

Danas još nije moguće visinu ekstrakcione kolone izračunati iz osnovnih podataka koji karakterišu sistem (npr. iz geometrije, koeficijenata raspodele itd.) i brzinu prenosa mase u njemu (koeficijenata prenošenja mase), zbog toga što takvi podaci mahom nisu raspoloživi a nisu izradene ni metode za njihovu primenu u proračunima. Za izračunavanje visine kolone mogu se danas koristiti samo eksperimentalni podaci o efikasnosti određenih kolona pri radu s određenim sistemima. Postoje dva oblika u kojima su rezultati određivanja efikasnosti kolona za kontinualni kontakt (u ekstrakciji kao i u drugim difuzionim operacijama) raspoloživi u literaturi i, prema tome, dva načina izračunavanja visine ekstrakcione kolone pomoću tih podataka. Jedan je oblik tzv. *visinski ekvivalent teorijskog stupnja* (VETS, visina kolone ekvivalentna teorijskom stupnju), broj koji se dobije ako se visina kolone kojom je eksperimentalno dobijena određena efikasnost ekstrakcije podeli s brojem idealnih stupnjeva teorijski potrebnih za postizanje te iste efikasnosti u stupnjevitoj ekstrakciji, a određenih na neki od napred navedenih načina (str. 546). Pomoću podataka o VETS za određeni tip kolone i određeni sistem rastvorā može se izračunati potrebna visina kolone za određenu željenu efikasnost (određeni stepen izdvajanja rastvorene supstance), sa istim sistemom u koloni istog tipa, tako da se pomoću navedenih konstrukcija odredi koliko bi za to bilo potrebno idealnih stupnjeva u stupnjevitoj ekstrakciji i dobiveni broj idealnih stupnjeva (n) pomnoži sa VETS; visina kolone h je dakle $h = n \cdot \text{VETS}$.

Drugi je način izražavanja rezultata eksperimentalnog određivanja efikasnosti kolone (i, prema tome, izračunavanja visine kolone) pomoću visinskog ekvivalenta prenosne jedinice (kraće: *visine prenosne jedinice*), tj. visine kolone koja je pri eksperimentalnom određivanju efikasnosti određene kolone sa određenim sistemom rastvora bila u proseku potrebna da se ostvari promena koncentracije rastvorene supstance jednaka srednjoj razlici između koncentracije rastvorene supstance na granici faza i u glavnoj masi faze (tj. srednjoj pogonskoj sili koja ostvaruje prelaženje mase iz jedne faze u drugu). Visina prenosne jedinice dobiva se iz eksperimentalnih podataka tako da se ukupna visina kolone kojom je postignuta određena efikasnost podeli s brojem prenosnih jedinica, koji se izračunava ili grafički određuje analogo kako je prikazano za apsorpciju gasova (TE 1, str. 330, 331). Prema tome da li se uzima promena koncentracije i razlika koncentracija kroz granični sloj u jednoj ili u drugoj fazi, dobijaju se visine prenosne jedinice H_{tR} ili H_{tE} i broj prenosnih jedinica N_{tR} i N_{tE} . Pomoću vrednosti H_{tR} ili H_{tE} iz literature izračunava se visina kolone tako da se ta vrednost pomnoži s brojem potrebnih prenosnih jedinica, koji se iz raspoloživih podataka izračuna ili grafički odredi: $h = N_{tR} \cdot H_{tR} = N_{tE} \cdot H_{tE}$. Međutim, eksperimentalno određene vrednosti H_{tR} i H_{tE} objavljene u literaturi još uvek su srazmerno malobrojne, veoma ograničene i ne uvek pouzdane.

Određivanje prečnika kolone. Prečnik kolone merodavan je za njen kapacitet. Pri određivanju (unutrašnjeg) prečnika d kolone uobičajeno je da se računa sa prividnim brzinama v_L , v_T strujanja obe faze (lake L i teške T) kroz kolonu, tj. sa brzinama izračunatim iz zapremina obe tečnosti koje prođu kroz kolonu u jedinici vremena (Q_L , Q_T) i unutrašnjeg preseka prazne kolone $d^2 \pi / 4$:

$$v_L = \frac{4}{d^2 \pi} Q_L, \quad v_T = \frac{4}{d^2 \pi} Q_T.$$

Iz toga sledi:

$$d = \sqrt{\frac{4 Q_L}{v_L \pi}} = \sqrt{\frac{4 Q_T}{v_T \pi}}.$$

Odnos Q_L/Q_T dobija se iz dijagrama ravnoteže uz pomoć pravila poluge (v. npr. str. 544).

Za brzinu prenosa mase i za cenu uređaja povoljno je da brzine strujanja tečnosti kroz kolonu budu što veće, ali su tim brzinama postavljene granice pojavom *plavljenja kolone* pri velikim brzinama strujanja tečnosti. Ako se npr. u koloni prikazanoj na sl. 15 uz konstantni tok teške faze postepeno povećava tok lakše faze, smanjujuće se sve više slobodni presek kolone koji je na raspoloženju teškoj fazi, njena će se stvarna brzina sve više povećavati i na kraju će strujanje teške faze biti tako brzo i tako turbulentno da će povlačiti sobom do izlaza kapi lake faze i sprečavati njihov prolaz kroz kolonu. Kaže se da je kolona *potopljena*. Slično se zbiva pojавa

kad se uz konstantni tok lake faze postepeno povećava tok teške faze. Eksperimentalni podaci o *brzinama plavljenja*, kao maksimalno dozvoljenim brzinama strujanja u različitim kolonama s različitim tečnostima, nalaze se u literaturi; većinom su određeni pod uslovima koji ne odgovaraju u svemu praksi ekstrakcije, pa ih treba koristiti s rezervom.

LIT.: T. K. Sherwood, R. L. Pigford, Absorption and extraction, New York 1952. — G. Kortüm, H. Buchholz-Meisenheimer, Die Theorie der Destillation und Extraktion von Flüssigkeiten, Berlin-Göttingen-Heidelberg 1952. — M. Vigneron, Fractionnement par solvants, Paris 1954. — E. Hecker, Verteilungsversuchen im Laboratorium, Weinheim/Bergstraße 1955. — L. Craig, D. Craig, Extraction and distribution, u djelu: A. Weissberger (ed.), Technique of organic chemistry, vol. III, pt. 1, New York 1956. — G. H. Morrison, H. Freiser, Solvent extraction in analytical chemistry, New York 1957. — A. Г. Касаткин (ред.), Жидкостная экстракция, сборник статей, Москва 1958. — L. Alders, Liquid-liquid extraction, Amsterdam 1959. — В. В. Фомин, Химия экстракционных процессов, Москва 1960. — И. Д. Шкоропад, И. В. Лисковцев, Центробежные жидкостные экстракторы, Москва 1962. — З. Зюловский, Жидкостная экстракция в химической промышленности, Москва 1963. — R. Treybal, Liquid extraction, New York 1963. — J. T. Davies, Mass-transfer and interfacial phenomena; R. C. Kintner, Drop phenomena affecting liquid extraction, u djelu: Advances in chemical engineering, vol. 4, New York 1963. — Процессы жидкостной экстракции, сборник статей, Москва 1963. — Б. И. Бруннштейн, А. С. Железняк, Физико-химические основы жидкостной экстракции, Москва 1966.

D. Simonović

ELEKTRANE su postrojenja za proizvodnju većih količina električne energije. Za pogon generatora kao izvora električne energije predviđeni su u svakoj elektrani pogonski strojevi (vodne turbine, parne turbine, motori s unutrašnjim izgaranjem, elisa za pogon vjetrom). Osim njih postoje i svi ostali uredaji i naprave koji su potrebni za pogon tih strojeva, za regulaciju, kontrolu, upravljanje i druge namjene.

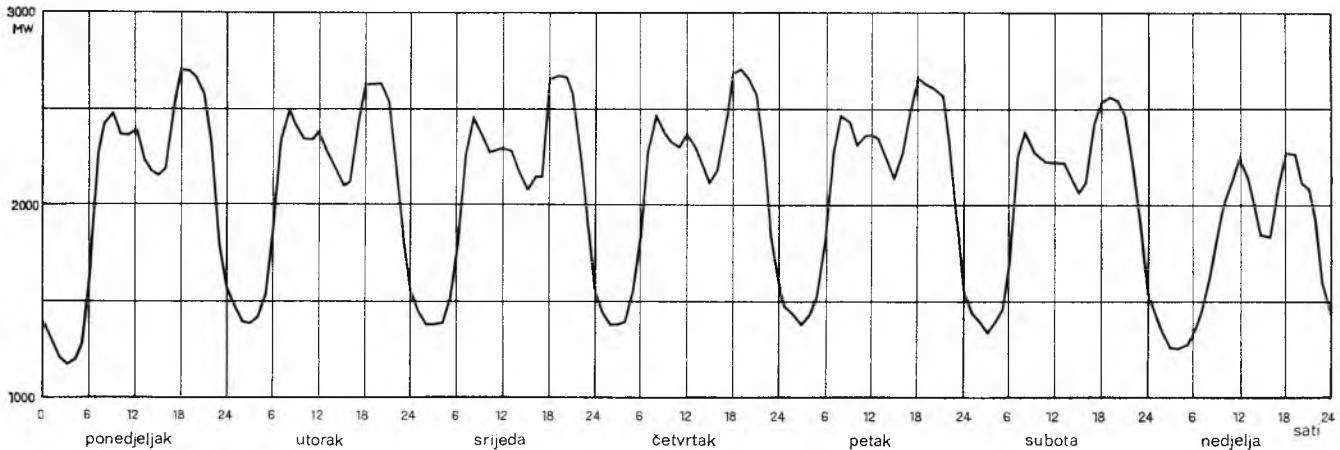
Hydroelektrane nazivaju se postrojenja u kojima se potencijalna energija vode pretvara u električnu energiju; među hidroelektrane mogu se ubrojiti i elektrane koje se koriste plinom i osekom. *Termoelektrane* su postrojenja koja upotrebljavaju različita goriva ili toplinu Zemlje za proizvodnju električne energije (parne, nuklearne, dizelske, plinske i geotermijske elektrane). U *elektranama na vjetar* iskorištava se kinetička energija uzduha.

Osnovni je zadatak elektrana da proizvedu potrebnu količinu energije u času kad je potrošač traži. Budući da ne postoji mogućnost akumuliranja većih količina električne energije, proizvodnja električne energije mora u svakom trenutku biti jednak potražnji. Elektrane treba da budu u mogućnosti tom zahtjevu udovoljiti, pa ih treba tako i dimenzionirati i koristiti.

Danas se elektrane grade rijetko kao izolirana postrojenja u kojima se električna energija proizvodi samo za određene potrošače, npr. neke industrije locirane daleko od postojećih električnih mreža. Elektrane su danas redovito dio nekog elektroenergetskog sistema koji, osim većeg broja elektrana za proizvodnju električne energije, obuhvaća još rasklopna postrojenja za razvod i transformaciju električne energije, vodove za prijenos i razdiobu električne energije i postrojenja, uredaje i aparate u kojima se električna energija kod potrošača pretvara u onaj oblik energije koji mu je potreban (topljinu, mehaničku energiju, kemijsku energiju, svjetlo). Svi dijelovi elektroenergetskog sistema treba da budu dimenzionirani da osiguravaju opskrbu potrošača električnom energijom određenog napona i frekvencije na kvalitetan i najekonomičniji način (v. *Elektroenergetski sistemi*).

Elektrane obuhvaćene elektroenergetskim sistemom postaju dakle dio cjeline, te način njihovog pogona zavisi od rada drugih elektrana i od potražnje svih potrošača u sistemu. To isto vrijedi za rasklopna postrojenja i vodove. Stoga se elektrana ne može promatrati nezavisno od sistema, već je kako način njezine izgradnje tako i dimenzioniranje njezinih uredaja i izbor njihovih pogonskih karakteristika zavisao od utjecaja elektroenergetskog sistema.

Elektrane koje pokrivaju potrošnju prikazanu gornjim dijelom dnevnom dijagramu opterećenja (vidi sliku 1) nazivaju se *vršnim elektranama*, a one koje imaju zadatak da rade za potrošnju u donjem dijelu dijagrama, *temeljnim elektranama*. Uloga i režim rada pojedine elektrane u elektroenergetskom sistemu zavisni su, s jedne strane, od sposobnosti elektrane da se prilagodi brzim promjenama opterećenja (najbolje se mogu prilagoditi akumulacione hidroelektrane i elektrane s plinskim turbinama) i, s druge strane, o ispunjenju zahtjeva da se potrebna energija proizvede uz što niže troškove (maksimalno iskorištenje raspoložive vode, što veća proizvodnja u termoelektranama s malim specifičnim troškovima



Sl. 1. Dnevni dijagrami opterećenja u elektroenergetskom sistemu Jugoslavije u pretposlednjoj sedmici prosinca 1967

za gorivo). Uloga elektrana nije po pravilu unaprijed čvrsto određena. U kišnom razdoblju godine velika većina hidroelektrana (osim onih s vrlo velikim akumulacijama) rade kao temeljne elektrane, a termoelektrane se što je moguće više koriste kao vršne elektrane. U sušnom razdoblju uloge se zamjenjuju. Osim toga uloga elektrana mijenja se i s razvojem sistema. Starije termoelektrane rade sve više kao vršne (jer imaju veće specifične troškove za gorivo), a nove termoelektrane preuzimaju ulogu temeljnih.

Energetske karakteristike elektrana. *Instalirana snaga* je osnovna karakteristika svake elektrane. Ona se definira kao aritmetička suma nazivnih snaga generatora (u megavoltamperima, MVA), odnosno kao aritmetička suma snaga turbina mјerenih na stezaljkama generatora (u megavatima, MW). *Instalirana snaga* je, dakle, nazivna snaga elektrane.

Maksimalna snaga je najveća snaga koju elektrana kao cjelina može proizvesti uz pretpostavku da su svi njezini dijelovi sposobni za pogon. Za hidroelektranu se, pored toga, pretpostavlja da su protok i pad optimalni, a za termoelektranu da stoji na raspolaganju dovoljna količina ugljena određenog kvaliteta i dovoljna količina vode normalne temperature i čistoće za hlađenje kondenzatora. Pri određivanju maksimalne snage ne postavlja se zahtjev da se postigne optimalni stupanj djelovanja, ali se uzimaju u obzir utjecaji svih dijelova postrojenja: dimenzije dovoda, tlačnog cjevovoda, odvoda i slično u hidroelektranama, kapacitet dopreme i meljave ugljena, učin kotlova, kapacitet odvoda pepela, dovoda vode i sl. u termoelektranama. Razlikuje se maksimalna snaga na priključnicama generatora (maksimalna bruto-snaga) i maksimalna snaga na pragu (maksimalna neto-snaga).

Raspoloživa snaga je najveća snaga koju elektrana može proizvesti u nekom trenutku, polazeći od stvarnog stanja u elektrani (defekti, popravci i pregledi), a uz pretpostavku da nema ograničenja zbog proizvodnje jalove snage. Pri određivanju raspoložive snage treba kod hidroelektrane uzeti u obzir raspoloživi dotok i pad, a kod termoelektrane kvalitet ugljena, količinu i temperaturu vode. I ovdje se razlikuje raspoloživa snaga na stezaljkama generatora i na pragu elektrane.

Maksimalno i minimalno godišnje opterećenje elektrane određuje se iz pogonskih podataka elektrane ili iz konstruirane godišnje krivulje trajanja opterećenja. U većini praktičnih slučajeva — za elektrane koje rade u većim elektroenergetskim sistemima — maksimalno je godišnje opterećenje jednako ili skoro jednakomaksimalnoj snazi, dok je minimalno opterećenje jednako nuli (zbog godišnjeg pregleda). Za elektrane nema, dakle, značenja odnos između minimalnog i maksimalnog opterećenja, ali može biti zanimljivo poznavati faktor opterećenja elektrane (m) i faktor iskorištenja elektrane (n).

Faktor opterećenja elektrane definiran je kao omjer električne energije proizvedene u promatranoj godini i električne energije koja bi se bila proizvela da je elektrana kroz cijelu tu godinu bila pod maksimalnim opterećenjem. Ako se sa P_m označi maksimalno opterećenje elektrane u toku promatrane godine u megavatima, a sa W_{god} godišnja proizvodnja elektrane u megavatsatima u istom razdoblju, faktor opterećenja izračunava se iz formule:

$$m = \frac{W_{\text{god}}}{8760 P_m}, \quad (1)$$

jer godina ima 8760 sati.

Faktor iskorištenja dobiva se iz analognog izraza ako se mjesto maksimalnog opterećenja P_m u formulu (1) uvrsti maksimalna snaga elektrane (P_{\max}):

$$n = \frac{W_{\text{god}}}{8760 P_{\max}}, \quad (2)$$

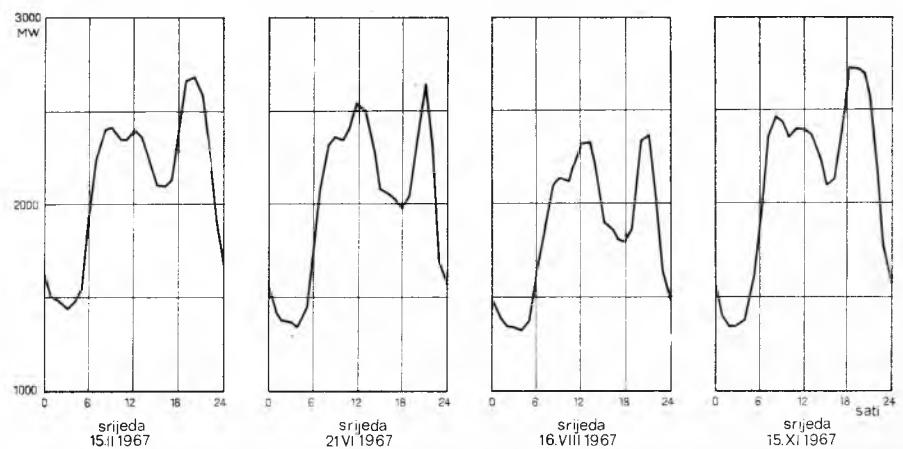
Trajanje korištenja. Opterećivanje odnosno iskorištavanje elektrane često se karakterizira trajanjem korištenja maksimalnog opterećenja (t_m), odnosno trajanjem korištenja maksimalne snage (t_{\max}), koje se trajanje može definirati kao vrijeme potrebno da se snagom P_m , odnosno snagom P_{\max} , proizvede energija W_{god} . Veličine t_m i t_{\max} mogu se (u satima) izračunati prema formulama

$$t_m = \frac{W_{\text{god}}}{P_m}, \quad (3)$$

odnosno

$$t_{\max} = \frac{W_{\text{god}}}{P_{\max}} \quad (4)$$

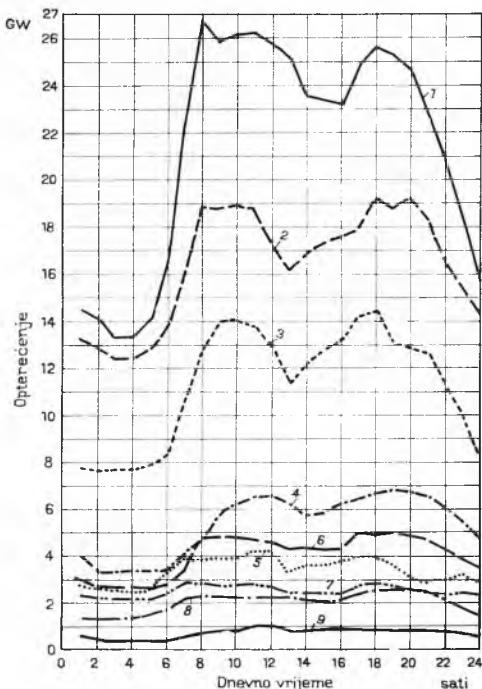
Treba naglasiti da ni t_m ni t_{\max} ne predstavljaju stvarno trajanje pogona elektrane, već samo vrijeme koje bi bilo potrebno da se uz maksimalno opterećenje, odnosno snagu, proizvede količina energije W_{god} . Trajanje je korištenja akumulacionih hidroelektrana 2000...3500, protočnih i do 6000 h/god., a termoelektrana između 1000 (stare) i 6500 h/god. (nove).



Sl. 2. Dnevni dijagrami opterećenja radnog dana u elektroenergetskom sistemu Jugoslavije u karakterističnim mjesecima 1967

Faktori opterećenja i iskorištenja, odnosno trajanja korištenja, mogu se odrediti prema snazi ili opterećenju bilo na priključnicama generatora bilo na pragu elektrane. U prvom slučaju treba, dakako, u odgovarajuće izrave uvrstiti godišnju proizvodnju na priključnicama generatora, a u drugom slučaju godišnju proizvodnju na pragu elektrane.

