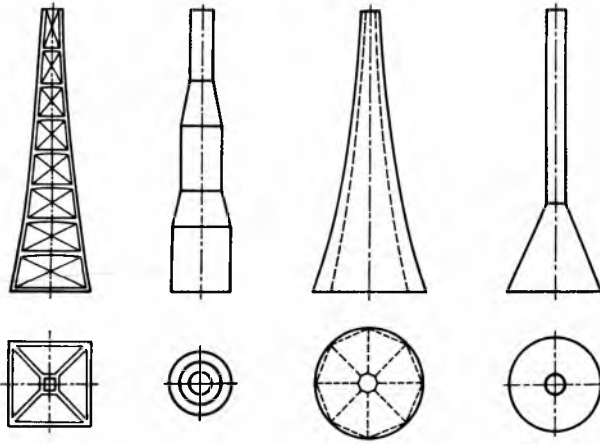
Buka pri radu vjetrorenih turbina ovisi o izvedbi lopatica, o tome jesu li lopatice, s obzirom na stup, postavljene uz vjetar ili niz vjetar, o razmaku između vrhova lopatica i stupa, te o brzini vrtnje. Pojavljuju se konstantni i intermitentni šum. Konstantni šum nastaje zbog gibanja lopatica, a čuje se na udaljenosti od 250–300 m. Intermitentni šum nastaje kad lopatica prolazi uza stup. Taj je šum niže frekvencije od konstantnog šuma, a čuje se na većoj udaljenosti.

Elektromagnetne smetnje, pogotovo za televizijski prijam, ovise o međusobnom položaju postrojenja i prijavnika. Pojavljuje se interferencija, jer rotorske lopatice djeluju kao zrcalo, koje reflektira signale televizijskog odašiljača. Jačina interferencije ovisi o promjeru rotora, materijalu lopatica, frekvenciji signala, udaljenosti vjetrene turbine od prijavnika, te o jakosti signala i kvaliteti antene. Iskustvo u SAD pokazuje da veliki rotori stvaraju teškoće za prijam u visokofrekventnom području na udaljenostima manjim od 400 m od postrojenja, a u ultravisokofrekventnom području kad je ta udaljenost manja od 4 800 m. Te se udaljenosti mogu smanjiti na 40% prvobitne vrijednosti ako se umjesto čeličnih lopatica upotrijebe drvene ili lopatice od polimernih materijala.

Pokusi i dosadašnja praksa pokazuju da ptice, osim u iznimno nepovoljnim prilikama, izbjegavaju vjetrene turbine, pa među njima nema velike smrtnosti zbog vjetrorenih turbina.

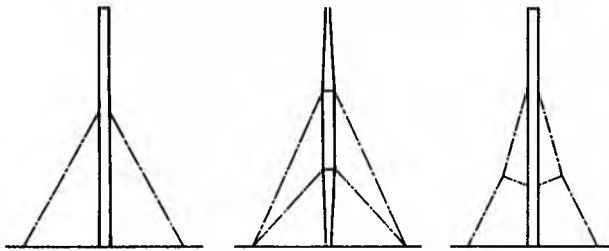
Može se, dakle, zaključiti da su vjetrene turbine, ako su kvalitetno projektirane i izgrađene, ako se nalaze na pogodnim lokacijama i ako je ugrađen pripadni zaštitni sustav, dovoljno sigurne u pogonu te ne predstavljaju veliku smetnju za okoliš.

Noseći stupovi. Tijekom vremena iskušane su mnoge vrste stupova ili tornjeva. Za gradnju stupova, koji su obično suženi pre-



Sl. 23. Slobodno stojeći noseći stupovi

ma vrhu, danas se uglavnom upotrebljava čelik i beton, a drvo samo za postrojenja male snage. Čelični stupovi mogu biti slobodno stojeći (sl. 23) i sa zategama (sl. 24). Žbog zahtjeva glede vlastite frekvencije slobodno stojeći stup mnogo je složeniji i skuplji nego sličan sa zategama. Što se tiče materijala, obično je najpovoljniji slobodni rešetkasti stup. Njemu se i krutost može mijenjati u širokim granicama i tako izbjeći rezonancija. Međutim, takva konstrukcija stvara širu vjetrenu sjenu nego tanki i vitki cijevni stup.