Dijagrami opterećenja elektrane. U elektroenergetskom sistemu postoji velik broj potrošača od kojih svaki troši električnu energiju na način i u doba kako to najbolje odgovara njegovim potrebama. Zbog toga se i potražnja u toku dana mijenja. Tim



Sl. 3. Dnevni dijagrami opterećenja na dan 20. XII 1967 u nekim evropskim zemljama. 1 SR Njemačka (80%), 2 Francuska (95%), 3 Italija (82%), 4 Španjolska (90%), 5 Švicarska (100%), 6 Nizozemska (95%), 7 Austrija (100%), 8 Jugoslavija (90%), 9 Portugal (94%). (Postotak u zagradama označava dio od ukupnog opterećenja.)

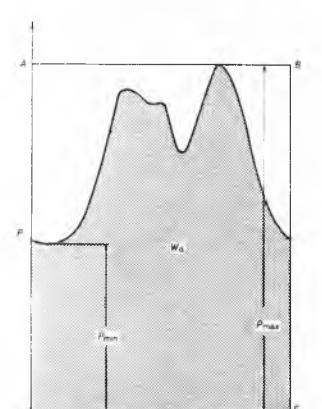
promjenama mora biti prilagođen elektroenergetski sistem s elektranama koje su u njega uključene. Osnovu za upoznavanje zahtjeva potrošača, a prema tome i polaznu tačku za projektiranje, izgradnju i pogon elektrana, predstavlja tzv. dnevni dijagram opterećenja.

Dnevni dijagram potražnje ili dnevni dijagram opterećenja prikazuje kako se potražnja (potrošnja) mijenja u toku dana. Govori se o dnevnom dijagramu potražnje kad se promatra promjena sa strane potrošača, a o dnevnom dijagramu opterećenja kad se gleda sa strane elektrana, rasklopni postrojenja ili vodova. I

pored toga što svaki od potrošača troši električnu energiju prema svojim potrebama, dnevni dijagrami potražnje (zbog vrlo velikog broja potrošača) imaju u svakom elektroenergetskom sistemu karakterističan oblik.

Dnevni dijagram nije svakog dana jednak. On zavisi od dana u sedmici (npr. u subotu i nedjelju potrošak je manji nego u druge dane), od godišnjeg doba (zimi je potrošak za osvjetljenje veći nego ljeti), od vrste potrošača (industrija, domaćinstva, električna vuča itd.) i o razvijenosti zemlje (sl. 1, 2, i 3).

Na dnevnom dijagramu opterećenja (sl. 4) vide se dva



Sl. 4. Dnevni dijagram opterećenja

karakteristična opterećenja: maksimalno opterećenje (P_{\max}) i minimalno opterećenje (P_{\min}). Površina ispod krivulje predstavlja u toku dana proizvedenu energiju (W_d). Pomoću ovih triju podataka mogu se odrediti dvije veličine koje karakteriziraju dnevni dijagram opterećenja: faktor opterećenja (m), definiran kao omjer između energije W_d i energije koja bi se mogla proizvesti snagom P_{\max} kroz 24 sata:

$$m = \frac{W_d}{24 P_{\max}}, \quad (5)$$

i omjer minimalnog i maksimalnog opterećenja (m_0):

$$m_0 = \frac{P_{\min}}{P_{\max}}. \quad (6)$$

Energiju 24 P_{\max} prikazuje na sl. 4 površina $OABC$.

Na osnovi analize ostvarenih dijagrama opterećenja može se pokazati da između faktora opterećenja m i veličine m_0 postoji približan odnos $m_0 = (0,8 \cdots 1,0) m^2$.

Budući da je potrošena energija u dnevnim dijagramima prikazana površinama, oni se teško iskorištavaju kad krivulje dnevnog opterećenja imaju nepogodan oblik. Zbog toga se primjenjuju često i drugi dijagrami, npr. dnevna, sedmična i godišnja krivulja trajanja opterećenja, krivulja energija snaga, tzv. konzumni okvir i drugi koji su opisani u članku *Elektroenergetski sistemi*.

HIDROELEKTRANE

Hidroelektrane su postrojenja u kojima se potencijalna energija vode pretvara s pomoću vodnih turbina i električnih generatora u električnu energiju. U sastav hidroelektrane idu i svi objekti i dijelovi koji služe za skupljanje, dovodenje i odvođenje vode, za pretvaranje mehaničke u električnu energiju i za transformaciju i razvod električne energije. Prema tome razlikuju se ovi karakteristični dijelovi hidroelektrane: brana ili pregrada, zahvat, dovod, vodna komora ili vodostan, tlačni cjevovod, strojarnica i odvod vode. Prema tipu hidroelektrane mogu neki od spomenutih dijelova potpuno izostati a u drugim slučajevima može isti dio preuzeti više funkcija.

Hidroelektrane se mogu podijeliti prema padu, prema načinu korištenja vode, prema volumenu akumulacijskog bazena i prema smještaju strojarnice. Prema veličini pada razlikuju se *niskotlačne* (pad do 25 m), *srednjetlačne* (od 25 do 200 m) i *visokotlačne* hidroelektrane (iznad 200 m). S obzirom na način korištenja vode govori se o *protočnim* hidroelektranama, u kojima se voda koristi onako kako dotječe, i o *akumulacijskim* hidroelektranama, u kojima se dio vode akumulira, da bi se mogla iskoristiti kad se pojavi potreba. Prema veličini akumulacijskog bazena razlikuju se hidroelektrane s dnevnom akumulacijom (punjenje akumulacije po noći, a pražnjenje po danu), sa sezonskom akumulacijom (punjenje u kišnom, a pražnjenje u sušnom razdoblju godine) i s godišnjom akumulacijom (punjenje u kišnim, a pražnjenje u sušnim godinama). Prema smještaju strojarnice svrstavaju se hidroelektrane u *pribanske* (strojarnica smještena neposredno uz branu) i *derivacijske*.

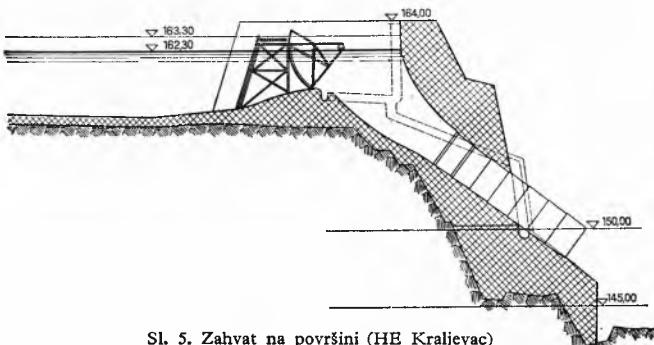
Posebne vrste hidroelektrana predstavljaju *pumpno-akumulacijske* hidroelektrane i hidroelektrane koje iskorištavaju *plim* i *oseku*.

Prva hidroelektrana izgrađena je u Gornjoj Bavarskoj 1876; proizvedena energija se je koristila za rasvjetu spilje pokraj dvorca Linderhof. Prva javna hidroelektrana, izgrađena u Švicarskoj 1883., imala je snagu 180 HP. Daljnji razvoj hidroelektrana bio je omogućen pošto se proširila upotreba viših napona za prijenos električne energije (prije prijenos 1891 na udaljenost od 177 km Lauffen-Frankfurt) i razvojem turbinu i generatora. Najstarija Francisova turbina (J. B. Francis 1815—1892) sagrađena je 1849 a prva Peltonova turbina (L. A. Pelton 1829—1908), 1890. One su omogućile iskorištenje velikih padova. Kaplanova turbina patentirana je 1913 godine (V. Kaplan 1876—1934) najprije s nepomičnim a zatim i s pomičnim lopaticama.

Danas se voda koristi na padovima od nekoliko metara (od 4 m) do nekoliko tisuća metara (i preko 2000 m). Snaga najvećih hidroelektrana prelazi i 4000 MW (Bratskaja u SSSR) uz korištenje protoka preko 10 000 m³/s, a snaga pojedinih agregata prelazi i 300 MW.

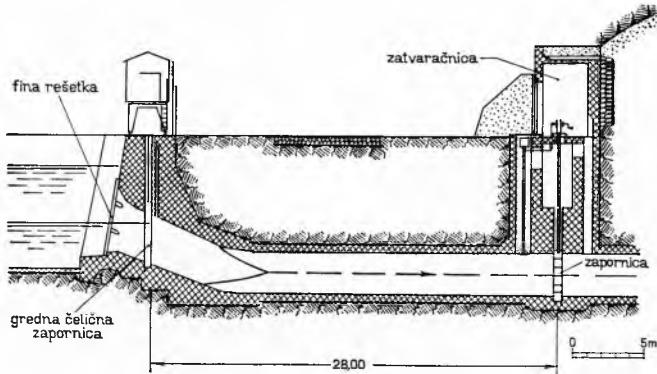
Dijelovi hidroelektrane. Brane ili pregrade su građevine koje imaju višestruku svrhu: da skrenu vodu s njezinog prirodnog toka prema zahvatu hidroelektrane, da povise razinu vode radi postizanja većeg pada i da ostvare akumulaciju vode. Brane se dijele na visoke i niske. Niska brana kojom se bitno ne mijenja razina vode naziva se i pragom. S obzirom na upotrijebljeni ma-

terijal brane mogu biti masivne (npr. zidane od kama ili betona) ili nasute (zemljane i kamene). Izbor vrste brane zavisi od geološkog sastava terena i od materijala raspoloživog za njezinu gradnju. Za odvođenje suvišnih voda i radi reguliranja vodostaja pri nailasku velikih voda služe: preljevi, ispusti i pretočna polja u tijelu brane u kojima su smještene ustave (pokretne zapornice). Za djelomično ili potpuno pražnjenje umjetnih jezera predviđeni su ispusti koji mogu biti na samoj brani ili izvan nje. Podrobnije o svemu tome vidi u članku *Brane*.



Sl. 5. Zahvat na površini (HE Kraljevac)

Zahvat ima zadatak da vodu zaustavljeni od pregrade primi i uputi prema centrali. Razlikuju se u principu dva osnovna tipa zahvata: zahvat na površini i zahvat ispod površine vode. Zahvat na površini vode (sl. 5) izvodi se kad je pregrada niska pa je nivo vode iza pregrade praktički konstantan. Prolaz vode kroz zahvat regulira se zapornicama. Kad se, uslijed akumuliranja vode u kišnom periodu i njezinog korišćenja u sušnom, nivo vode tokom godine mijenja, zahvat treba postaviti ispod razine vode, i to na najnižu kotu do koje će se spuštati nivo vode (sl. 6).



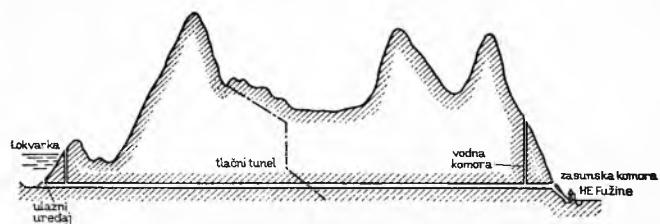
Sl. 6. Zahvat ispod površine vode, ulazni uređaj (Jezero Bajer za HE Vinodol)

Dovod spaja zahvat s vodostanom ili vodnom komorom. Može biti izrađen kao kanal ili kao tunel, zavisno od topografije terena kojim se vodi dovod i o pogonskim zahtjevima koji se postavljaju hidroelektrani. Tunel se može izvesti kao gravitacijski i kao tlačni tunel. Gravitacijski tunel voda ne ispunja, pa je za promjenu dotjecanja vode potrebno mijenjati otvor na zahvatu; u slučaju tlačnog tunela voda ispunja cijeli profil tunela i za promjenu količine dobavljene vode nije potrebno nikakvo djelovanje na zahvatu. Hidroelektrane su znatno elastičnije u pogonu kad imaju tlačni dovod nego kad imaju gravitacijski jer mogu bez ikakvih manipulacija slijediti promjene opterećenja.

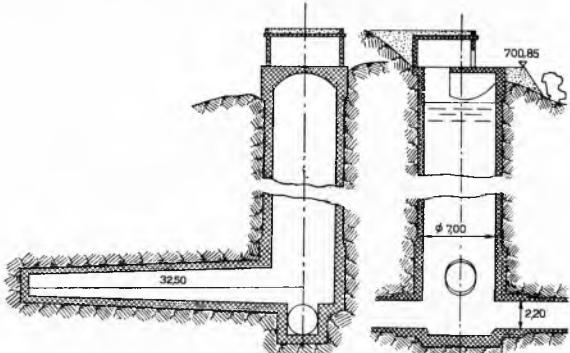
Vodostan ili vodna komora nalazi se na kraju dovoda. Kad je dovod gravitacijski, potreban je vodostan dovoljnog volumena, da bi mogao poslužiti kao rezervoar vode u slučaju naglih promjena opterećenja. Ako hidroelektrana ima tlačni dovod, proširenje na kraju tog dovoda mora se izvesti kao vodna komora takvih dimenzija da — nakon promjene opterećenja — tlak u dovodu ne poraste iznad dozvoljene granice, odnosno da nivo vode ne padne ispod najviše kote ulaza u tlačni cjevovod. Dimenzioniranje vodne komore ima velik utjecaj na pravilno funkciranje hidroelektrane. Sl. 7 prikazuje primjer izvedbe vodne komore.

Tlačni cjevovod služi za vodenje vode iz vodostana ili vodne komore do turbine. On je po pravilu izrađen od čelika, a za manje padove i od betona. Prema svom smještaju tlačni cjevovod može biti položen po površini i u tunelu. Cjevovod u tunelu može biti ili slobodno položen, kada tunel služi samo kao prostor za smještaj cjevovoda, ili prilijegati uz stijene tunela, i to bilo tako da naprezanja preuzima samo stijenka cjevovoda ili tako da ih preuzima djelomično i okolna stijena.

Na ulazu u cjevovod uvijek postoji zaporni organ, čija izvedba zavisi od tlaka koji vlada na početku cjevovoda. Najvažniji je sigurnosni zaporni organ, koji ima zadatak da automatski sprječi daljnje dotjecanje vode u cjevovod ako iz bilo kakvih razloga pukne cjev. Ispred sigurnosnog zapornog organa postavlja se pomoći zaporni organ, koji omogućuje pregled i popravke na sigurnosnom organu bez pražnjenja dovodnog tunela ili dovodnog kanala. Postavljanje zapornih organa na dnu tlačnog cjevovoda zavisi od broja turbina koje su spojene na jedan cjevovod i od pogonskih zahtjeva koji se postavljaju hidroelektrani.



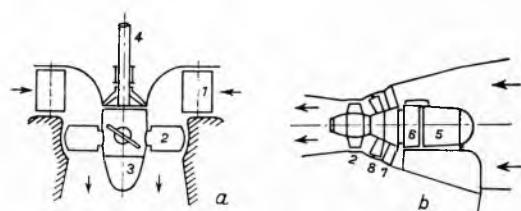
Uzdužni profil tunela Lokvarka-Ličanka



Sl. 7. Vodna komora (pred HE Fužine u sistemu HE Vinodol)

Obilazni cjevovod se nalazi na početku glavnog cjevovoda. On je predviđen za postepeno punjenje glavnog cjevovoda te ima mnogo manji promjer od ovog jer se — radi sprečavanja oštećenja — cjevovod puni samo sa približno 1/20 protoka u normalnom pogonu. Osim toga, zadatak je obilaznog cjevovoda da omogući izjednačenje tlakova ispred i iza zapornog organa na ulazu u cjevovod, jer bi bez toga izjednačenja bila potrebna vrlo velika snaga za otvaranje zapornog organa.

Vodne turbine služe pretvaranju hidrauličke energije u mehaničku. U hidroelektranama se primjenjuju Kaplanove, Francisove i Peltonove turbine. Izbor tipa turbine zavisi od pada i od protoka.



Sl. 8. Princip Kaplanove turbine. a) Vertikalno postavljena Kaplanova turbinu, b) horizontalno postavljena Kaplanova turbinu — kućište generatora u vodi; 1 lopatica za reguliranje količine vode, 2 pokretljive lopatice turbine, 3 mehanizam za okretanje lopatica, 4 osovina za pogon generatora, 5 generator, 6 prenosnik, 7 držači, 8 privodno kolo

Kaplanove i propellerske turbine (sl. 8) su reaktivne turbine. Imaju 3 do 8 lopatica (manji broj za manje padove) u obliku propelera, koje imaju nepromjenljiv uspon u propellerskim a promjenljiv u Kaplanovim turbinama. Pokretanjem lopatica u zavisnosti od količine vode koja protječe kroz turbinu postiže se povoljniji stupanj djelovanja. Specifični broj okretaja (broj okretaja modelske turbine za pad od 1 m i snagu od 1 KS) Kaplanovih i propellerskih turbin iznosi 400 do 900/min. One se upotrebljavaju najčešće za padove do 25 m, a kad su protoci mali (do 20 m³/s), i za padove do 50 m. Izvode se normalno s vertikalnim vratilom; cijevne turbine za vrlo male padove izvode se s horizontalnim vratilom.

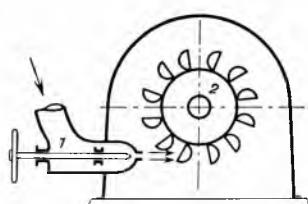
Francisove turbine (sl. 9) su također reaktivne turbine. Turbinsko kolo služi za skretanje vode iz radijalnog u aksijalni smjer. Izvode se za padove od 25 do 400 m, a imaju specifični broj okretaja od nekoliko desetaka do 500 na minutu.

U Kaplanovim, propellerskim i Francisovim turbinama voda se dovodi privodnim kolom čijim se lopaticama regulira količina vode, u Peltonovoj turbinu voda se dovodi kroz sapnicu koja je usmjerenata na lopatice školjkastog oblika. Položajem igle u sapnici regulira se količina vode (sl. 10). Peltonove turbine upotrebljavaju se za padove od 300 m naviše, a izvode se za specifične brojeve okretaja od 10 do 30/min. Grade se češće s horizontalnim vratilom.

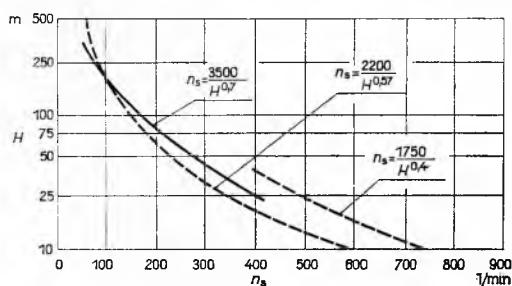
Vodne turbine grade se danas za velike snage, 150 000 KS i više (v. *Turbine, vodne*). Broj okretaja vodne turbine određen je relacijom

$$n = n_s \frac{H \cdot \sqrt{H}}{\sqrt{P}} \quad (\text{min}^{-1}), \quad (7)$$

gdje je n_s specifični broj okretaja turbine, H pad u m, a P snaga turbine u konjskim snagama. Za zadani pad i zadani snagu turbine broj okretaja je to veći što je veći specifični broj okretaja. Prema tome treba nastojati da se upotrijebi turbine sa što većim specifičnim brojem okretaja. Za Francisove i Kaplanove (ili propellerske) turbine specifični broj okretaja je ograničen prema gore zbog pojave kavitacije koja bi vrlo brzo uništila turbinu, a za Peltonove turbine specifični broj okretaja ograničen je iz konstruktivnih razloga (promjerom rotora, smještajem i međusobnom udaljenosti lopatica). Ni za jedan tip turbine ne može se teoretski egzaktno odrediti maksimalni specifični broj okretaja, pa se u literaturi nalazi više formula, koje daju $n_{s \max}$ (sl. 11).



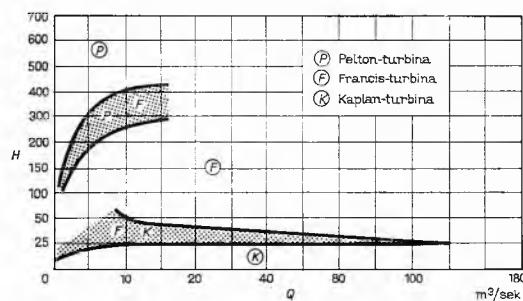
Sl. 10. Princip Peltonove turbine.
1 Sapnica, 2 rotor s lopaticama



Sl. 11. Zavisnost maksimalnog specifičnog broja okretaja vodnih turbin n_s od pada H prema formulama Oesterlena, Keyl-Häckerta i Morozova

Da se dobije slika o upotrebi turbinu, na sl. 12 naveden je dijagram koji pokazuje područja upotrebe različitih tipova turbin; šrafirano su označena područja koja su zajednička Kaplanovim i Francisovim, odn. Francisoškim i Peltonovim turbinama.