Sl. 24. Noseći stupovi sa zategama

Najpovoljniji su čelični cjevasti stupovi; njihov je aerodinamički utjecaj malen, održavanje je jeftino, a stupovi su vitki i lijepa izgleda. U usporedbi s betonskim stupovima, postavljaju se brzo i jednostavno, a ako je potrebno, mogu se lako premjestiti. Betonski stupovi bolje prigušuju vibracije, pa su mirniji kad nastanu kritična titranja.

Kad su lopatice iza stupa, niz vjetar, one prolaze kroz njegovu zavjetrinu, pa mogu nastati vrlo velika periodička opterećenja kad rotor velikog promjera ima samo dvije lopatice. Gornja je lopatica maksimalno opterećena zbog veće brzine vjetra koja se povećava s visinom, dok je donja lopatica u tom trenutku skoro potpuno rasterećena jer prolazi kroz zavjetrinu stupa.

Većina je stupova za velike vjetrene turbine građena najkruče što je bilo moguće, da bi se spriječila rezonancija. To je tražilo teške i skupe konstrukcije. U posljednje se doba, međutim, grade lakši i jeftiniji stupovi. Žbog toga se mogu pojaviti vibracije na nižim frekvencijama koje odgovaraju rotaciji lopatica, što može uzrokovati nepoželjne efekte. Sustav ipak ima dovoljno elemenata za prigušivanje, pa se naprezanja mogu održavati unutar prihvatljivih granica.

VJETRENE ELEKTRANE

Ako vjetrena turbina služi za pogon generatora, može se nazvati vjetrenom (eolskom) elektranom. U tablici 3 nalazi se pregled nekih izgrađenih i projektiranih postrojenja za iskorištavanje vjetrene energije. Treba spomenuti da metode mjerenja srednjih brzina vjetra, korisnosti i snage nisu normirane, pa proizvođači deklariraju karakteristike vjetrenih turbina prema različitim brzinama i uvjetima ispitivanja.

Tablica 3

NEKE IZGRAĐENE I PROJEKTIRANE VJETRENE ELEKTRANE

Vjetrena elektrana	Promjer rotora m	Nominalna snaga kW	Nominalna brzina vjetra m/s	Broj lopatica	Visina ugradnje m	Generator
Tehnoelektro, VT-400, Samobor, Hrvatska	1,6	0,4	10	8		istosmjerni
Tehnoelektro, VT-1500, Samobor, Hrvatska	3	1,5	10	8		istosmjerni
Uljanik, KE 22/1, Pula, Hrvatska	11	22	15	3		asinkroni
John Brown, Velika Britanija	15	100	15,6	3	24	asinkroni
Balaklava, ZND	30	100	11	3	23	asinkroni
Westinghouse, ERD/NASA, SAD	38,1	200	10,8	2	28	sinkroni
Smith, Putman, SAD	53,3	1200	13,4	2	36	sinkroni
KMW-ERNO, WTS 2, Švedska	75	2000	13	2	54	
Swedyard, WTS 3, Švedska	78	3000	13	2		sinkroni
Bendix (projekt), SAD	80	4500	15,8	3		
Boeing, Mod 58 (projekt), SAD	127	7200		2		

Vjetrene se elektrane svrstavaju prema načinu upotrebe i prema tipu generatora. One mogu raditi paralelno s električnom mrežom i samostalno. Najčešće rade paralelno s ostalim elektranama u elektroenergetskom sustavu. Samostalan je rad mnogo rjeđi i takve elektrane služe za opskrbu potrošača koji nisu priključeni na električnu mrežu. To su obično postrojenja manjih snaga (od nekoliko stotina vata do nekoliko kilovata).

U vjetrenim se elektranama mogu upotrijebiti istosmjerni i izmjenični generatori. Istosmjerni se generatori upotrebljavaju većinom u elektranama za samostalan rad. Tako se omogućuje iskorištavanje vjetrene energije uz promjenljive i optimalne brzine vrtnje generatora, već prema brzini vjetra. Uz njih je redovito priključena i akumulatorska baterija.

Od izmjeničnih generatora rjeđe se upotrebljavaju sinkroni, a češće mnogo jeftiniji asinkroni generatori. Sinkroni su generatori obično u upotrebi u samostalnim elektranama, no mogu se upotrijebiti i u paralelnom priključku na električnu mrežu. Međutim, za rad paralelno s mrežom najčešće se zbog svoje jednostavnosti i robusnosti upotrebljavaju asinkroni generatori.

Iskorištenje vjetrene energije. Promjene brzine vjetra, koje mogu biti i velike i brze, uzrokuju još veće promjene u proizvodnji energije u vjetrenim postrojenjima, jer snaga proizvedena u tim postrojenjima ovisi o trećoj potenciji brzine vjetra. Te se promjene mogu smanjiti gradnjom vjetrenih postrojenja koja rade u zajedničkoj električnoj mreži, a nalaze se na različitim lokacijama. Brzine vjetra na različitim lokacijama mogu se, naime, znatno razlikovati. Ipak se ne mogu eliminirati oscilacije u proizvodnji električne energije jer se i na različitim područjima mogu istodobno pojaviti vjetrovi velike brzine, a pogotovo slabi vjetrovi kojih brzina nije dovoljna ni za pokretanje vjetrenih turbina.

Najbolje i najracionalnije može se vjetrena energija iskoristiti paralelnim radom vjetrenih elektrana s ostalim elektranama u elektroenergetskom sustavu, u kojem mora trajno postojati jednakost proizvodnje i potrošnje. Ukupna snaga ostalih elektrana u sustavu mora biti mnogo veća od ukupne snage vjetrenih elektrana, kako bi sustav mogao preuzeti svu energiju iz vjetrenih elektrana i kako bi ostale elektrane, pogotovo termoelektrane, mogle uspješno prilagođavati svoje opterećenje brzim promjenama snage vjetrenih elektrana.

Pri razmatranju proizvodnje električne energije u vjetrenim elektranama veće snage, a samo takve mogu utjecati na prilike u elektroenergetskom sustavu, mora se uzeti u obzir da one ne mogu

raditi kad su brzine vjetra manje od neke vrijednosti. Tako, npr., vjetrena turbina rotorskog promjera od 100 m ne može raditi kad je brzina vjetra manja od 6 m/s. To znači da takva vjetrena turbina na jadranskoj obali, gdje su u nas vjeterne prilike vrlo povoljne (sl. 4 i 5), može raditi godišnje ~4 000 sati (Senj, Palagruža), ali na nekim lokacijama mnogo kraće (Split ~2 500 sati, Pula ~1 000 sati).

Proizvodni je učinak vjeteranih elektrana, prema tome, vrlo promjenljiv i nesiguran i zbog toga vjeterne elektrane nisu siguran energetski izvor koji bi mogao smanjiti potrebu gradnje ostalih tipova elektrana u elektroenergetskom sustavu. Gradnja je vjeteranih elektrana ekonomski opravdana kad su proizvodni troškovi po kilovatsatu u tim elektranama niži ili najviše jednaki troškovima goriva za proizvodnju jednake energije u termoelektranama, uvećanima za iznos troškova za zaštitu okoliša. Današnje vjeterne elektrane ne ispunjavaju taj uvjet onda kad je cijena goriva niska. Zbog toga je gradnja vjeteranih elektrana danas ograničena na eksperimentalna postrojenja ili na postrojenja koja su građena uz subvencije i znatne porezne olakšice (tzv. farme vjeteranih elektrana u Kaliforniji).