Tendencija je razvoja da Kaplanova turbinu sve više prodire u područje Francisove turbine, a Francisova turbinu u područje Peltonove turbinu.

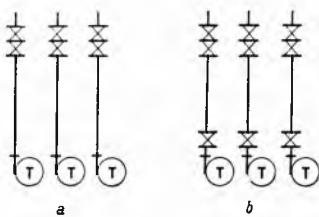


Sl. 12. Područje upotrebe tipova vodnih turbina. Q protok vode, H pad

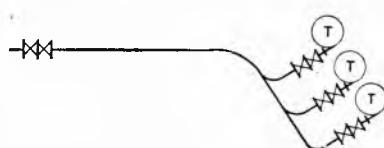
Spoj turbina s vodnom komorom ili vodostanom može se s po-moću tlačnog cjevovoda izvršiti na različite načine. Tako, npr., svaka turbinu može imati svoj vlastiti cjevovod ili sve turbine imaju zajednički cjevovod. Izvedbu tlačnih cjevovoda i zapornih organa na početku i kraju cjevovoda prikazuje shema hidroelektrane (sl. 13). Ako je svaka od turbin spojena na poseban tlačni cjevovod, nije prijeko potrebno da se na dnu cjevovoda pred turbinom postavi poseban zaporni organ (sl. 13a), jer se dovod vode turbinu može zatvoriti zapornim organom na ulazu u cjevovod. Takvo je rješenje, međutim, ne-povoljno, jer se nakon obustavljanja pogona cjevovod isprazni, pa je pri ponovnom stavljanju u pogon potrebno izvjesno vrijeme za punjenje cjevovoda.

Trajanje punjenja cjevovoda to je dulje što je duljina cjevovoda veća, a dugo čekanje je to nepovoljnije što je važnost hidroelektrane u sistemu veća. Ovdje treba napomenuti da lopatice privodnog kola (Francisove turbine) odnosno igla sapnice (Peltonove turbine) normalno ne brtve tako da bi se mogla sačuvati voda u cjevovodu nakon obustavljanja turbine. Zbog toga se u hidroelektranama većeg značenja za elektroenergetski sistem postavljaju zaporni organi i ispred turbine (sl. 13 b). Kad je priključeno više turbin na zajednički cjevovod, postavljaju se zaporni organi tako da — i pored obustave pogona na jednoj od turbin — bude osiguran normalan pogon ostalih turbin. Radi toga se pred svaku turbinu postavljaju zaporni organi (sl. 14). Vrlo često se pred turbinu postavljaju dva zaporna organa, pogonski na strani turbine i sigurnosni na strani cjevovoda. Sigurnosni organ ima zadatak da omogući pregled i popravke pogonskog zapornog organa bez obustavljanja ostalih turbin.

Uredaji za zaštitu od vodnog udara. U slučaju zatvaranja dovoda vode doći će do povišenja tlaka, tj. do vodnog udara u cjevovodu kojim se dovodi voda turbinu. Visina tlaka zavisi od trajanja zatvaranja zatvarača na dnu tlačnog cjevovoda. S pro-duljenjem vremena zatvaranja zatvarača smanjuje se povišenje tlaka u cjevovodu, što omogućuje upotrebu cjevovoda s tanjim stijenkama, odnosno lakšeg i stoga jeftinijeg cjevovoda. S gledišta troškova zato je povoljno za cjevovod odabratи što dulje vrijeme za zatvaranje dovoda vode turbinu. Preporuča se — s obzirom na dimenzioniranje cjevovoda — da za padove do 50 m omjer maksimalnog i statičkog tlaka bude $H_{\max}/H \leq 1,50$, za padove do 150 m, $H_{\max}/H \leq 1,25$, za padove iznad 250 m, $H_{\max}/H \leq 1,15$. Međutim, ako gore postavljena ograničenja zahtijevaju vrlo duga



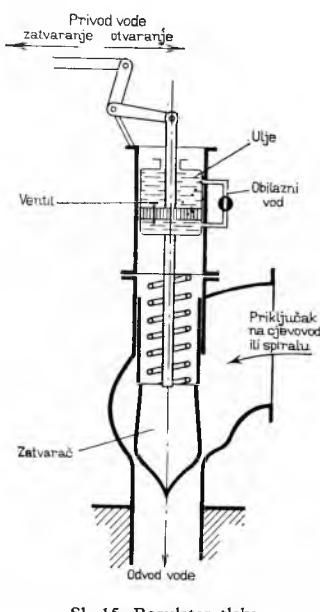
Sl. 13. Sheme spoja hidroelektrana s posebnim cjevovodima za svaku turbinu



Sl. 14. Shema spoja hidroelektrane sa zajedničkim tlačnim cjevovodom

vremena zatvaranja, potrebno je predvidjeti uredaj za zaštitu od vodnog udara na kraju cjevovoda.

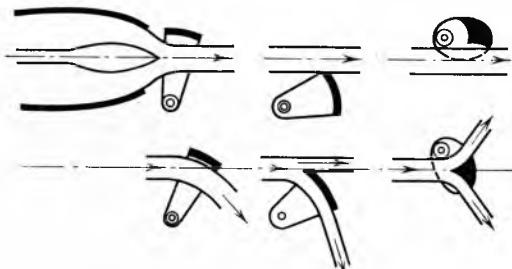
Za Francisove turbine takav je uredaj regulator tlaka koji se postavlja na kraj tlačnog cjevovoda ispred turbinske spirale. Ovaj uredaj služi za to da u slučaju naglog zatvaranja privodnog kola turbine automatski otvara poredni otvor u istoj mjeri kako se zatvara dovod vode turbini. Na taj način nema smanjenja protoka vode kroz cjevovod, jer voda struji istom brzinom kao i prije zatvaranja privoda turbini, ali voda ne dolazi u turbinu nego istječe kroz poredni otvor. Ako je regulator tlaka dobro konstruiran, neće doći do vodnog udara. U slučaju polaganog zatvaranja privoda vode, kao što se to dogada u normalnom pogonu, regulator tlaka ne treba da djeluje, a za povišenje tlaka koje nastaje pri takvom zatvaranju cjevovod mora biti dimenzioniran.



Sl. 15. Regulator tlaka

kratko, kako ne bi došlo do vodnog udara, a niti preduzgo, kako se ne bi gubilo previše vode. Kad se privod vode turbini zatvara polako, stup može slijediti pomak a da ne dode do otvaranja zatvarača. Kod brzog porasta opterećenja turbine regulator otvara privod turbini i pomiče stup prema dolje. Da bi taj pomak stup bio dovoljno brz i pored prigušenja u obilaznom vodu, ugrađen je u stup ventil koji se pri pomaku stupa naniže otvara i propušta ulje.

U Peltonovoj turbi ni isti se rezultat postiže otklanjačem mlaza koji je postavljen pred otvor sapnice. U normalnom pogonu otklanjač mlaza postavljen je tako da mlaz iz sapnice bez zapreke udara u lopaticu (sl. 16). U slučaju naglog smanjenja opterećenja



Sl. 16. Otklanjači mlaza

otklanjac mlaza postavlja se pred sapnicu i otklanja mlaz od lopaticice, pa se na taj način brzo smanjuje dovod vode turbini a da se ne smanjuje protok vode kroz cjevovod. Da se spriječi suviše veliki gubitak vode, istodobno s otklanjanjem mlaza počinje zatvaranje sapnice, koje je znatno polaganije, da bi se povišenje

tlaka u cjevovodu održalo u unaprijed određenim granicama. Na sl. 16 prikazane su tri izvedbe otklanjača mlaza, od kojih se u posljednjoj mlaz dijeli na dva dijela, pa jedan dio vode udara u stražnje strane lopatice i na taj način koči turbinu.

Kolikogod je dulje trajanje zatvaranja privoda vode turbini povoljno s gledišta povišenja tlaka u cjevovodu, ono je nepovoljno s gledišta povećanja broja okretaja rasterećenog agregata. Iako je generator konstruiran za broj okretaja pobjega turbine, pobjeg turbine nije poželjan zbog znatnih naprezanja materijala. Zbog toga se dozvoljava da u najnepovoljnijem slučaju, nakon potpunog rasterećenja generatora, broj okretaja aggregata naraste najviše 20...30% iznad nazivnog broja okretaja. Uz određeno vrijeme zatvaranja dovoda vode može se porast broja okretaja za određeni aggregat smanjiti povećanjem momenta tromosti rotirajućih dijelova aggregata. Praktički je dovoljno uzeti u obzir samo rotor generatora, jer on predstavlja daleko najveći dio rotirajućih masa. Uobičajilo se je da se mjesto momenta tromosti, koji je definiran izrazom $I = r^2 dm$, gdje je r udaljenost od središta mase dm , upotrebljava veličina GD^2 , gdje je G težina rotora reducirana na obod rotora, a D promjer rotora. Veza između momenta tromosti i GD^2 odredena je relacijom $GD^2 = 4gI$. Generator istih ostalih karakteristika može se konstruirati za različite GD^2 , ali odstupanje od onog GD^2 (nazovimo ga prirodni GD^2) uz koji se postiže optimalna konstrukcija generatora traži po pravilu povećanje težine generatora a time njegovo poskupljenje. Na sl. 17 prikazana je približna zavisnost povećanja težine generatora od povećanja veličine GD^2 .

Neki autori kao karakteristiku postrojenja uzimaju relaciju

$$C = \frac{L v}{g H t_R}, \quad (8)$$

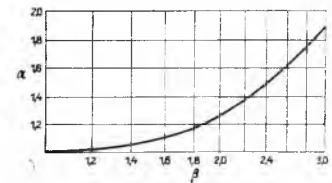
gdje je L duljina cjevovoda, v maksimalna brzina vode u cjevovodu, g ubrzanje Zemljine teže, H bruto-pad, a t_R trajanje zatvaranja dovoda vode. Na osnovi te karakteristike se postrojenja mogu klasificirati u tri grupe. U prvu grupu spadaju postrojenja koja imaju $C \leq 0,10$; za njih nije potrebno ni ograničavanje tlaka (regulatorom tlaka, otklanjačem mlaza, vodnom komorom između tlačnog dovoda i tlačnog cjevovoda) ni povećanje veličine GD^2 generatora. Za postrojenja kod kojih je $0,10 < C \leq 0,20$ obično je najpovoljnije rješenje povećanje veličine GD^2 generatora, a kad je $C > 0,20$, potrebni su uredaji za ograničenje tlaka (bilo samo vodna komora, bilo i vodna komora i regulator tlaka ili otklanjač mlaza).

Generatori zajedno s turbinama smješteni su u strojarnici. Vodne turbine pogone generatore izravno preko svojeg vratila. Hidrogeneratori se grade pretežno u vertikalnoj izvedbi zbog ekonomičnije izvedbe hidrauličkog dijela elektrane. Generatori s horizontalnim vratilom susreću se u postrojenjima manje snage i kad dvije Peltonove ili Francisove turbine pogone jedan generator. Hidrogeneratori (od sporohodnih do brzohodnih) grade se s istaknutim polovima u širokom rasponu snaga i do 500 MVA.

U pumpnim akumulacijskim hidroelektranama često se susreću kombinacije turbine, pumpe i generatora na istom vertikalnom vratilu. U tom slučaju sinhroni stroj radi povremeno kao generator a povremeno kao motor (v. Sinhroni električni strojevi u članku Električni strojevi). Ima i slučajeva u kojima turbinu radi i kao pumpa.

Električni spoj generatora, pojedini strujni krugovi elektrane, zaštita generatora i faktori koje valja uzeti u obzir prilikom konstrukcije generatora za elektranu obrađeni su u kasnijim poglavljima ovog članka (v. str. 575).

U strojarnici smješteni su osim aggregata hidroelektrane još i upravljački pult i drugi pomoćni uredaji za pogon, montažu i popravke (mosna dizalica itd.). S obzirom na smještaj strojarnice može se razlikovati strojarnica na slobodnom i ukopana strojarnica.



Sl. 17. Utjecaj povećanja GD^2 na povećanje težine generatora.
 $\alpha = \frac{\text{povećana težina}}{\text{minimalna težina}}$
 $\beta = \frac{\text{povećani } GD^2}{\text{prirodni } GD^2}$

Iznimno se ukopana strojarnica izvodi sa svrhom da bude zaštićena od napadaja iz uzduha, ali u većini slučajeva ukopavanje su diktirali topografski i ekonomski razlozi.

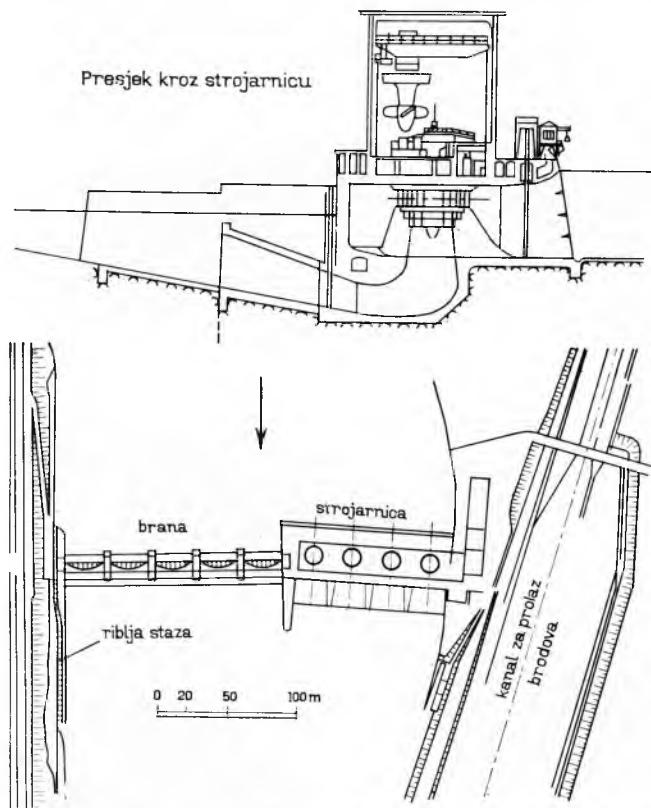
Rasklopno postrojenje elektrane u većini slučajeva smješteno je u samoj zgradi ili neposredno uz nju. Samo u iznimnim slučajevima rasklopno se postrojenje nalazi daleko od strojarnice.

Ovod vode izveden je ili kao tunel ili kao kanal, a zadatak mu je da vodu nakon iskorištenja u turbinama vrati u korito vodotoka ili da je doveđe do zahvata slijedeće hidroelektrane.

Tipovi hidroelektrana. Radi što racionalnijeg korištenja vodnih snaga treba prije izgradnje postrojenja izraditi osnovni projekat iskorištenja vodotoka, kojim se rješava način njegova korištenja od izvora do ušća. Pri tomu ne treba imati u vidu samo energetsko korištenje vode, nego i zahtjeve poljoprivrede (natapanje, odvodnjavanje), opskrbu vodom (za piće i napajanje stoke), zahtjeve za sprečavanje bujica, održavanje riba i prirodnih ljepota, osiguravanje i povećanje mogućnosti plovidbe i dr. Uskladjenje svih tih zahtjeva i postizanje optimalnog rješenja s obzirom na narodnu privredu zadatak je osnovnog projekta za iskorištenje vodotoka.

Niz hidroelektrana uz ostala postrojenja na vodotoku (za natapanje i odvodnjavanje, za plovidbu i dr.) naziva se hidroenergetskim sistemom.

Način izvedbe hidroelektrane zavisi, osim od hidroenergetskog iskorišćenja cijelog vodotoka i naprijed iznijetih drugih uvjeta,



Sl. 18. Strojarnica zamjenjuje dio brane (hidroelektrana Birsfelden na Rajni)

još i od topografskih i geoloških prilika i od pogonskih zahtjeva koji se postavljaju postrojenju. Zadovoljenje svih tih uvjeta traži za svaki konkretni slučaj specifično rješenje.

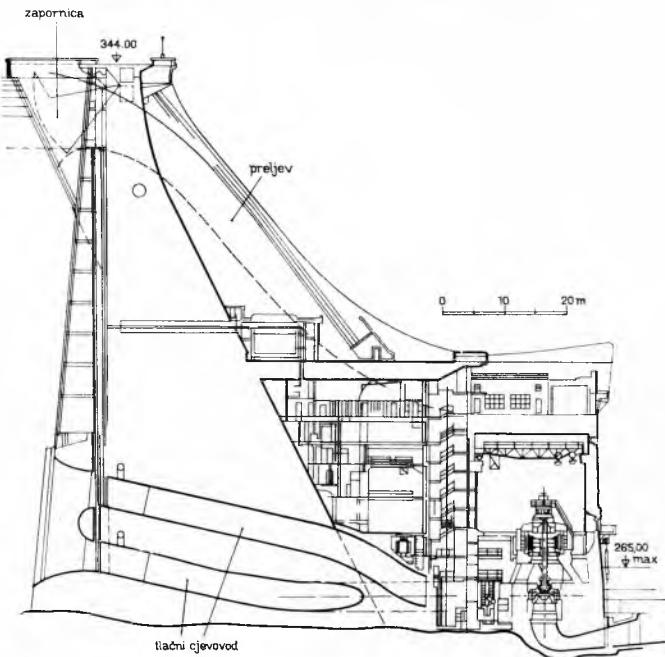
Izbor tipa hidroelektrane zavisi, dakle, od niza faktora koji utječu na racionalnu i ekonomičnu izgradnju postrojenja, pa je nemoguće navesti pravila za izbor tipa postrojenja. Opisat će se stoga — radi ilustracije — tipični primjeri izvedenih postrojenja.

S obzirom na izvedbu hidroelektrane se mogu podijeliti na dvi veleke grupe: pribranske i derivacijske hidroelektrane.

Pribranske hidroelektrane imaju strojarnicu koja je smještena uz branu, unutar same brane ili je izvedena kao dio brane. U svim tim slučajevima postaje nepotrebna dovod, vodna komora i odvod,

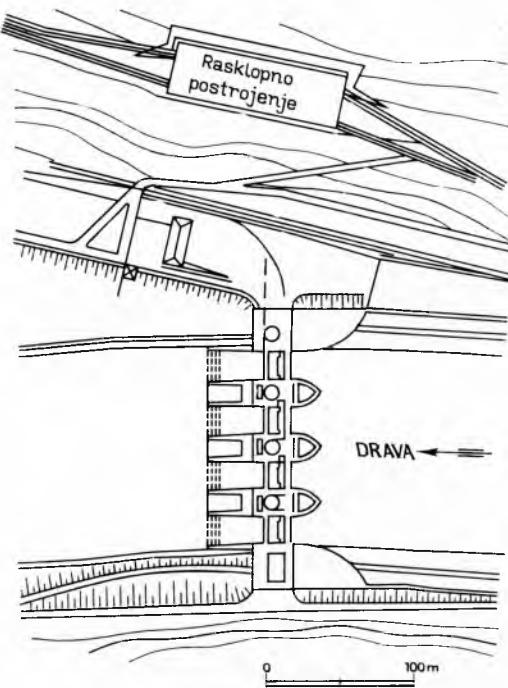
a zahvat i tlačni cjevovod predstavljaju dio brane, odnosno strojarnice. Tu se mogu razlikovati dva krajnja slučaja: prvi kad strojarnica zamjenjuje dio brane i drugi kad se strojarnica nalazi u samoj brani ili neposredno uz podnožje brane. Prvo rješenje je moguće samo kad se radi o malom padu, pa brana ima razmjerno malu visinu.

Među pribranske elektrane prvog tipa spadaju obično hidroelektrane na velikim rijekama sa širokim koritom (sl. 18), a među



Sl. 19. Strojarnica u brani (hidroelektrana L'Aigle na rijeci Dordogne u Francuskoj)

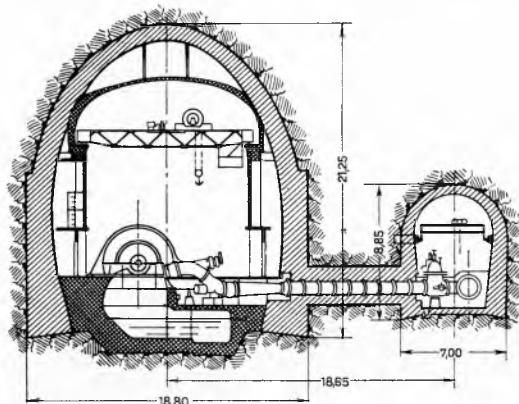
takve elektrane drugoga tipa hidroelektrane na vodotocima s uskim koritom (sl. 19). Jedno je od mogućih rješenja da se — kad je pad malen — svaki od agregata postavi u jedan stup brane,



Sl. 20. Smještaj agregata u stupovima brane hidroelektrane Vuzenica na Dravi

pa se na taj način dolazi do onoliko odvojenih strojarnica koliko ima agregata (sl. 20).