Na poljoprivrednim dobrima daleko od dometa električne mreže i u područjima bez električne mreže vjetrena se energija može iskoristiti za crpljenje vode i za proizvodnju električne energije koja se djelomice akumulira u baterijama. Za to dolaze u obzir vjetrena postrojenja malih snaga.

Iskorištavanje vjeterne energije u obliku topline (za grijanje prostorija i sanitarne vode), te akumulacija u obliku potencijalne energije vode (pumpanje vode u akumulacijske bazene pumpno-akumulacijskih hidroelektrana) ili u obliku vodika proizvedenog elektrolizom vode, tražilo bi dodatna ulaganja i povećavalo energetske gubitke. Zbog toga takvo iskorištavanje vjeterne energije ima malo izgleda da će biti realizirano bez novih sustava koji se ispituju.

Uza sve nedostatke vjeterne energije, ima izgleda da se vjeterne elektrane uključe u elektroenergetski sustav ako se ostvari tehnološki napredak uz sniženje potrebnih ulaganja, i to u područjima s velikim prosječnim brzinama vjetra (zapadna europska obala, Senj). To bi, u prvom redu, moglo biti u okviru nastojanja da se smanji potrošnja fosilnih goriva, a time i onečišćenje okoliša.

LIT.: J. P. Molly, *Windenergie in Theorie und Praxis*. Verlag C. F. Müller, Karlsruhe 1978. – P. Cella, *L'energia eolica*. Longanesi, Milano 1979. – G. Veronesi, A. Zucchini, *Energia del vento*. Edagricola, Bologna 1981. – T. Rastogi, *Wind Pump Handbook*, Unesco, Paris 1982. – R. H. Taylor, *Alternative Energy Sources for the Centralised Generation of Electricity*. A. Hilger, Bristol 1983. – G. L. Johnson, *Wind Energy Systems*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs 1985. – W. Schatter, *Windkonverter*. Vieweg, Braunschweig 1987. – Lj. Pilić-Rabadan, D. Poje i dr., *Sistemi za korištenje energije vjetra*. R. U. Đ. Đaković, Sarajevo 1988.

I. Vrsalović

TURBINA, VODNA, stroj u kojem se potencijalna energija vode pretvara u kinetičku energiju, a zatim, promjenom količine gibanja vode u radnom kolu, u mehanički rad. Vratilo turbinskog radnog kola spojeno je s trošilom, koje je u pravilu električni generator, gdje se mehanički rad pretvara u električnu energiju (v. *Elektrane*, TE 3, str. 547).

Vodne se turbine prema promjeni tlaka vode pri strujanju kroz radno kolo dijele na *turbine slobodnog mlaza* (*akcijske, impulsne*) i *pretlačne (reakcijske) turbine*. U turbini slobodnog mlaza pretvorba se potencijalne energije vode u kinetičku energiju zbiva samo u sapnici (statorskom dijelu) turbine, a posljedica je toga jednak tlak vode na ulazu u kanal radnog kola i na izlazu iz njega. Aktivna zakretna sila nastaje zbog skretanja mlaza u radnom kolu, dakle na temelju promjene količine gibanja. Međutim, u pretlačnoj se turbini potencijalna energija vode pretvara u kinetičku energiju djelomice u statorskom, a djelomice u rotorskom dijelu. Tlak vode na ulazu u radno kolo veći je od tlaka na njegovu izlazu. Osim promjene količine gibanja, zakretanje radnog kola uzrokuju i druge sile (razlika tlaka, Coriolisova sila i dr.), dakle reaktivne sile.

Prema smjeru strujanja vode kroz radno kolo, pretlačne turbine mogu biti *radijalne, poluaksijske (dijagonalne)* i *aksijske*.

Pojedini tipovi turbina nazivaju se po konstruktorima koji su ih patentirali ili usavršili. Od turbina slobodnog mlaza najpoznatija je Peltonova, a u pretlačne se turbine ubrajaju Francisova (radijalna), Dériazova (dijagonalna) i Kaplanova (aksijska) turbina.

Najjednostavniji i najstariji uređaj za pretvorbu vodne energije u mehanički rad jest vodenično kolo. Prve su vodenične bile poznate već u staroj Kini, Egiptu i Mezopotamiji. Više je različitih tipova vodeničnih kola, a pogonska sila nastaje ili zbog težine vode ili zbog pretlaka zastoja vode, a ne kao rezultat promjene količine gibanja vode, pa se vodenična kola stoga ne smatraju turbinama.

Prvu je vodnu turbinu, iako potpuno nerazrađenu, opisao oko 1500. godine Leonardo da Vinci. Za stvaranje aktivne zakretne sile turbina je imala lopatice koje su djelomice iskorištavale težinu vode, a djelomice promjenu količine gibanja vode. Nijemac J. A. Segner je 1750. praktično razradio primjenu reakcijske sile zbog skretanja vodenog toka (promjena količine gibanja) za pokretanje kola (Segnerovo kolo). Švicarac L. Euler je u XVIII. st. matematičkom interpretacijom rada Segnerova kola postavio temelje turbinske teorije, koja, neznatno dopunjena, vrijedi i danas (Eulerova jednadžba ili glavna jednadžba turbostrojeva).

Daljem je razvoju vodnih turbina pridonijela turbina Francuza B. Fourneyrona patentirana 1827, a slijede patenti turbina Nijemca Henschela (1837) i Francuza Jonvala (1841). U Henschel-Jonvalovu je turbinu prvi put ugrađen difuzor (odsisna cijev), koji, osim što poboljšava pretvorbu energije, omogućuje i upotrebu turbine pri velikim kolebanjima razine donje vode. Prethodnice turbina slobodnog mlaza bile su turbine Švicarca Zuppingera (1846) i Nijemca Schwamkruga (1850). Slijedi turbina Francuza Girarda patentirana 1863. godine, koja se zadržala u upotrebi do početka ovog stoljeća.

Novi smjer u konstrukciji vodnih turbina označio je američki inženjer engleskog podrijetla J. B. Francis svojom turbinom patentiranom 1849. godine. Slijedeći korak u razvoju klasičnih vodnih turbina ostvaren je 1877. godine patentom turbine Amerikanca L. A. Peltona. Razvoju Peltonove turbine mnogo je pridonio A. Doble između 1898. i 1900. godine.

Dalji je napredak učinio Čeh V. Kaplan patentiranjem propelerne turbine 1913. godine, a potom propelerne turbine sa zakretnim lopaticama radnog kola. Razvoju Kaplanovih turbina pridonio je i Švedanin E. Englesson. U težnji da se iskoristi hidropotencijal s malim geodetskim padom, a velikim protokom razvijena je cijevna turbina kao podvrsta Kaplanove turbine.

Godine 1903. patentirao je Australac M. Michel novi tip dvostrune akcijske turbine. Princip je te turbine poslije usavršio Madar D. Banki i patentirao 1917. godine. Daljem su njezinu razvoju zajedničkim radom pridonijeli M. Michel i Nijemac F. Ossberger, koji su 1933. razvili i patentirali turbinu koja je poslije nazvana Ossbergerovom turbinom, a koja se proizvodi i danas. Najnovije usavršenje tog tipa turbine ostvario je Čeh M. Cink patentom iz 1985. godine.

Švicarac P. Dériaz je 1952. konstruirao dijagonalnu turbinu, koja je najprije zamišljena kao reverzibilni stroj (pumpa-turbina), ali se počela upotrebljavati i kao vodna turbina.