Derivacijske hidroelektrane imaju po pravilu sve dijelove hidroelektrana. S obzirom na dovod mogu se te hidroelektrane podijeliti na dvije grupe: hidroelektrane s tlačnim dovodom i hidroelektrane s gravitacijskim dovodom. Dalje se mogu razlikovati:



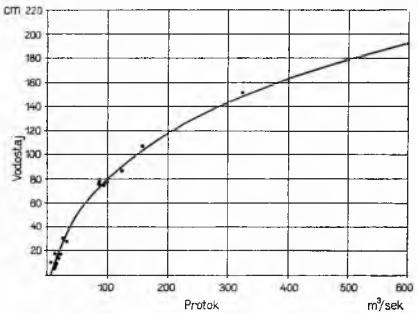
Sl. 21. Ukopana strojarnica hidroelektrane Vinodol

hidroelektrane sa strojarnicom na otvorenom i hidroelektrane s ukopanom strojarnicom (sl. 21).

Karakteristike hidroelektrana mogu se podijeliti u četiri grupe: hidrološke karakteristike vodotoka na zahvatu za hidroelektranu, karakteristike akumulacije i pada, energetske karakteristike i ekonomske karakteristike hidroelektrane.

Hidrološke karakteristike hidroelektrana jesu veličina, raspored i trajanje protoka. Mogućnost proizvodnje u hidroelektrani zavisi od količine vode koju donosi vodotok, pa je poznavanje te količine i po veličini i po vremenskom rasporedu od osnovne važnosti i za projektiranje i za pogon hidroelektrane.

Količina vode u vodotoku i vremenski raspored tih voda zavisna je od niza utjecaja (oborina, sastava i topografije zemljишta, temperature zraka, biljnog pokrivača i dr.) pa kao osnova za utvrđivanje količine vode mogu poslužiti samo svakodnevna mjerenja količina vode. Ta mjerenja se provode pomoću vodokaza, na kojima se očitava visina nivoa vode. Ta visina vode naziva se *vodostaj*.



Sl. 22. Konsumpciona krivulja za profil Gordunska Mlinica na rijeci Cetini

Pomoću vodostaja (u cm) može se iz konsumpcione krivulje očitati *protok* vode (u m^3/sek). Konsumpciona krivulja (sl. 22) konstruirana je na temelju posebnih mjerena, a zavisna je od oblika korita na mjestu vodokaza.

Na osnovi određenih (srednjih) dnevnih protoka ($Q \text{ m}^3/\text{sek}$) može se nacrtati *godišnji dijagram protoka* (sl. 23) u kojemu su kronološki poredani protoci. Pomoću podataka o dnevnim protocima mogu se odrediti srednji desetodnevni protoci (dekadni protoci), srednji mjesечni protoci i, konačno, srednji godišnji protok. Svi ti srednji protoci određeni su kao aritmetičke sredine dnevnih protoka u promatranom periodu.

Ako se nacrtava dijagram u kojemu su dnevni protoci uneseni redom po veličini od najvećeg do najmanjeg, dobiva se *krivulja trajanja protoka* (sl. 23 krivulja b).

Integriranjem godišnjeg dijagrama protoka ili krivulje trajanja protoka (što daje isti rezultat) dobiva se volumen vode (V_0) koji

je protekao kroz promatrani profil u promatranoj godini. Pri tome kao apscisu treba uzeti protekli broj sekunda. *Srednji godišnji protok* može se tada izračunati prema formuli:

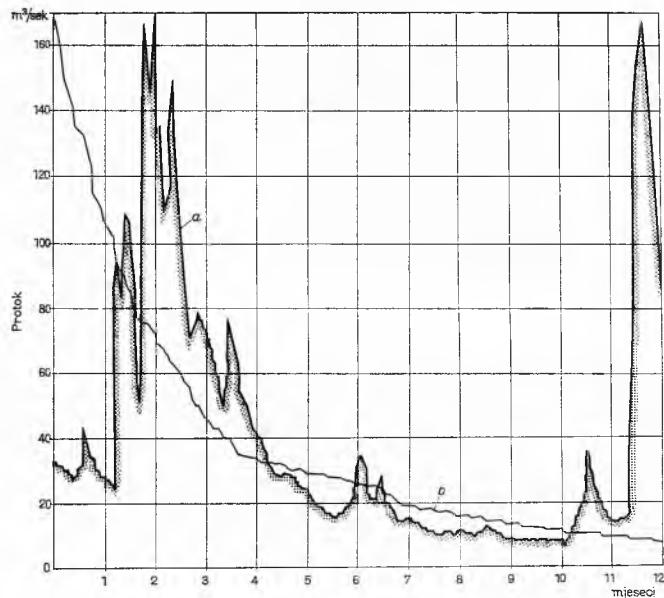
$$Q_s = \frac{V_0}{31,54 \cdot 10^6} \text{ (m}^3/\text{sek}), \quad (8)$$

gdje je V_0 volumen u m^3 , a $31,54 \cdot 10^6$ broj sekunda u godini.

Promatranje protoka u samo jednoj godini može dovesti do krivih zaključaka o količinama i rasporedu voda u promatranom vodotoku, pa je potrebno promatranje protegnuti na dulji vremenski period.

Osim krivulja trajanja protoka u kojima su uneseni podaci iz cijele godine, mogu se nacrtati krivulje trajanja protoka za pojedina razdoblja u godini (zimu i ljeto ili sušni i kišni period) ili krivulje trajanja za pojedine mjesecce. Ako se hoće nacrtati krivulja trajanja npr. za mjesec januar, uvažit će se podaci za sve januare u promatranom razdoblju.

Karakteristike akumulacije i pada jesu: volumen akumulacijskog bazena, njegova energetska vrijednost i pad.



Sl. 23. Godišnji dijagram protoka rijeke Krke kod Skradinskog Buka u 1947.
a Krivulja protoka, b krivulja trajanja protoka

Razlikuje se geometrijski i korisni volumen akumulacijskog bazena. *Geometrijski volumen akumulacijskog bazena* je ukupni volumen vode koji se može spremiti između tla na dnu i najviše razine vode u akumulacijskom bazenu. Normalno se ne koristi sav raspoloživi volumen akumulacije, jer se za male volumene akumulirane vode naglo smanjuje pad, pa to dovodi do znatnog smanjenja snage, a s time i proizvodnje, pa je šteta od toga veća nego dobitak od iskorištenja tog malog volumena akumulirane vode. *Korisni volumen akumulacijskog bazena* je volumen vode koji se može spremiti između ravnije i najniže razine u normalnom pogonu; to je volumen koji se i koristi u normalnom pogonu. Najniža razina vode pri tom ne mora biti jednakoj razini za slučaj pražnjenja radi pregleda i popravka. Za energetska razmatranja od naročite je važnosti korisni volumen akumulacijskog bazena; samo on ima utjecaja na reguliranje protoka.

Da bi se karakterizirao korisni volumen s obzirom na hidroelektranu, uvodi se *vrijeme trajanja pražnjenja akumulacijskog bazena*. To je minimalno vrijeme potrebno da korisni volumen istječe kroz turbine, pretpostavljajući da za to vrijeme nema dotoka u akumulaciju. Protočnom hidroelektranom smatra se hidroelektrana čiji se akumulacijski bazen može isprazniti za manje od dva sata; za pražnjenje bazena hidroelektrane s dnevnom akumulacijom potrebno je od 2 sata do 400 sati, a za pražnjenje bazena hidroelektrane sa sezonskom akumulacijom potrebno je više od 400 sati.

Korisni volumen se može prikazati i kao *relativni volumen* u odnosu na ukupni volumen vode koji tokom godine dođe u akumulaciju.

Pored toga, akumulacijski bazen se karakterizira *energetskom vrijednošću*. Pod njom se razumijeva količina električne energije koja bi se proizvela u vlastitoj hidroelektrani i u svim nizvodnim hidroelektranama kad bi se ispraznio korisni volumen bez dotoka vode u bazen i bez gubitka vode.

U hidroelektrani se razlikuju *prirodni pad ili bruto-pad* i *korisni pad ili neto-pad*. Prirodnim ili bruto-padom H_b naziva se razlika između nivoa vode na zahvatu (gornje vode) i nivoa vode nakon povratka u korito ili na kraju odvoda (donje vode). To je, dakle, pad koji nam pruža priroda. Zbog gubitaka u zahvatu, dovodu, tlačnom cjevovodu i odvodu na ulazu u turbinu stoji na raspolaganju tlak koji je, mjerjen u metrima stupca vode (m s. v.), manji od prirodnog pada. Tlak na ulazu u turbinu može se izmjeriti manometrom (M na sl. 24). Kako manometar pokazuje samo statički tlak (h u m s. v.) treba još uvažiti i brzinske visine na ulazu (v_1) i na izlazu (v_2) turbine. Osim toga treba još uračunati i položaj manometra (h) iznad nivoa vode na izlazu iz turbine. Poznavajući sve te veličine može se odrediti tlak koji vlada na ulazu u turbinu:

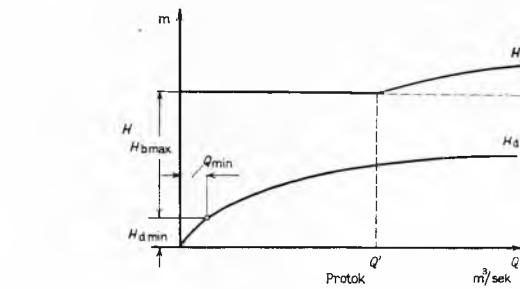
$$H_n = h_m + h + \frac{v_1^2}{2g} - \frac{v_2^2}{2g} \quad (\text{m s. v.}) \quad (9)$$

Tlakom (visinom) H_n određen je neto-pad u hidroelektrani.

Iraz (9) vrijedi za reakcione turbine (Francisovu, Kaplanovu, propellersku turbinu). Za akcione turbine (Peltonove) h je položaj manometra iznad srednjeg nivoa sapnice, a za brzinu na izlazu postavlja se $v_2 = 0$.

Ni bruto-pad ni neto-pad nisu konstantni. Na prvi utječu promjene nivoa donje i gornje vode, a na drugi osim promjena nivoa još i promjena gubitaka.

Promjene nivoa gornje vode mogu nastati zbog preljeva velikih voda preko brane, do čega dolazi kad se sva suvišna voda ne može propustiti kroz ispuste. U ovom slučaju nivo gornje vode zavisan je od protoka (sl. 25), ali samo za protoke koji su veći od protoka Q' zavisnog od kapaciteta ispusta i veličine izgradnje hidroelektrane. U pribranskim hidroelektranama i u akumulacijskim hidroelektranama s tlačnim dovodom bruto-pad, a prema tomu i neto-pad, zavisan je od volumena akumulirane vode. Ta zavis-



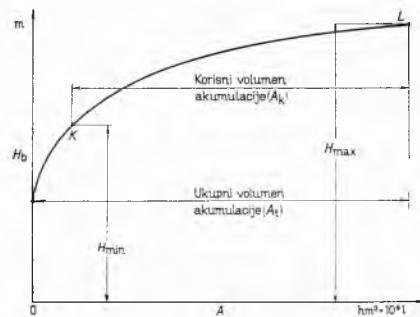
Sl. 24. Određivanje neto-pada u hidroelektrani s tlačnim cjevovodom

nost prikazuje se krivuljom $H_b = f(A)$, koja je prikazana na sl. 26. Za promatranu hidroelektranu maksimalni bruto-pad određen je ukupnim volumenom akumulacije, a minimalni bruto-pad korisnim volumenom akumulacije.

Promjene nivoa donje vode zavise su od količine vode koja protjeće koritom rijeke na kraju odvoda, i to bez obzira na to da li voda dođe koritom mimo hidroelektrane ili kroz turbine hidroelektrane. Nivo donje vode raste s povećanjem protoka (v. sl. 25), a oblik krivulje zavisi od profila korita.

Razlikom nivoa određen je bruto-pad. Najveći bruto-pad pojavljuje se u doba najmanjih protoka (Q_{\min}), dokle onda kad je nivo donje vode najniži.

Promjena pada ima velik utjecaj na snagu i moguću proizvodnju hidroelektrana malog pada (do ~ 50 m); u hidroelektranama većeg pada ta promjena često se može zanemariti.



Sl. 26. Zavisnost bruto-pada H_b od volumena akumulirane vode A

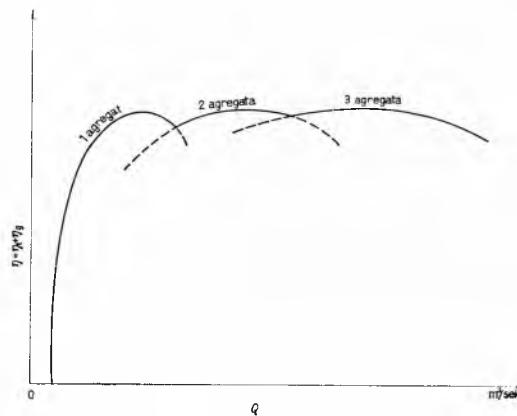
Da bi se odredio neto-pad, treba od bruto-pada odbiti gubitke u svim dovodnim organima. Gubici pada približno su proporcionalni kvadratu protoka; oni su to veći što je duljina dovodnih organa veća i što je površina presjeka tih organa manja. Budući da su dovodni organi u hidroelektranama malog pada obično kratki, može se reći da u tim hidroelektranama odlučan utjecaj na promjenu neto-pada ima promjenu bruto-pada, dok u hidroelektranama velikog pada promjenu neto-pada u najvećoj mjeri izazivaju gubici u dovodima.

Energetske karakteristike hidroelektrane. Snaga koju hidroelektrana daje na priključnicama generatora može se odrediti iz jednadžbe

$$P = g Q H_n \eta_t \eta_g \varrho, \quad (10)$$

gdje je Q protok koji dođe turbinama, H_n neto-pad koji stoji na raspolaganju, a η_t i η_g stupnjevi djelovanja turbinu odnosno generatora, $\varrho = 1000 \text{ kg/m}^3$, gustoća vode.

Stupnjevi djelovanja i turbina i generatora zavise od opterećenja i od broja agregata koji se nalaze u pogonu. Sl. 27 prikazuje



Sl. 27. Stupanj djelovanja hidroelektrane

promjenu stupnja djelovanja u zavisnosti od protoka, za slučaj da u hidroelektrani postoje tri agregata. Stupanj djelovanja pri optimalnom opterećenju u modernim hidroelektranama iznosi i do 90%. Prosječni je stupanj djelovanja korištenja potencijalne energije vode niži i iznosi za veća postrojenja $\sim 80\%$, a za manja postrojenja $\sim 75\%$.

Za određivanje snage kad nisu poznati stupnjevi djelovanja može se upotrijebiti približna formula

$$P = k Q H_n. \quad (11)$$

Vrijednost veličine k zavisi od snage agregata u hidroelektrani i od jedinica u kojima su izraženi P , Q i H_n . Za veće hidroelektrane.

s agregatima snage $P > 10$ MW, aproksimativni izraz glasi $P = 8 Q H_n$ (P u kW, Q u m^3/s , H_n u m), a za hidroelektrane s agregatima manje snage je $k < 8$. Veličine k obično se određuju linearnom interpolacijom uz pretpostavku da je $k = 7,5$ za elektrane s agregatima snage $P = 1$ MW.

Mogućom dnevnom ili godišnjom proizvodnjom hidroelektrane naziva se ona količina energije koju bi hidroelektrana mogla proizvesti s obzirom na protoke, pad, stupanj djelovanja i veličinu izgradnje. Pored toga, hidroelektrana se karakterizira *mogućom srednjom godišnjom proizvodnjom* (GWh), koja je odredena kao aritmetička sredina mogućih godišnjih proizvodnja u promatranoj, što duljem, nizu godina. Pri određivanju raspoloživog dotoka vode treba uzeti u obzir postojanje bilo vlastite akumulacije bilo akumulacije u uzvodnim hidroelektranama. Također treba uzeti u obzir eventualne potrebe vode za plovidbu, poljoprivredu i slično. Pri tom treba pretpostaviti da su svi dijelovi postrojenja sposobni za pogon, da ne postoje ograničenja u mogućnosti preuzimanja energije, da ne postoje ograničenja proizvodnje zbog utjecaja mreže (rezerva, proizvodnja jalove snage, regulacija frekvencije i sl.). *Stvarna proizvodnja hidroelektrane* po pravilu je niža od moguće proizvodnje, uglavnom — u nekim razdobljima godine i dana — zbog toga što je mogućnost proizvodnje veća od potražnje potrošača.

Određivanje moguće proizvodnje najzgodnije je provesti pomoću krivulje trajanja ili krivulje vjerojatnosti protoka. Površina ispod krivulje trajanja prikazuje volumen vode (V) koji stoji na raspolažanju:

$$V = \int_0^Q t \, dQ, \quad (12)$$

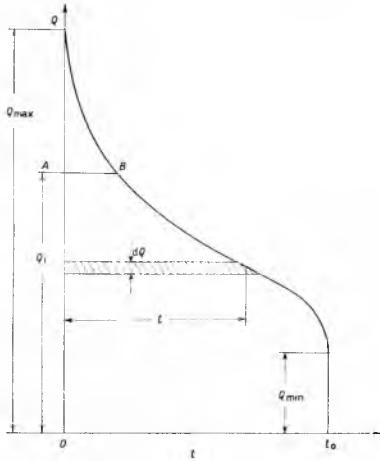
gdje je t trajanje protoka (sl. 28).

Iskorištenje vode ograničeno je veličinom izgradnje hidroelektrane. *Veličinom izgradnje* naziva se maksimalni protok koji se može koristiti u hidroelektrani u normalnom pogonu uveziv u obzir sve dijelove postrojenja.

Određenoj veličini izgradnje (Q_i) odgovara, dakle, iskoristivi volumen vode V_i :

$$V_i = \int_0^{Q_i} t \, dQ, \quad (13)$$

koji je prikazan površinom $O A B t_0$ na sl. 28.



Sl. 28. Određivanje iskoristivog volumena vode

Kad se poznaje iskoristivi volumen (V_i), moguće je odrediti i *srednji iskoristivi protok*

$$Q_{si} = \frac{V_i}{t_0} = \frac{V_i}{31,54 \cdot 10^6} \text{ (m}^3/\text{s}), \quad (14)$$

gdje je V_i volumen u m^3 , a $31,54 \cdot 10^6$ broj sekunda u godini. Srednji iskoristivi protok (Q_{si}) manji je od srednjeg protoka vodotoka (Q_s), a njihov omjer V_i/V_0 daje stupanj iskorištenja vode vodotoka.

Kao prva aproksimacija može se odrediti moguća proizvodnja uz pretpostavku konstantnog stupnja djelovanja — pomoću veličine k u jedn. (11) — i konstantnog neto-pada. Tada je srednja snaga hidroelektrane

$$P_s = k Q_{si} H_n, \quad (15)$$

a moguća godišnja proizvodnja u kilovatsatima

$$W = 8760 k Q_{si} H_n. \quad (16)$$

Moguća proizvodnja može se odrediti i pomoću iskoristivog volumena. Koristeći se jednadžbom (14) dobiva se

$$W = \frac{k V_i H_n}{3600}, \quad (17)$$

ili za $k = 8$

$$W = \frac{V_i H_n}{450} \quad (18)$$

(u kWh ako se V_i uvrsti u m^3 a H_n u metrima).

Za promatrano postrojenje moguća proizvodnja — uz zadani način korištenja hidroelektrane — zavisi samo od veličine izgradnje. Povećanjem veličine izgradnje raste i moguća proizvodnja, ali to sporije što je veličina izgradnje veća (sl. 29).

Ako je potrebno tačnije odrediti moguću proizvodnju — a to i jest u nekim slučajevima — može se upotrijebiti grafička metoda prikazana na sl. 30. Uzravanjem krivulja $H_n = f(t)$ i $\eta = f(t)$ u isti dijagram s krivuljom trajanja $Q = f(t)$, te množenjem ordinata tih krivulja dobiva se — pomoću izraza (10) — krivulja $P = f(t)$, koja predstavlja krivulju snage. Planimetrijem površine ispod krivulje $P = f(t)$ dobiva se moguća proizvodnja.

Sada je moguće konstruirati krivulju $W = f(Q_i)$, prikazanu na sl. 29, ali za svaku promjenu veličine izgradnje treba ponovo konstruirati krivulju $\eta = f(t)$ i $H_n = f(t)$. Pad i stupanj djelovanja obično su poznati u zavisnosti od protoka, dakle poznate su funkcije $H_n = f(Q)$ i $\eta = f(Q)$. Konstrukcijom na sl. 31 može se pomoći krivulje $H_n = f(Q)$, a preko krivulje $Q = f(t)$, odrediti krivulja $H_n = f(t)$. Analognim postupkom može se konstruirati krivulja zavisnosti $\eta = f(t)$.

Tako odredena moguća proizvodnja predstavlja *srednju moguću godišnju proizvodnju*, tj. proizvodnju koja se može u prosjeku očekivati u duljem nizu godina. Na isti način moguće je odrediti i moguću proizvodnju u pojedinim godinama, ako se račun provede prema krivuljama trajanja za pojedine godine, a ne prema krivuljama trajanja za niz godina.

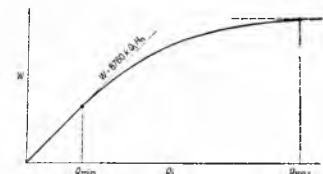
Ekonomski karakteristike hidroelektrane. Među ekonomski pokazatelje značajne za hidroelektrane ubrajaju se troškovi izgradnje i proizvodna cijena električne energije.

Pod *troškovima izgradnje hidroelektrane* razumijevaju se troškovi investicija za sve objekte od zahvata do odvoda, uključivši odštete za eventualno poplavljeno zemljište i domove, za premještanje cesta i sl.

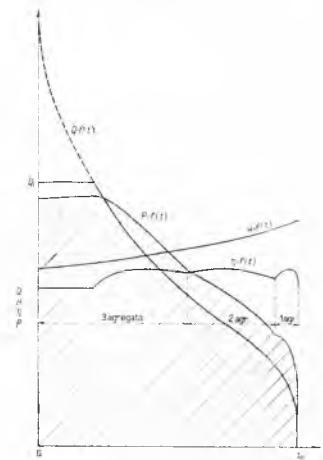
Zavisnost troškova izgradnje I od veličine izgradnje Q_i može se aproksimativno prikazati pravcem:

$$I = A + B_1 Q_i, \quad (19)$$

gdje su A i B_1 konstante koje zavise od tipa hidroelektrane, od duljine dovoda i odvoda, od izvedbe i veličine brane i ostalih dijelova postrojenja, od pada.



Sl. 29. Zavisnost moguće proizvodnje W od veličine izgradnje Q_i hidroelektrane



Sl. 30. Određivanje moguće proizvodnje hidroelektrane

Omjer između troškova izgradnje i moguće godišnje proizvodnje,

$$i = \frac{I}{W} = \frac{A + B_1 Q_i}{W}, \quad (20)$$

naziva se *specifičnim investicijama po jedinici energije* (Din/kWh). Veličina i daje neki uvid u ekonomičnost promatrane hidroelektrane, ali usporedba hidroelektrana samo s obzirom na tu veličinu može dovesti do križnih zaključaka.

Troškovi izgradnje hidroelektrane mogu se također prikazati i u zavisnosti od instalirane snage. Tada su investicije određene izrazom

$$I = A + B P_i, \quad (21)$$

gdje je A ista konstanta kao u jedn. (19), a B je određeno izrazom $B = B_1/k H_n$, u kojem je k konstanta iz jednadžbe za izračunavanje snage iz pada i protoka (jedn. 11), a H_n neto-pad. *Specifične investicije po jedinici instalirane snage* (Din/kW) dobivaju se dijeljenjem izraza (21) s P_i :

$$i_p = \frac{A}{P_i} + B. \quad (22)$$

Specifične investicije po jedinici instalirane snage s povećanjem instalirane snage postaju sve manje, pa usporedba hidroelektrana s obzirom na specifične investicije po jedinici snage nema smisla. To pogotovo vrijedi u slučaju relativno velikih veličina izgradnje kod kojih povećanje veličine izgradnje donosi neznatno povećanje moguće proizvodnje, a znatno povećanje specifičnih investicija po jedinici energije.

Veličina A u jedn. (22) zavisi od onih dijelova postrojenja na koje nema utjecaja veličina izgradnje hidroelektrane (od brane, pristupnih putova, odšteha i sl.), a osim toga na taj član imaju utjecaja geološke i topografske prilike na mjestu izgradnje hidroelektrane. Konstanta B_1 u jedn. (22) može se prikazati kao zbroj dviju veličina:

$$B_1 = B_{1L} + B_{1H}, \quad (23)$$

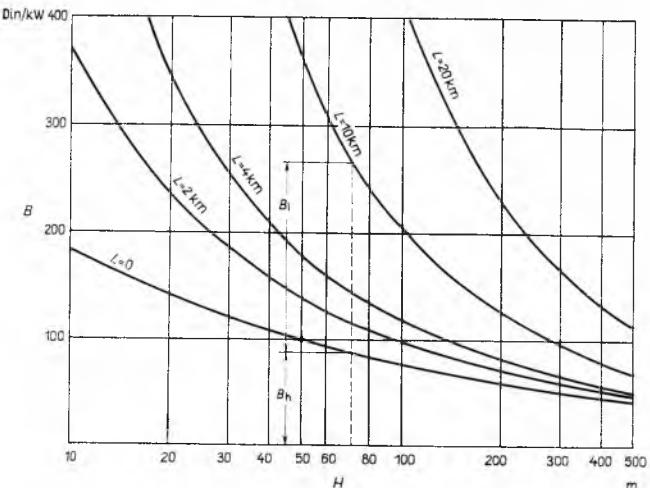
od kojih prva (B_{1L}) zavisi od duljine i izvedbe dovoda i odvoda vode, od izvedbe zahvata i vodne komore (odnosno vodostana), a druga (B_{1H}) zavisi od pada. U drugoj konstanti obuhvaćen je porast troškova izgradnje po jedinici protoka za tlačni cjevovod, glavnu opremu (turbinе, generatore i transformatore), pomoćne pogone i zgradu strojarnice.

Veličina B_{1L} u jednadžbi (23) u najvećoj je mjeri zavisna od duljine voda (L), a tek u maloj mjeri od veličine izgradnje (Q_i). Za manji interval vrijednosti Q_i , može se stoga utjecaj promjene veličine izgradnje zanemariti. Dijeljenjem sa $8 H_n$ dobiva se konstanta B , koja prikazuje prirast investicija za dovod po jedinici prirasta instalirane snage, pa je sada $B = f(L, H)$.

Veličina B je dakle jednak

$$B = B_L + B_H. \quad (24)$$

I veličina B_L i veličina B_H predstavljaju, dakle, dodatne investicije za povećanje veličine izgradnje za jedinicu protoka, odnosno za povećanje instalirane snage za 1 kW. Dodatne investicije po jedinici protoka rastu s povećanjem pada, a dodatne investicije po jedinici snage postaju sve manje što je pad veći (sl. 32).



Sl. 32. Dodatne investicije B po jedinici instalirane snage u zavisnosti od pada i duljine dovoda L

To vrijedi i za pribranske hidroelektrane (duljina dovoda $L = 0$) i za hidroelektrane s dovodom.

Proizvodna cijena energije u hidroelektrani proporcionalna je specifičnim investicijama (jedn. 20), jer su i troškovi proizvodnje proporcionalni investicijama. U hidroelektrani, naime, praktički nema troškova koji su zavisni od količine proizvedene energije, već su svi troškovi stalni, bez obzira na količinu energije koju elektrana proizvodi. Proizvodna cijena energije, dakle, jednak je:

$$c_0 = \frac{\alpha I}{W}, \quad (25)$$

gdje je α konstanta (npr. 0,10) kojom treba množiti investicije da se dobiju godišnji troškovi (amortizacija, kamati na osnovna sredstva itd.) a W moguća proizvodnja hidroelektrane. Međutim, zavisi o prilikama u elektroenergetskom sistemu koliko će energije biti stvarno moguće proizvesti u promatranoj hidroelektrani. Ako se sa $\beta \leq 1$ označi omjer između stvarne proizvodnje W_s i moguće proizvodnje W , proizvodna cijena energije će iznositi

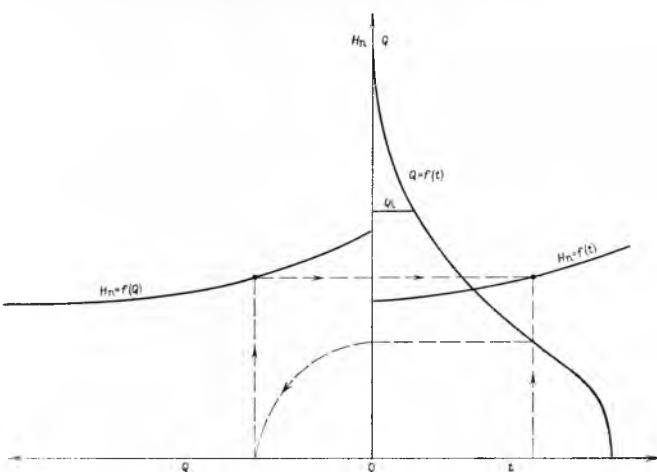
$$c = \frac{c_0}{\beta} = \frac{\alpha I}{\beta W}. \quad (26)$$

Omjer β nije za cijelo vrijeme rada hidroelektrane konstantan; on je obično najmanji neposredno nakon izgradnje elektrane, pa se povećava s povećanjem potrošnje u elektroenergetskom sistemu.

Prilagodavanje hidroelektrana opterećenju. U pogledu prilagodavanja opterećenja elektrana dijagramu opterećenja postoji znatna razlika između hidroelektrana i termoelektrana.

Akumulacijske hidroelektrane s tlačnim dovodom mogu se prilagoditi promjenama opterećenja brzinom koja je jednaka brzini djelovanja regulatora turbine, a to praktički znači — momentano. Međutim, za trajnije povećanje opterećenja akumulacijske hidroelektrane s gravitacijskim dovodom nije dovoljno samo otvarati dovod vode pred turbinom, već treba otvarati i zaporne organe na ulazu. Da bi se, dakle, postiglo povećanje opterećenja u hidroelektrani s gravitacijskim dovodom, potrebno je bar toliko vremena koliko treba da voda stigne od zahvata do turbine. To praktički vrijedi i za smanjenje opterećenja, ako se ne želi da dođe do preljeva na vodostanu.

Granicu povećanja opterećenja u akumulacijskim hidroelektranama predstavlja maksimalna snaga, koja zavisi od raspoloživog pada u promatranom momentu, a ne zavisi od dotoka u akumulacijski bazen. Koliko dugo može hidroelektrana raditi s maksimalnom snagom, to zavisi od veličine izgradnje, od dotoka i od volu-



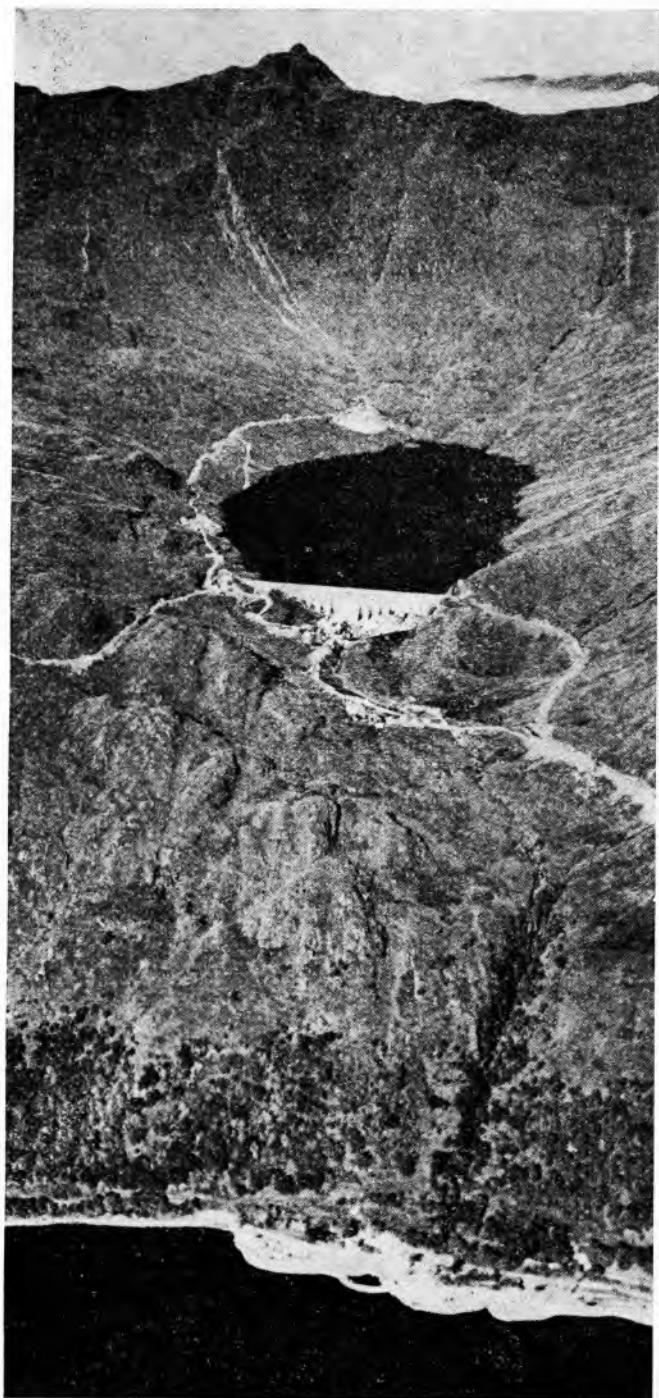
Sl. 31. Konstrukcija krivulje $H_n = f(t)$ pomoću krivulje $Q = f(t)$ a prema krivulji $H_n = f(Q)$

Veličina B_{1H} u jednadžbi (23) zavisi samo od pada, pa je $B_{1H} = f(H)$. Taj porast investicija može se također odrediti po jedinici porasta instalirane snage, pa se dobiva nova konstanta $B_H = f(H)$.

mena akumulacije, a koliko dugo treba, ako uopće treba, da hidroelektrana radi s maksimalnom snagom, to zavisi od njezine uloge u elektroenergetskom sistemu.

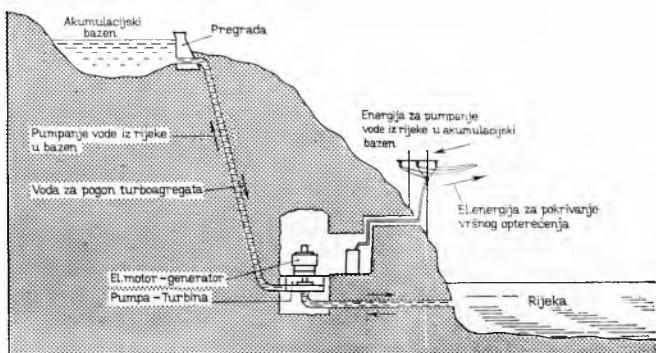
U protočnoj hidroelektrani maksimalna snaga određena je i dotokom i raspoloživim padom; turbinama se, naime, ne smije dovoditi više vode nego što dođe, jer bi u tom slučaju gornji nivo vode pao, pa bi turbina ostala bez vode. Tehnički je, dakako, moguće i rad protočne hidroelektrane prilagoditi potrebama, ali svako odstupanje od snage koja odgovara dotoku dovodi do gubitaka vode.

Ni u akumulacijskoj ni u protočnoj hidroelektrani nema tehničkih poteškoća za obustavljanje i za ponovno stavljanje u pogon. Ograničenje brzine stavljanja u pogon, odnosno obaveza propuštanja određenih količina vode, može biti posljedica obaveza prema nizvodnim korisnicima.



Sl. 33. Akumulacijski bazen pumpno-akumulacijske hidroelektrane na jezeru Awe u Škotskoj. Pad vode 360 m

Pumpno-akumulacijske hidroelektrane su postrojenja koja za proizvodnju električne energije upotrebljavaju vodu pumpanjem akumulirano u neki akumulacijski bazen. Razlikuju se pumpno-



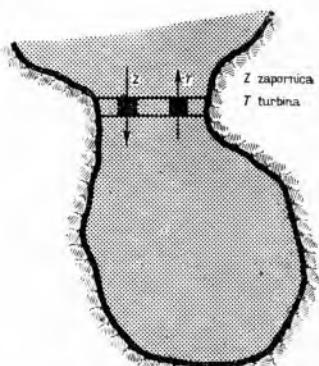
Sl. 34. Shema pumpno-akumulacijske elektrane

-akumulacijske hidroelektrane s dnevnim i sa sezonskim akumuliranjem vode. U prvom slučaju voda se pumpa preko noći koristeći se za to energijom iz protočnih hidroelektrana ili iz termoelektrana s niskim specifičnim troškovima za gorivo, da bi se akumulirana voda iskoristila u vrijeme maksimalnog opterećenja tokom dana (sl. 33 i 34). U drugom slučaju voda se pumpa u kišnim razdobljima godine kad se pojavljuju viškovi energije u hidroelektrnama ili kad su ekonomične termoelektrane slabo iskorištene; akumulirana se voda koristi u sušnom periodu godine. Dnevno akumuliranje vode primjenjuje se u prvom redu u elektroenergetskim sistemima u kojima su dominantne termoelektrane, jer se u sistemima sa znatnijim udjelom hidroenergije pokrivanje opterećenja u sušnim razdobljima može ekonomičnije riješiti većom instaliranim snagom hidroelektrana. Sezonsko akumuliranje, pak, koristi se u svim elektroenergetskim sistemima. Izgradnja pumpno-akumulacijskih hidroelektrana može biti naročito povoljna ako je visina pumpanja manja od pada na kojem se koristi akumulirana voda. Stupanj djelovanja pumpno-akumulacijske hidroelektrane, ako se pumpanje i korištenje vode vrši između istih nivoa, iznosi naime samo 50...60%, zavisno od pada.

Pumpno-akumulacijske hidroelektrane vrlo su pogodne, osim toga, kao rezerva u sistemu termoelektrana.

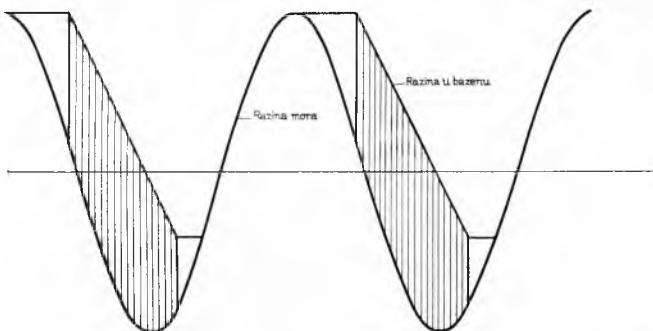
Elektrane na plimu i oseku. Elektrane koje iskorištavaju energiju plime i oseke za pogon turbina predstavljaju posebnu vrstu hidroelektrana. Za energetsko iskorišćavanje plime i oseke potrebitno je odabratи pogodan zaljev ili ušće rijeke na obali na kojoj se javljaju velike amplitude plime i oseke (7...12 m), na kojem postoji mogućnost izgradnje brane i gdje je dovoljno velik akumulacijski bazen.

Postrojenja s jednostrukim iskorištenjem. Najjednostavniji način korištenja energije plime i oseke postiže se sistemom jednog bazena i turbinama koje rade samo u jednom smjeru strujanja. U slučaju prikazanom na sl. 35 bazen se puni za vrijeme plime kroz zapornice, a prazni za vrijeme oseke kroz turbine. Razlika nivoa između bazena i morske površine energetski se koristi samo za vrijeme oseke. Umjesto toga mogao bi se puniti bazen za vrijeme plime prolazom vode kroz turbine, a prazniti ga za vrijeme oseke kroz zapornice, ali treba naglasiti da postoji izvjesna razlika između moguće proizvodnje za slučaj energetskog korištenja razlike nivoa za vrijeme oseke i za vrijeme plime uslijed toga što obale bazena nisu okomite, pa za slučaj energetskog korištenja za vrijeme oseke uz istu korišteni količinu vode turbine rade kroz dulje vrijeme s većim padom nego u slučaju korištenja za vrijeme plime.



Sl. 35. Shema korištenja energije plime i oseke; sistem jednog bazena s turbinama koje iskorištavaju strujanje samo u jednom smjeru

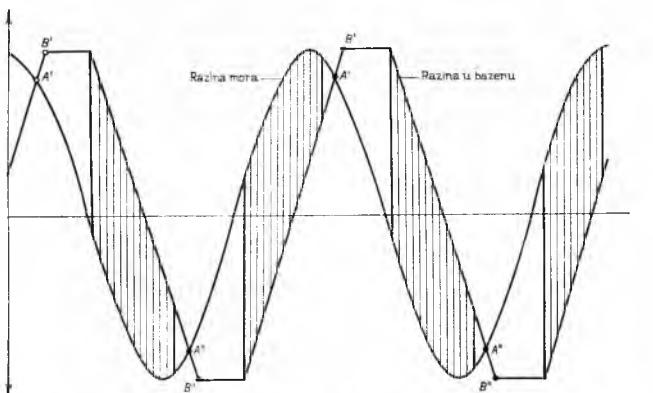
Razlikuju se četiri faze pogona (sl. 36). U prvoj fazi, za vrijeme plime, bazen se puni kroz zapornice. Nakon što je postignuta maksimalna razina u akumulacijskom bazenu, zatvaraju se zapornice i kroz izvjesno vrijeme održava se baten pun (faza 2).