U Hrvatskoj je iskorištavanje vodne energije u brojnim mlinovima i kovačnicama odavno poznato. Vodne se turbine umjesto vodeničnih kola pojavljuju u XIX. st. kao i drugdje u Europi. Čini se da je prva vodna turbina u nas puštena u pogon 1854. u Prvom hrvatskom mlinu na čigre na Korani u Karlovcu. Poslije je vjerojatno ta turbina zamijenjena novom, koja je i nakon Drugoga svjetskog rata služila za pogon postrojenja poduzeća Vuna d.d. Nakon velikog požara u tom poduzeću cijeli je objekt napušten.

Krajem XIX. st. počinje se u Hrvatskoj intenzivnije razvijati industrija, pa se na pogodnim mjestima uz rijeke grade i industrijske hidroelektrane pogonjene vodnim turbinama. Jedna od takvih hidroelektrana, koja je još i danas, nakon dvije revitalizacije, u pogonu, jest hidroelektrana u sklopu Pamučne industrije u Dugoj Resi na rijeci Mrežnici. U rad je puštena 1884. i to je vjerojatno naša najstarija aktivna hidroelektrana.

Osim manjih, grade se i veće hidroelektrane za opskrbu industrije, te usputno i za javnu rasvjetu gradova. Tako su sagrađene HE Skradinski buk (1895, demonstrirana 1914, na rijeci Krki), HE Jaruga (1904, obnovljena 1937, i danas aktivna, na rijeci Krki, za opskrbu tvornice kalcijeva klorida u Šibeniku), HE Manojlovac (Miljacka, 1906, obnovljena 1956. i 1990, i danas aktivna, također na rijeci Krki, za opskrbu iste tvornice), HE Vrilo I i II (1908, danas napuštena, na rijeci Jadro, za opskrbu tvornice cementa u Solinu), HE Roški slap (1909, na rijeci Krki, za opskrbu bivšeg rudnika u Siveriću), HE Kraljevac (1912, obnovljena 1932. i 1994, i danas aktivna, na rijeci Cetini, za opskrbu Omiša i tvornice u Dugom Ratu) i dr.

Usporedno s razvojem industrije u gradovima uz rijeke grade se male hidroelektrane za javnu rasvjetu. Krajem XIX. i početkom XX. st. puštene su u pogon hidroelektrane za Čakovec (1893), Bakar (1894), Šibenik (1895), Dugu Resu (1901), Skradin (1905), Ožalj-Karlovac (1908), Đurđevac (1910), Požežu (1912), Drniš (1915), Split (1920) i dr.

Između dva svjetska rata uz manje rijeke i potoke radi više stotina hidromlinova i hidropilana pogonjenih vodnim turbinama. Neki su od njih poslije pretvoreni u male hidroelektrane koje su opskrbljivale električnom energijom okolna imanja i sela. Izgradnjom jedinstvene elektroenergetske mreže prestaje važnost lokalnih hidroelektrana, hidromlinova i hidropilana, koje su kao nerentabilne uglavnom napuštene.

Poslije Drugoga svjetskog rata započela je izgradnja većih hidroelektrana na našim rijekama i akumulacijskim područjima s većim hidropotencijalom. Tako se redom grade hidroelektrane Vinodol, Fužine, Peruća, Gojak, Zakućac, Dubrovnik, Senj, Rijeka, Sklope, Orlovac, Varaždin, Golubić, Čakovec, Obrovac, Dubrava, Đale i dr.

Sada Republika Hrvatska raspolaže s 2 058 MW instalirane snage u vlastitim hidroelektranama. Iako su naši rentabilniji hidropotencijali već iskorišteni, na rijekama Dravi, Muri, Savi, Kupi, Dobri, Korani i Mrežnici planira se gradnja još tridesetak većih hidroelektrana (pojedinačne snage od 200–145 MW, a sveukupne snage ~765 MW), te ~700 malih hidroelektrana (snaga većih od 100 kW, a sveukupne snage ~180 MW).