Sl. 36. Način rada elektrane s jednim bazonom i jednosmjernom turbinom

U trećoj fazi pogona stavlja se u pogon turbine, voda kroz njih otjeće iz bazena u more dok se ne postigne minimalni pad uz koji još mogu raditi turbine. Nakon toga pogon turbine se obustavlja, zapornice još ostaju zatvorene dok se ne izjednači razina u bazenu s razinom mora, a onda ponovo počinje punjenje bazena.

Postrojenja sa dvostrukim iskorištenjem. Radi produljenja trajanja pogona i da bi se bolje iskoristila energija plime i oseke, može se korištenje protegnuti i za vrijeme plime i za vrijeme oseke. Takav pogon može se postići jednim bazenom, ali postavljanjem turbine koje mogu koristiti strujanje vode u oba smjera. U tom slučaju — pored toga što čini teškoće izgradnja turbine koje mogu koristiti vodu što protječe jedanput u jednom a drugi put u drugom smjeru — ne može se postići punjenje bazena do kota koje odgovaraju maksimumu plime, kao što je to moguće u slučaju jednostrukog korištenja, jer bi tada trebalo ranije prestati s pogonom turbine. Da bi se ta mana dvostrukog korištenja smanjila, turbina se upotrebljava istodobno i kao agregat za pumpanje.



Sl. 37. Način rada elektrane s jednim bazonom, dvosmjernom turbinom i dvo-smjernim pumpama

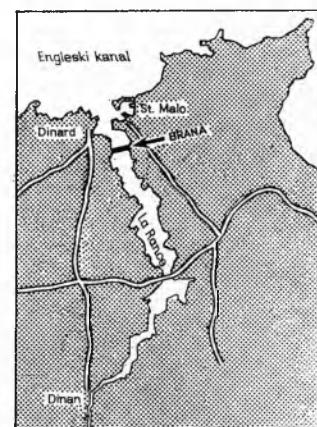
U tom slučaju turbine počinju da rade kao pumpe u momentu kad je izjednačena razina u bazenu s razinom mora (tačka A na sl. 37) i pumpaju dok se ne postigne unaprijed utvrđena razina, koja ne mora biti jednaka maksimumu plime ili oseke. Za vrijeme perioda punjenja pumpa povisuje razinu u bazenu (A' — B'), a za vrijeme pražnjenja snizuje razinu u bazenu (A'' — B''). Za takav pogon potrebni su agregati koji mogu raditi i kao dvostruke turbine i kao dvostruke pumpe.

Pumpanje u baten moguće je primijeniti i u slučaju jednostrukog korištenja (v. sl. 36). U tom slučaju s pumpanjem se počinje kad razina u bazenu postigne najveću moguću kotu s obzirom na razinu mora. Korištenje aggregata za pumpanje donosi energetske koristi, jer se pumpanje vrši pri malim razlikama razina, a tako akumulirana voda koristi se na većem padu, odnosno, pumpanjem na maloj visini postiže se sniženje razine u bazenu, pa se i na taj način povećava pad korištenja vode.

Pri jednostrukom korištenju moguće je skratiti obustavu proizvodnje energije time što se izgrade dva postrojenja — koja mogu biti i jedno od drugog udaljena, ali rade u istoj mreži — od kojih jedno radi za vrijeme plime, a drugo za vrijeme oseke.

Kakav god sistem za korištenje energije plime i oseke odabrali, neće biti moguće postići proizvodnju s konstantnom snagom i bez prekida pogona, što ukazuje na to da su za zadovoljenje potreba potrošača pored takvih elektrana potrebne još i dopunske elektrane. To se može postići bez poteškoća uključivanjem elektrana koje koriste plimu i oseku u veliki elektroenergetski sistem čija je snaga nekoliko puta veća od snage tih elektrana.

Moguća proizvodnja energije u elektranama koje kao pogonsko sredstvo koriste plimu i oseku proporcionalna je površini bazena



Sl. 38. Elektrana za iskorištanje plime i oseke La Rance kod St. Maloa

Do sada je izgrađeno samo jedno takvo postrojenje, u kojem se iskorištava energija plime i oseke u uštu rijeke La Rance kod St. Maloa u Francuskoj (sl. 38). Najveća amplituda plime na mjestu brane La Rance iznosi 11,1 m. Postavljen je 38 agregata po 9000 kW, a godišnja proizvodnja iznosi ~ 590 GWh. Turbine su izradene za dva smjera strujanja vode, a mogu raditi i kao pumpe također za dva smjera strujanja. Turbine mogu raditi s padovima od 11 do 5,5 m i koristiti protok od $100\cdots270$ m³/s svaka, broj okretaja je 88,2/min. Maksimalna visina dizanja — za vrijeme pumpanja — iznosi 6 m.

Drugi takav projekt se sada realizira u zaljevu Passamaqoddy na atlantskoj obali Sjeverne Amerike, na granici između USA i Kanade, s turbogeneratorima po 500 MW snage.

TERMOELEKTRANE

Termoelektranama se nazivaju postrojenja u kojima se toplina pretvara u mehaničku energiju, a ova u električnu, bez obzira na to da li se koristi toplina dobivena izgaranjem fosilnih i drugih goriva, toplina geotermičkih izvora ili toplina dobivena nuklearnom fisijom.

Termoelektrane mogu se podijeliti prema vrsti pogonskih strojeva, prema načinu korištenja pare, prema upotrijebljrenom gorivu i prema načinu hlađenja kondenzatora.

Prema vrsti upotrijebljениh strojeva razlikujemo: *parne termoelektrane*, u kojima gorivo izgara u parnim kotlovinama a pogonski je stroj parna turbina; *termoelektrane s plinskim turbinama*, u kojima je pogonski stroj plinska turbina; *dizelske termoelektrane* s dizelskim motorom kao pogonskim strojem; *nuklearne termoelektrane* u kojima nuklearni reaktor (sa izmjenjivačem topline ili bez njega) preuzima ulogu kotla a pogonski je stroj takoder parna turbina; *geotermičke termoelektrane* u kojima se para iz zemlje neposredno ili posredno (preko izmjenjivača topline) upotrebljava za pogon parne turbine.

Termoelektrane u kojima se kao pogonski stroj upotrebljavaju parne turbine možemo podijeliti na *kondenzacione termoelektrane* i na termoelektrane za kombiniranu proizvodnju električne energije i pare (*toplane i industrijske termoelektrane*). Kondenzacione termoelektrane proizvode samo električnu energiju, a u toplanama i industrijskim termoelektrana pored električne energije proizvodi se para (a posredno vrela voda) koja se upotrebljava za tehnološke procese i grijanje. I s plinskim turbinama može se ostvariti kombinirana proizvodnja električne energije i pare.

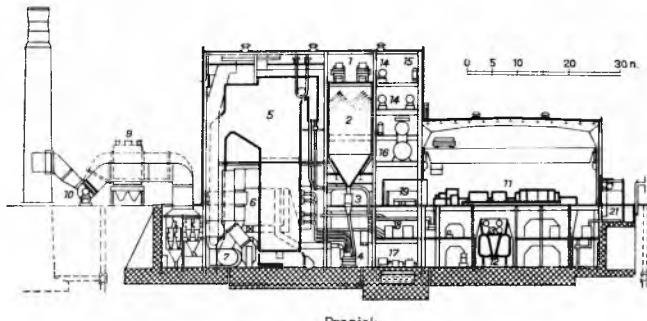
U parnim termoelektranama mogu se koristiti čvrsta, tekuća i plinovita goriva, u termoelektranama s plinskim turbinama tekuća i plinovita, a u dizelskim termoelektranama samo tekuća goriva.

S obzirom na hlađenje (u kondenzatoru parne turbine, u hladionicima postrojenja s plinskim turbinama i s dizelskim motorima) razlikuju se termoelektrane s protočnim hlađenjem i termoelektrane s povratnim hlađenjem.

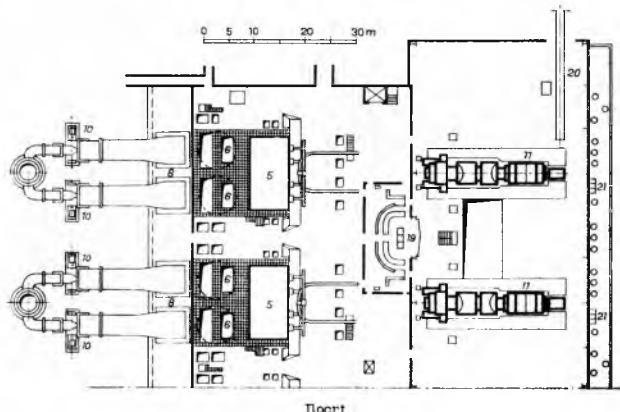
Parne termoelektrane

U prvim termoelektranama krajem XIX stoljeća kao pogonski stroj služio je parni stroj. U to doba konstruirane su prve parne turbine. Nakon 1900 izgrađeno je više tipova parnih turbina, pa one postepeno potiskuju parne strojeve. Danas se u parnim elektranama postavljaju samo turbine.

Osnovna oprema parne termoelektrane. Svi glavni dijelovi parne termoelektrane smješteni su u glavnoj pogonskoj



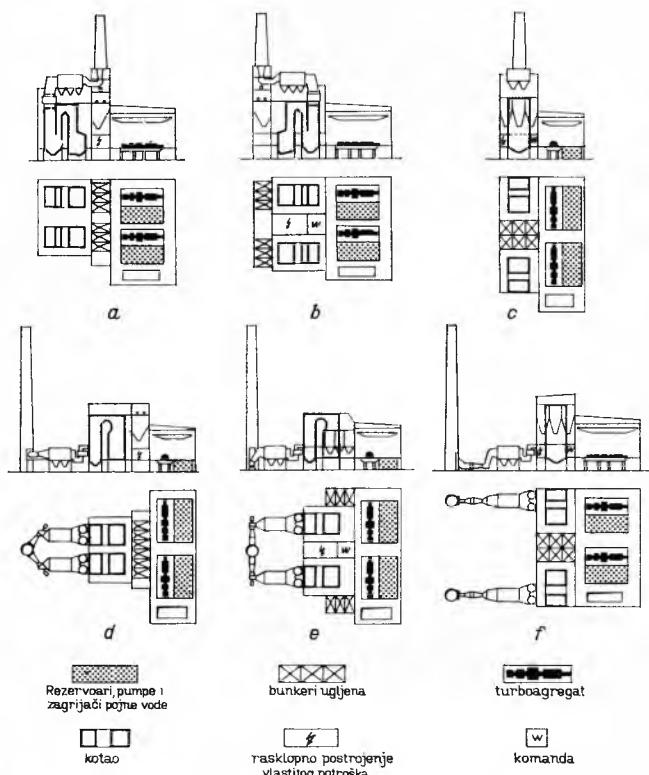
Presjek



Sl. 39. Primjer termoelektrane. 1 Doprava ugljena, 2 bunker ugljena, 3 vaga i dodavač ugljena, 4 mlin ugljena, 5 kotao, 6 predgrijac zraka, 7 ventilator svježeg zraka, 8 mehanički filter izlaznih plinova, 9 elektrofilter (mogućnost ugradnje), 10 ventilator izlaznih plinova, 11 turboagregat, 12 kondenzator, 13 niskotlačni zagrijaci, 14 visokotlačni zagrijaci, 15 isparivač, 16 rezervoar pojne vode s otpiljanjem, 17 pojne pumpe, 18 rasklopno postrojenje vlastitog potroška, 19 toplinska komanda, 20 montažni kolosijek, 21 kanal sabirnica

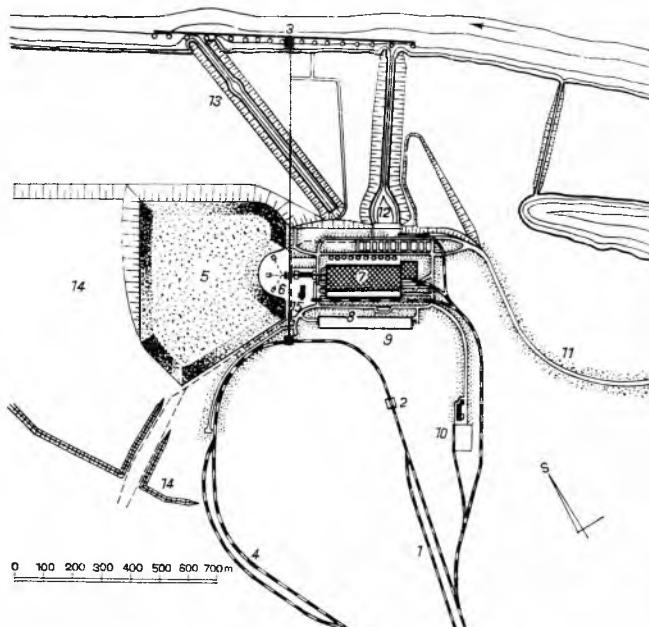
zgradi. Raspored unutar zgrade termoelektrane zavisi od tipa kotla, duljine turboagregata, kvaliteta ugljena, od zahtjeva u pogledu mogućeg proširenja. U zgradici elektrane smješteni su bunkeri ugljena, kotlovi, turboagregati, priprema vode (zagrijaci, isparivači, otpiljanja, rezervoari pojne vode) i pumpe za napajanje, rasklopno postrojenje vlastitog potroška i, konačno, toplinska i električna komanda. Na sl. 39 prikazan je raspored uređaja unutar zgrade termoelektrane kojoj je dispozicija data na sl. 41, a na sl. 40 vidi se nekoliko tipičnih dispozicija zgrade termoelektrane. Dispozicije a) do c) dolaze u obzir za goriva s malim sadržajem pepela i sumpora, jer tada nije potreban visok dimnjak. Da se sprijeći zagadivanje uzduha u blizini termoelektrane, dim, prije ulaska u dimnjak, prolazi kroz čistač plina (v. Čišćenje plinova).

Uređaji za pripremu vode nalaze se po pravilu uz turboagregat, a turboagregati nastoje se smjestiti što bliže kotlovima radi smanjenja duljine parovoda, koji zbog sve viših tlakova i temperatura postaje sve skuplji. Smanjenje udaljenosti između kotla i turbo-



Sl. 40. Tipični rasporedi unutar zgrade elektrane

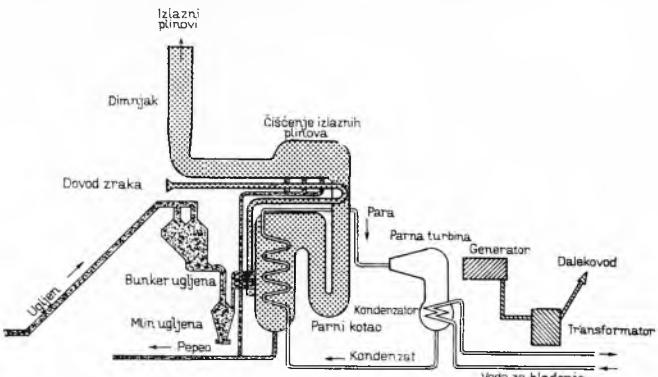
agregata važno je kad je predvideno međupregrijavanje pare. Kad se bunkeri ugljena nalaze između kotlovnice i strojarnice (a i d) ili između kotlova (c i f), rasklopno postrojenje i komanda nalaze se u prostoru ispod bunkera. Postavljanje turboagregata jedan iza drugoga kao u dispozicijama c, d i f ima prednosti kad se



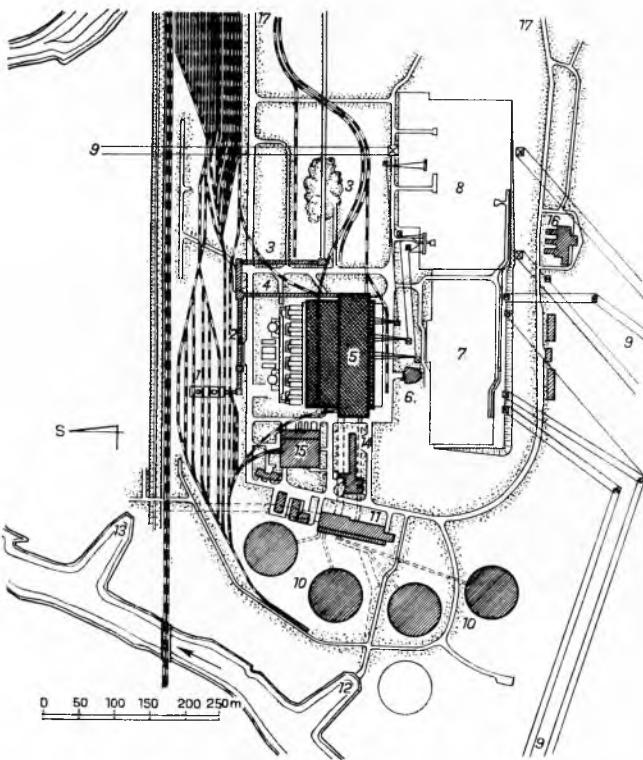
Sl. 41. Primjer dispozicije termoelektrane s protočnim hlađenjem. 1 Kolosijek za dovoz ugljena, 2 vaga, 3 stanica za istovarenje ugljena, 4 kolosijek za istovarene vagonе, 5 skladište ugljena, 6 drobljenje ugljena, 7 zgrada termoelektrane, 8 električna komanda, 9 rasklopno postrojenje, 10 skladište, 11 cesta, 12 dovod rashladne vode, 13 odvod rashladne vode, 14 deponij pepela, 15 upravna zgrada

radi o agregatima velike duljine (agregati velike snage s visokim parametrima pare).

U neposrednoj blizini glavne pogonske zgrade smješteni su uređaji za transport goriva i pepela i deponij pepela. Način istovara i transporta te izvedba uređaja zavisni su od vrste goriva, načina dopreme goriva i od svojstava goriva. U postrojenja termoelektrane spadaju i postrojenja za dobavu vode (pumpne stанице), te dovod i odvod vode. Ako je predviđeno povratno hlađenje, uz glavnu pogonsku zgradu smješteni su hladnjaci (tornjevi za hlađenje). Na sl. 41 prikazan je primjer dispozicije termoelektrane s protočnim hlađenjem (doprema ugljena vodenim putem i željeznicom), a na sl. 42 dispozicija termoelektrane s povratnim hlađenjem (doprema ugljena samo željeznicom). Rasklopno po-



Sl. 41. Schema strujanja medija u termoelektrani. (Površine proporcionalne potrebnom prostoru.)

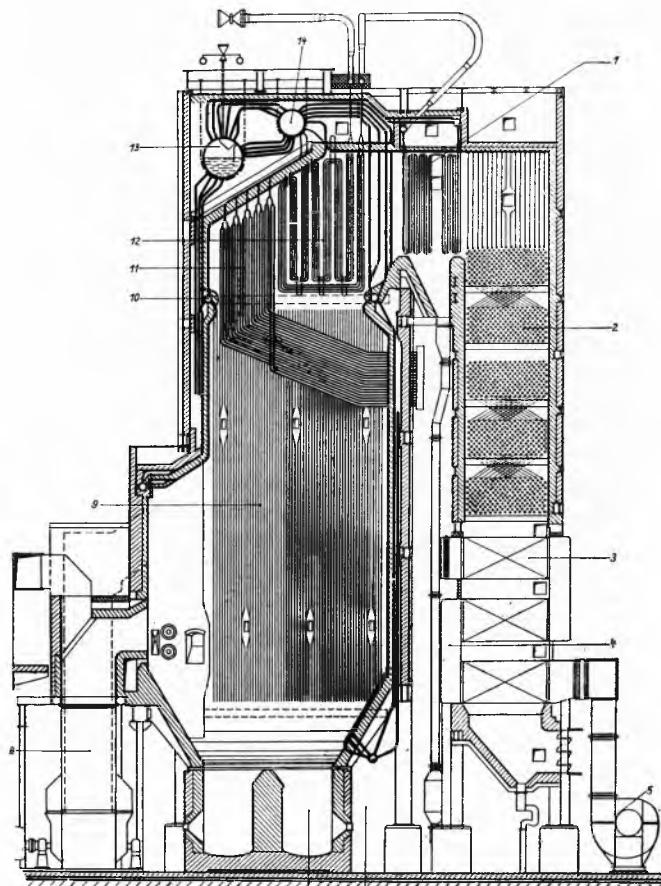


Sl. 42. Termoelektrana s povratnim hlađenjem

strojenje može se smjestiti u glavnu pogonsku zgradu ako se radi o termoelektrani manje snage iz koje se energija može razvesti vodom s naponom 35 kV, ali ako je za prijenos potreban napon 110 kV ili viši, rasklopno postrojenje se izvodi na otvorenom, obično tik uz glavnu pogonsku zgradu. Uz glavnu pogonsku zgradu postoje također radionice za održavanje i sitnije popravke, te upravna zgrada.

Kako su pojedini dijelovi elektrane među sobom funkcionalno povezani vidi se na shematskoj slici 42.

Parni kotlovi koji se danas upotrebljavaju u termoelektranama vodocijevni su kotlovi s cijevima smještenim oko ložišta. U malim



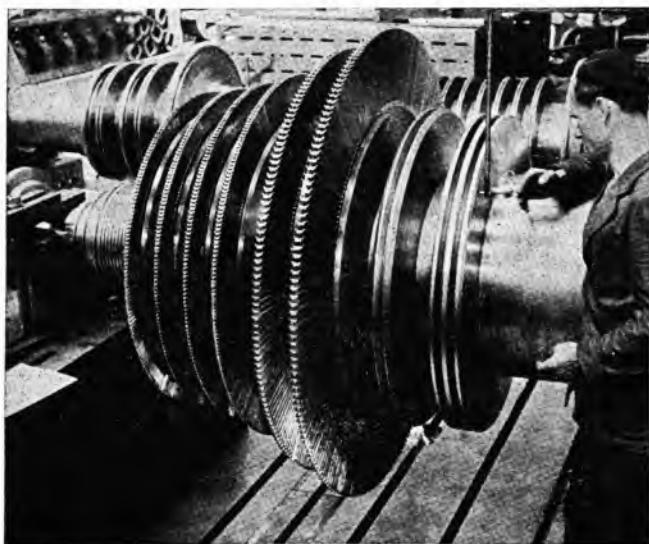
Sl. 43. Parni kotao na zračenje, 125 t/h, 42 kp/cm² pretlak, 450 °C, temperatura pojne vode 140 °C. 1 Konvektivni pregrijivač paro (I stupanj pregrijavanja), 2 pregrijač pojne vode, 3 zagrijać zraka, 4 odvajač pepela, 5 ventilator zraka za izgaranje, 6 donji kolektor, 7 peponik, 8 mlin za ugljen, 9 ložište s ekranom, 10 gornji kolektor, 11 pregradni isparivač, 12 pregradni pregrijivač (II stupanj pregrijavanja) 13 glavni bubanj, 14 parni bubenj

postrojenjima (snaga do desetak megavata po agregatu) postavljaju se kotlovi s kosim ili sa strmim cijevima (sl. 43). Sve se više upotrebljavaju kotlovi s prisilnom cirkulacijom vode u kotlu. Samo u kotlovima malih učina (do ~50 t/h) gorivo se loži na pomičnoj rešetki: za veće se učine u ložištu dovodi ugljen u obliku prašine. U posljednje vrijeme često se za loženje kotlova upotrebljava ložno ulje i zemni plin. Ponekad se postavljaju kotlovi koji se mogu koristiti dvjema, pa i svima trima vrstama goriva (ugljem, ložnim uljem i zemnim plinom). (Vidi *Parni kotlovi*.)

Konstrukcija kotlova u termoelektrani prilagodena je određenom kvalitetu goriva. Normalno je to ugljen iz rudnika u neposrednoj blizini elektrane (ako se radi o ugljenu male ogrjevne moći) ili otpadne vrste ugljena iz udaljenih rudnika (ako se radi o ugljenu veće ogrjevne moći). I u jednom i u drugom slučaju količine ugljena su ograničene zbog nedovoljnih rezerva ugljena bilo zbog ograničene mogućnosti transporta. Ta ograničenja su po pravilu još veća ako se radi o korištenju otpadnih vrsta ugljena, jer količina otpadnog ugljena (koji se ne može upotrijebiti u druge svrhe osim za loženje u termoelektranama) zavisi od potreba ostalih potrošača, koji troše kvalitetnije vrste ugljena.

Parne turbine su rotacioni strojevi koji se sastoje od statora i rotora s većim brojem redova lopatica (sl. 44). U njima se toplinska energija pretvara u mehaničku. S obzirom na smjer strujanja pare turbine su aksijalne ili radikalne. Vrlo velika većina turbine je aksijalna. Radikalne turbine upotrebljavaju se samo iznimno

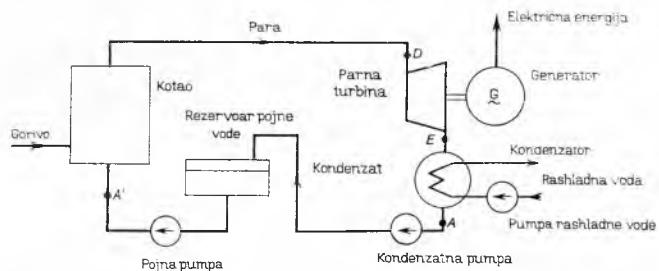
jer se ne mogu izgraditi većih snaga i jer se ne može provesti zagrijavanje kondenzata. Turbine se danas grade do snage od 1000 MW za paru tlaka do 300 bara i temperature do 600 °C.



Sl. 44. Rotor parne turbine

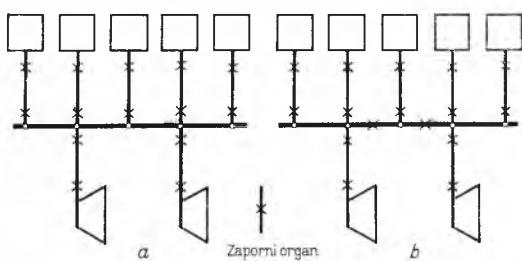
Para koja je ekspandirala u turbini ulazi u *kondenzator*. U kondizacionim turbinama sva para (osim one koja se upotrebljava za zagrijavanje kondenzata) dolazi u kondenzator; u turbinama s oduzimanjem dio pare se oduzima iz turbine prije nego što je eksplandirala do tlaka kondenzatora, a preostali dio pare dolazi u kondenzator; protuvlačne turbine nemaju kondenzatora jer se sva para pod tlakom koji je viši od tlaka kondenzatora odvodi (za grijanje ili za tehnološke procese) u parnu mrežu, koja preuzima ulogu kondenzatora (v. *Turbine, parne*).

U parnoj termoelektrani ista se voda isparava u kotlu, nakon ekspanzije u turbini kondenzira u kondenzatoru i vraća u kotao gdje se ponovo ispari. Voda, dakle, prolazi kroz zatvoreni proces



Sl. 45. Shematski prikaz procesa u parnoj termoelektrani. Oznake A, A', B, B', itd. u ovoj i nekim sljedećim slikama odgovaraju oznakama na is-dijagramima

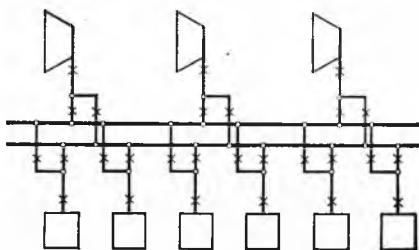
(sl. 45). Proces se može smatrati zatvorenim i kada se kondenzirana voda ne vraća u kotao, ili se ne vraća sva, jer se izgubljena voda ohlađuje na temperaturu okoline, a tu istu temperaturu ima i voda kojom se nadoknade gubitak.



Sl. 46. Shema spoja termoelektrane s jednostrukim parnim sabirnicama; a bez mogućnosti uzdužne podjele sabirnica, b sa takvom mogućnošću

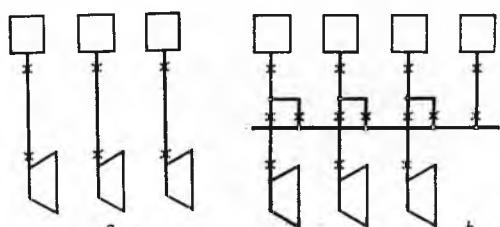
Spoj kotlova s turbinama može se izvesti na više načina, зависno od uloge termoelektrane (kondenzacijska ili industrijska termoelektrana, toplana), od sigurnosti proizvodnje i od toga u kojoj mjeri elektrana treba da bude sposobna proizvoditi i za vrijeme redovitih pregleda postrojenja. Pri tomu treba uvažiti činjenicu da komplikiranija shema traži veći broj zapornih organa (zasuna, ventila), koji predstavljaju mjesto mogućeg kvara.

Najjednostavniju shemu spoja predstavlja postrojenje s jednostrukim sabirnicama (sl. 46 a), u kojem sabirnice treba da su dimenzionirane tako da bude moguć pogon svake turbine s bilo kojom grupom kotlova. Ako se sabirnice predvide bez mogućnosti njihove uzdužne podjele, svaki kvar na sabirnicama dovodi do obustave cijelog postrojenja. Stoga se u postrojenjima s većim brojem kotlova i turboagregata u sabirnice postavljaju zaporni organi (sl. 46), što omogućuje bar djelomičan pogon u slučaju kvara na sabirnicama. Daljnje povećanje elastičnosti postiže



Sl. 47. Shema spoja termoelektrane s dvostrukim parnim sabirnicama

se dvostrukim parnim sabirnicama (sl. 47). Kako je već spomenuto, povećanje elastičnosti traži znatno povećani broj zapornih organa i relativno velike izdatke za sabirnice i zaporne organe. Stoga se sve više prelazi na spoj u bloku kotao-turbina (sl. 48). Iako

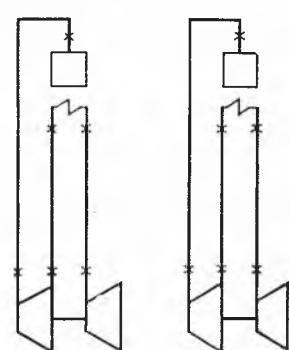


Sl. 48. Shema blok-spoja termoelektrane. a Blok-spoj kotao-turbina, b s pomoćnim parnim sabirnicama

takov spoj nema nikakve elastičnosti, njegova je prednost što je vrlo jednostavan i što ima preglednu shemu i minimalni broj zapornih organa. Sigurnost proizvodnje blok-spoja nešto je manja, ali to smanjenje sigurnosti nije toliko da bi se zbog njega moralo odustati od tako jednostavnog rješenja. Ako termoelektrana osim električne energije daje potrošačima i paru, opisani blok-spoj ne osigurava dovoljno dobavu pare jer se para ne može uzimati iz mreže kao električna energija. U tom slučaju povoljno je postaviti i rezervni kotao koji je spojen na pomoćne sabirnice (sl. 48). Pomoćne sabirnice dimenzionirane su za učin samo jednog kotla, što nije slučaj s normalno izvedenim parnim sabirnicama.

Kad je upotrijebljen proces s medupregrijanjem pare, praktički ne dolazi u obzir shema spoja sa sabirnicama, jer bi to znatno komplikiralo postrojenje. U tom se slučaju elektrana izvodi redovito u blok-spoju kotao-turbina (sl. 49).

Generatori (turbogeneratori), koji se izrađuju u horizontalnoj izvedbi, smješteni su zajedno s



Sl. 49. Shema spoja termoelektrane s medupregrijanjem u blok-spoju kotao-turbina

turbinama u strojarnici. Oni se grade najčešće sa dva pola. Više o generatorima v. *Električni strojevi*.

Faktori koji ograničavaju veličinu instalirane snage parne termoelektrane. Instalirana snaga termoelektrana normalno je određena potrebama konzumenata, odnosno potrebama snage za dopunu proizvodnje iz hidroelektrana. Međutim, porast potrošnje električne energije traži izgradnju sve većih termoelektrana, pa se događa — a u budućnosti će se to sve češće dogadati — da prirodni uvjeti ograničavaju instaliranu snagu termoelektrana. Do tog ograničenja može doći zbog ograničenja količina ugljena, zbog ograničenih količina vode i ili zbog ograničenog prostora za izgradnju termoelektrane. Pri određivanju raspoloživih količina goriva treba uvažiti i činjenicu da termoelektrani treba da bude osigurano gorivo bar za 20...25 godina, treba li da se isplati izgradnja postrojenja.

Najveća količina vode u termoelektrani potrebna je za hlađenje kondenzatora. Hlađenje kondenzatora može se provesti bilo protičnim bilo povratnim hlađenjem. U prvom se slučaju za hlađenje kondenzatora upotrebljava uvijek svježa voda, dok u slučaju povratnog hlađenja stalno kruži ista voda, koja se hlađi u rashladnom tornju. Protočno hlađenje je i energetski i ekonomski povoljnije jer je pri njemu temperatura rashladne vode niža, što omogućuje održavanje nižeg tlaka u kondenzatoru, a potrebne su i manje investicije za izgradnju postrojenja. Zbog toga se uvijek teži protočnom hlađenju, kad god je to moguće s obzirom na raspoloživu količinu vode.

Maksimalna instalirana snaga termoelektrane s protočnim hlađenjem kondenzatora zavisi od minimalnog protoka u vodotoku iz kojeg se uzima voda za hlađenje, jer je potrebno da puna snaga termoelektrane bude osigurana baš u doba najmanjih protoka. Za protočno hlađenje obično se računa da je za 1 kg pare koja struji u kondenzator potrebno 60 kg vode za hlađenje. Količine vode potrebne za povratno hlađenje znatno su manje, pa je moguće s istom količinom vode opskrbiti termoelektranu znatno veće snage. Najveći gubitak vode u krugu hlađenja nastaje zbog isparivanja vode u rashladnom tornju, pa je potrebno dodavati svježu vodu da se nadoknadi taj gubitak. Voda koja se isparuje u rashladnom tornju ostavlja u krugu hlađenja soli koje su u njoj bile raspoljene. Kako svježa dodatna voda stalno donosi u krug hlađenja nove soli, koncentracija se soli u vodi stalno povećava, te bi došlo do taloženja soli u cijevima kondenzatora kad se jedan dio vode ne bi povremeno ispuštao i nadomještao svježom vodom. Za toliko je potreba svježe vode veća od gubitaka vode isparivanjem.

Ograničenje zbog nemogućnosti smještaja samog postrojenja može doći u obzir samo u rijetkim slučajevima, ali u nekim slučajevima instalirana snaga termoelektrane može biti ograničena zbog ograničene raspoložive površine za uskladištenje ugljena. Radi sprečavanja samozapaljenja ugljena visina sloja ne smije preći određenu visinu, koja je zavisna od kvaliteta i svojstava ugljena. Mogućnost uskladištenja ugljena za termoelektrane na rudniku zavisi od mogućnosti dobave i od rasporeda proizvodnje tokom godine. Za termoelektranu udaljenu od rudnika treba ovim faktorima dodati i mogućnost transporta i eventualne potешkoće u prijevozu.

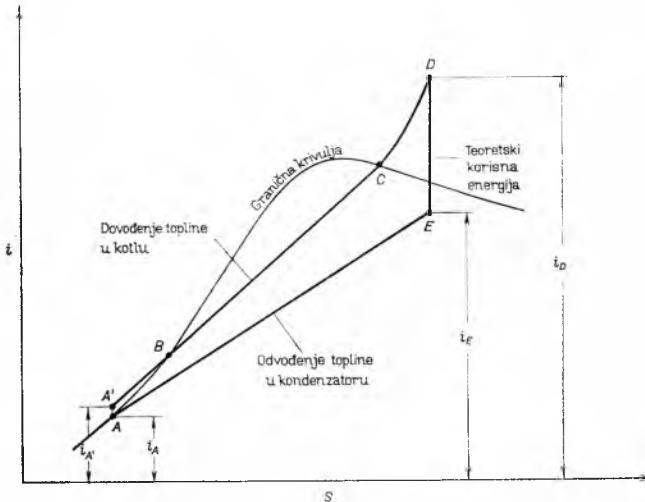
Nasuprot hidroelektranama, ne treba za termoelektrane posebno odrediti moguću godišnju proizvodnju, jer je ta proizvodnja — ako stoje na raspolažanju dovoljne količine ugljena, što se može praktički uvijek pretpostaviti — proporcionalna maksimalnoj snazi. Može se računati da je u prosjeku za revizije i održavanje potrebno ~1000 sati godišnje. Pored toga, proizvodnja termoelektrane zavisi u prvom redu od mogućnosti plasmana energije, a tek u drugom redu od tehničke mogućnosti proizvodnje.

Kondenzacione termoelektrane služe isključivo za proizvodnju električne energije. Pogonski je stroj kondenzaciona parna turbina, u kojemu se para eksplandira do tlakova 0,04...0,07 bara, koji vladaju u kondenzatoru. To je najčešći tip termoelektrana. Stupanj djelovanja je razmjerno nizak (do 41%) jer je maksimalna temperatura parnog procesa razmjerno niska (do najviše 600 °C). Stupanj djelovanja u najvećoj mjeri zavisi od parametara svježe pare (njezinog tlaka i temperature).

Kad se razmatra lokacija kondenzacione termoelektrane, potrebno je razlikovati makrolokaciju od mikrolokacije. Makrolokacija zavisi od tri faktora: od goriva, vode i potrošača električne

energije. Kad se radi o gorivima niske kalorične moći (lignitu, slabijim vrstama mrkog ugljena) i o termoelektranama velike snage, odlučan utjecaj na makrolokaciju imaju gorivo i voda. Ako se u termoelektrani računa s izgaranjem visokokaloričnih goriva (kamenog ugljena, derivata nafta, zemnog plina), transport goriva normalno nema utjecaja na lokaciju, pa je važniji utjecaj vode i potrošača. Danas, kad se grade termoelektrane sve većih snaga, kad se iskorištavaju sve lošije vrste čvrstih goriva i kad je omogućen prijenos električne energije na velike daljine, najčešće se termoelektrane grade neposredno na ugljenim rudnicima. Na mikrolokaciju, s druge stane, utječe potrebna površina (skladište goriva i deponij pepela) i nosivost zemljišta, mogućnost priključka na željezničku (ili plovnu) i električnu mrežu, dovod i odvod vode, potreba budućeg proširenja elektrane.

Stupanj djelovanja kondenzacione termoelektrane. Proces u termoelektrani može se prikazati *i-s*-dijagramom (sl. 50), u kojem se kao ordinata nanosi entalpija (*i*), a kao apscisa entropija (*s*). Tačka *A'* odgovara stanju vode na izlazu iz pojne pumpe (*A'* na sl. 45); s tim stanjem voda ulazi u kotao, u kojem se ugrijava (*A'B*), isparava (*BC*) i pregrijava (*CD*). U turbini para eksplandira — uz pretpostavku adijabatske eksplanzije — do tlaka kondenzatora (tačka *E*), u kojemu se para kondenzira i sa stanjem koje odgovara tački *A* izlazi iz kondenzatora. Promjena stanja od *A* na *A'* posljedica je povišenja tlaka vode pojnim pumpama.



Sl. 50. Prikaz procesa bez gubitaka u parnoj elektrani (*i-s*-dijagram)

Termički stupanj djelovanja. Teorijska korisna energija jednaka je $i_D - i_E$, gdje je i_D entalpija pare na ulazu u turbinu, a i_E entalpija na izlazu iz turbine; dovedena je energija jednaka $i_D - i_A$, gdje je i_A entalpija vode na ulazu u kotao (v. *Termodinamika*). Ako se još uvaži energija potrebna za pumpanje pojne vode, može se teorijska korisna energija odrediti iz iznosa $i_D - i_E - (i_A' - i_A)$, a izraz za dovedenu energiju može se proširiti sa i_A' pa se dobiva $i_D - i_A - (i_A' - i_A)$. Omjer između teorijske korisne i dovedene energije naziva se termički stupanj djelovanja

$$\eta_{ter} = \frac{i_D - i_E - (i_A' - i_A)}{i_D - i_A - (i_A' - i_A)}. \quad (27)$$

Iz razmatranja može se isputiti drugi član ($i_A' - i_A$) u brojniku jer se potrošak energije za pojnu pumpu može uključiti u ostali vlastiti potrošak elektrane. Osim toga za ova razmatranja može se zanemariti taj isti član i u nazivniku, čime se čini nešto veća greška kad je tlak visok. Uz spomenuto zanemarivanje izraz za termički stupanj djelovanja glasi

$$\eta_{ter} = \frac{i_D - i_E}{i_D - i_A}. \quad (28)$$

Pretpostavljeno je, dakle, da se tačka *A'* na sl. 45 poklapa s tačkom *A*.

Tako je za pritisak od 98 bara i temperaturu od 500 °C pare na ulazu u turbinu i u temperaturu od 72 °C u kondenzatoru, što odgovara tlaku 0,036 bara, entalpija pare na ulazu u turbinu $i_D = 3375 \text{ kJ/kg}$ (806,2 kcal/kg), a na izlazu iz turbine $i_E = 1977 \text{ kJ/kg}$ (472,3 kcal/kg), dok je entalpija vode na ulazu u kotao $i_A = 113 \text{ kJ/kg}$ (27,0 kcal/kg). Termički stupanj djelovanja je tada prema jedn. (28):

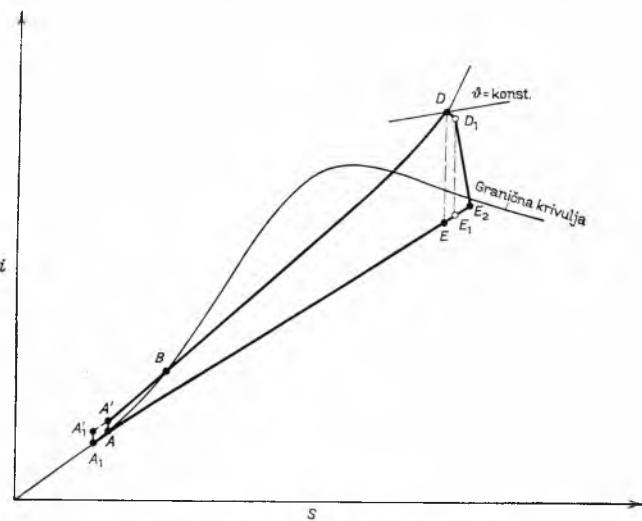
$$\eta_{ter} = \frac{3375 - 1977}{3375 - 113} = \frac{806,2 - 472,3}{806,2 - 27,0} = 0,4285$$

Dakle, od ukupno dovedene energije teorijski se može iskoristiti 42,85%, a ostatak od 57,15% odvodi se rashladnom vodom, pa taj ostatak predstavlja gubitak u procesu.

Efektivni stupanj djelovanja. Prilikom crtanja dijagrama na sl. 50 zanemareni su svi gubici. Oni se, međutim, u praksi ne mogu zanemariti. To su: a) gubici u parnom vodu od kotla do turbine i u regulacijskom ventilu turbine; zbog njih stanje pare na ulazu u turbinu ne odgovara tački D već tački D_1 (sl. 51); b) gubici u turbini zbog kojih se ekspanzija ne vrši po adijabati $D_1 E_1$ već po krivulji $D_1 E_2$. Omjerom razlike entalpija pare u tačkama D_1 i E_2 , s jedne strane, i u tačkama D_1 i E_1 , s druge strane, definiran je unutarnji stupanj djelovanja turbine

$$\eta_i = \frac{i_{D_1} - i_{E_2}}{i_{D_1} - i_{E_1}}; \quad (29)$$

c) gubici zbog pothlađenja kondenzata — u nekim slučajevima — ispod temperature zasićenja koja odgovara tlaku u kondenzatoru.



Sl. 51. Prikaz procesa u parnim elektranama

U tom je slučaju stanje kondenzata na izlazu iz kondenzatora određeno tačkom A_1 ; d) gubici pare kroz brtvenice i gubici topline zbog odvođenja i isijavanja, koje možemo zanemariti; e) mehanički gubici u turbini.

Ako se označi sa η_k stupanj djelovanja kotla, sa η_p stupanj djelovanja cjevovoda, sa η_t unutarnji stupanj djelovanja turbine, sa η_m mehanički stupanj djelovanja, može se odrediti stupanj djelovanja na vratilu turbine (η_e) iz izraza:

$$\eta_e = \eta_{ter} \eta_k \eta_p \eta_t \eta_m, \quad (30)$$

pri čemu je pretpostavljeno da ne dolazi do pothlađivanja kondenzata. Stupanj djelovanja η_e zove se efektivni stupanj djelovanja.

Stupanj djelovanja na pragu elektrane. Uvažujući još stupanj djelovanja generatora (η_g) dolazi se do stupnja djelovanja elektrane na priključnicama generatora

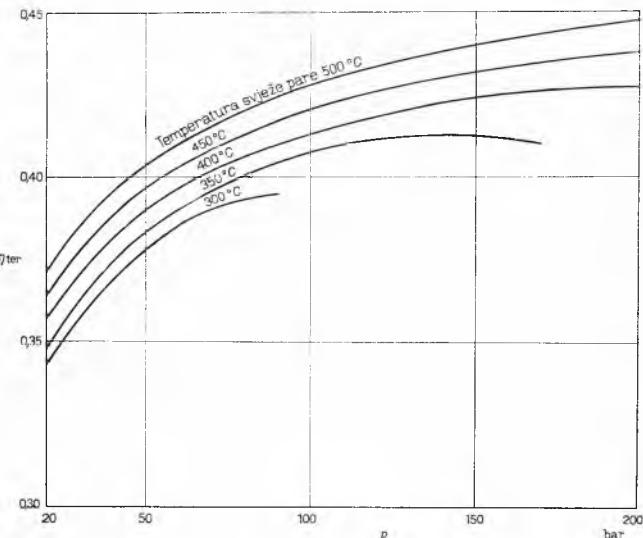
$$\eta_{el} = \eta_e \eta_g, \quad (31)$$

a ako se još sa v označi omjer između snage potrebne za vlastiti potrošak i snage na priključnicama generatora, može se odrediti stupanj djelovanja na pragu elektrane iz izraza

$$\eta_{el} = \eta_{el} (1 - v). \quad (32)$$

Faktori koji utječu na termički stupanj djelovanja parne termoelektrane. Odlučan utjecaj na stupanj djelovanja parne elektrane ima termički stupanj djelovanja, koji je normalno i najmanji, pa je razumljivo nastojanje da se termički stupanj djelovanja poboljša.

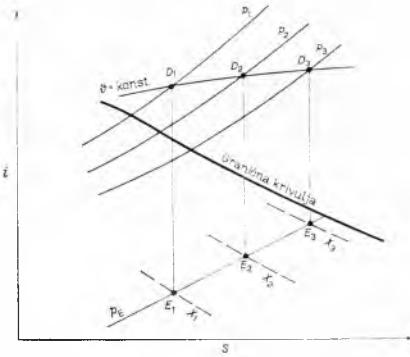
Utjecaj povećanja tlaka pare. Termički stupanj djelovanja uz konstantnu temperaturu svježe pare raste s povećanjem tlaka pare sve do optimalnog tlaka, uz koji se postiže maksimalni stupanj djelovanja. Taj optimalni tlak je to veći što je temperatura pare



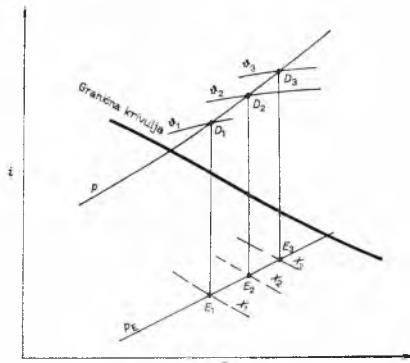
Sl. 52. Zavisnost termičkog stupnja djelovanja η_{ter} od tlaka p i temperature svježe pare za teorijski ciklus bez zagrijavanja kondenzata (temperatura u kondenzatoru 27°C)

viša, tako da za temperature od 450°C i više dostiže vrijednosti iznad 200 bara (sl. 52). To vrijedi za ciklus bez zagrijavanja kondenzata, dok već za ciklus s jednim stepenom zagrijavanja maksimum iščezava, pa povišenje tlaka donosi i povećanje termičkog stupnja djelovanja.

Povećanjem tlaka smanjuje se unutarnji stupanj djelovanja turbine η_i i u visokotlačnom i u niskotlačnom dijelu turbine. Na smanjenje unutarnjeg stupnja djelovanja u visokotlačnom dijelu turbine djeluje relativno povećanje gubitaka propustljivosti

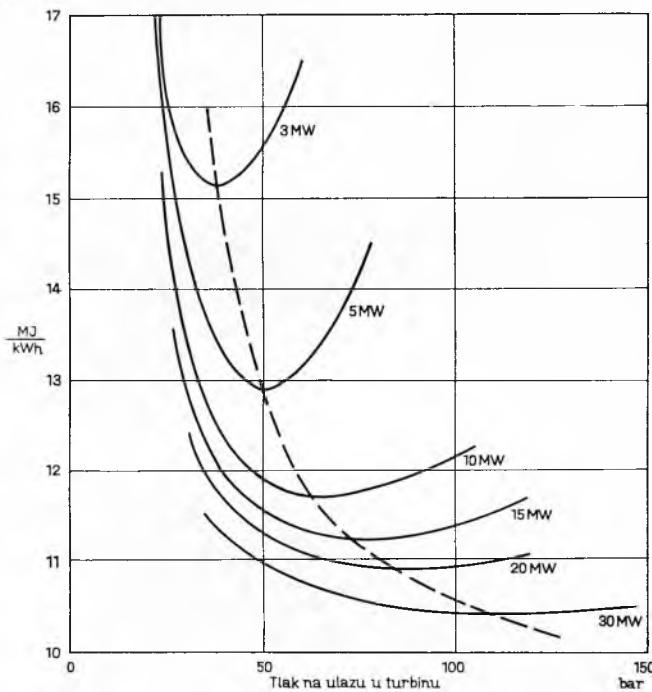


Sl. 53. Adijabatska ekspanzija u turbinu za različite tlakove ($p_1 > p_2 > p_3$), konstantnu temperaturu θ svježe pare i konstantan tlak u kondenzatoru p_E . Sadržaj vlage na kraju ekspanzije $1 - x_3 < 1 - x_2 < 1 - x_1$



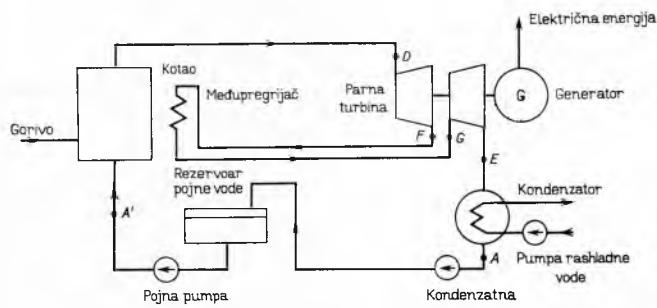
Sl. 54. Adijabatska ekspanzija u turbinu za različite temperature $\theta_1 < \theta_2 < \theta_3$, konstantan tlak svježe pare i konstantan tlak u kondenzatoru p_E . Sadržaj vlage na kraju ekspanzije $1 - x_3 < 1 - x_2 < 1 - x_1$

(gubici u brtvenicama i gubici u rasporu), jer su razmaci između rotora i statora za sve turbine istog reda veličine. Praktički se može reći da — uvaživši samo gubitke u visokotlačnom dijelu — unutarnji stupanj djelovanja zavisi od količine pare koja se dovodi turbine. Turbina male snage s visokim tlakom pare ima i mali stupanj djelovanja. Utjecaj količine pare na stupanj djelovanja to je veći što je turbinu manja i tlak pare viši. U niskotlačnom dijelu turbine je smanjenje unutarnjeg stupnja djelovanja zbog povećanja tlaka prouzrokovano time što povećanje tlaka svježe pare, uz istu temperaturu i uz isti tlak u kondenzatoru, pri ekspanziji po adijabati dovodi do povećanja sadržaja vlage u posljednjim stepenima turbine (sl. 53). Međutim, povećanjem temperature svježe pare (sl. 54) smanjuje se procenat vlage u pari na izlazu iz turbine. Osim toga sadržaj vlage zavisi i od drugih gubitaka u turbini, zbog kojih ekspanzija ne teče po adijabati već po krivulji prikazanoj na sl. 51, pa zbog tih gubitaka na izlazu iz turbine para ima manji procenat vlage nego što odgovara adijabatskoj ekspanziji. S povećanjem tlaka unutarnji se stupanj djelovanja turbine, dakle, smanjuje to više što je snaga turbine manja, a budući da se s povišenjem tlaka povećava termički stupanj djelovanja, postoji za svaku snagu turbine optimalni tlak (sl. 55); za velike snage (50 MW i više) on je znatno viši od 100 bara.



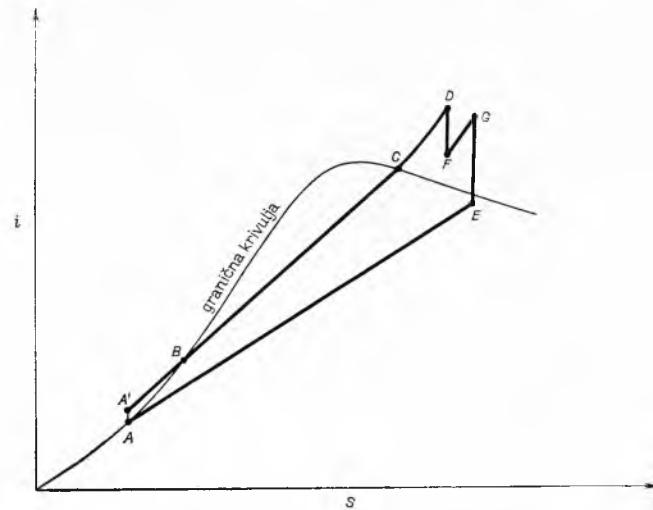
Sl. 55. Specifični potrošak topline za agregate različite snage u zavisnosti od tlaka na ulazu u turbinu

Povišenje temperature svježe pare dovodi uvijek do poboljšanja stupnja djelovanja. Granica temperature određena je svojstvima upotrijebljenog čelika. Feritni čelici mogu se upotrijebiti do temperature od 560 °C, za više temperature (do 650 °C) potrebni su austenitni čelici (v. Čelik).



Sl. 56. Shematski prikaz procesa s međupregrijanjem u parnoj termoelektrani

Termički stupanj djelovanja može se poboljšati *medupregrijanjem pare* koja je već djelomično ekspandirala u prvom dijelu turbine, s tim da ponovo pregrijana para u drugom dijelu turbine ekspandira do kondenzatorskog tlaka. Ponovno pregrijanje pare vrši se u kotlu (sl. 56). Pregrijanje svježom parom teorijski je jednako vrijedno kao i pregrijavanje u kotlu, ali temperatura



Sl. 57. Prikaz procesa s međupregrijanjem u parnoj termoelektrani

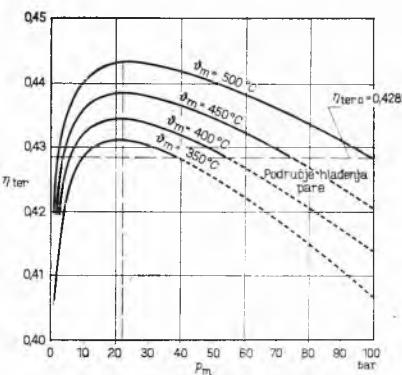
ponovo pregrijane pare ograničena je temperaturom zasićenja koja odgovara tlaku svježe pare.

Termički stupanj djelovanja termoelektrane uz međupregrijanje pare može se odrediti iz izraza

$$\eta_{ter} = \frac{(i_D - i_F) + (i_G - i_E)}{(i_D - i_A) + (i_G - i_F)} \quad (33)$$

u kojemu su upotrijebljene oznake kao na sl. 57. I sada je u brojniku teorijska korisna energija, koja se dobiva ekspanzionom pare u prvom dijelu (od D do F na sl. 57) i u drugom dijelu turbine (od G do E). Isto tako se i toplina dovodi u dva maha, i to za ugrijavanje, isparivanje i prvo pregrijanje (od A do D), a drugi put samo za ponovno pregrijanje (od F do G).

Termički stupanj djelovanja za procese s medupregrijanjem bolji je od termičkog stupnja djelovanja za proces bez međupregrijanja, osim u slučaju kad se medupregrijava para vrlo niskog tlaka. S povećanjem temperature medupregrijanja povećava se termički stupanj djelovanja (sl. 58). Za svako stanje svježe pare



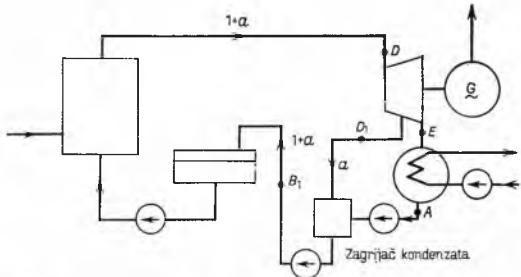
Sl. 58. Termički stupanj djelovanja η_{ter} u zavisnosti od tlaka p_m i temperature θ_m medupregrijanja. $\eta_{ter0} = 0,4285$ termički stupanj djelovanja bez međupregrijanja

postoji optimalni tlak međupregrijanja za koji se postiže maksimalni termički stupanj djelovanja, koji je jednak za sve temperature međupregrijanja.

U stvarnom procesu korist od međupregrijanja je nešto veća od one koja se pokazuje razmatranjem teorijskog ciklusa i usprkos

gubitaka u cjevovodu između turbine i kotla, a zbog poboljšanja stupnja djelovanja u niskotlačnom dijelu turbine. Do poboljšanja dolazi zbog smanjenja sadržaja vlage na kraju turbine.

Utjecaj zagrijavanja kondenzata. Termički stupanj djelovanja može se još poboljšati time da se kondenzat zagrijava parom koja je već djelomično ekspandirala u turbini. Ako se pretpostavi da je za zagrijavanje jednog kilograma kondenzata potrebno a kg djelomično ekspandirane pare, i ako se sa i_A označi entalpija kondenzata, sa i_{D_1} entalpija pare na ulazu u zagrijać, a sa i_{B_1} en-



Sl. 59. Shematski prikaz procesa sa zagrijavanjem kondenzata

talpija $(1 + a)$ kg vode na izlazu iz zagrijivača u kojem je zagrijavanje postignuto miješanjem (sl. 59), mora biti zadovoljena jednadžba

$$a(i_{D_1} - i_{B_1}) = i_{B_1} - i_A.$$

Teorijska korisna energija dobiva se sada ekspanzijom jednog dijela pare do kondenzatorskog tlaka, a drugog dijela pare (a kg za svaki kilogram pare koji ekspandira do kondenzatorskog tlaka) koji ekspandira samo do tlaka oduzimanja za zagrijavanje kondenzata. Teorijska korisna energija iznosi dakle $i_D - i_E + a(i_D - i_{D_1})$. Svakom kilogramu vode treba u kotlu dovesti toplinu $i_D - i_{B_1}$, a budući da je količina pojne vode $1 + a$, količina dovedene energije iznosi $(i + a)(i_D - i_{B_1})$, pa je termički stupanj djelovanja

$$\eta_{\text{ter}} = \frac{i_D - i_E + a(i_D - i_{D_1})}{(1+a)(i_D - i_{B_1})}. \quad (34)$$

Ako nazivnik proširimo sa i_A i $a i_{D_1}$, te uzmemu u obzir da je $a(i_{D_1} - i_{B_1}) = i_{B_1} - i_A$, dobivamo za termički stupanj djelovanja izraz

$$\eta_{\text{ter}} = \frac{i_D - i_E + a(i_D - i_{D_1})}{i_D - i_A + a(i_D - i_{D_1})}. \quad (35)$$

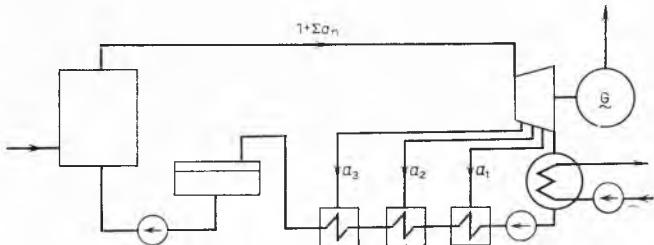
Prema jedn. (35) promatrani ciklus razlikuje se od ciklusa bez zagrijavanja kondenzata po tomu što se sva dodatna dovedena energija $a(i_D - i_{D_1})$ pretvara u korisnu energiju, dakle taj dodatni ciklus radi s termičkim stupnjem djelovanja jednakim 1. Naime, povećanjem dovedene topline ne povećava se količina topline $(i_E - i_A)$ koja se odvodi u kondenzator. Zagrijavanjem kondenzata postiže se, dakle, uvijek poboljšanje stupnja djelovanja. To, dakako, ne vrijedi ako se zagrijavanje provodi svježom parom, dakle kad je $i_D = i_{D_1}$, i kad se para za zagrijavanje oduzima pred ulazom u kondenzator, jer tada nema ni zagrijavanja kondenzata ($i_{B_1} = i_A$).

Daljnje poboljšanje stupnja djelovanja može se postići zagrijavanjem kondenzata u dva ili više stupnjeva (sl. 60). U tom slučaju stupanj djelovanja možemo odrediti iz izraza analognog izrazu (35)

$$\eta_{\text{ter}} = \frac{i_D - i_E + \sum_1^n a_n (i_{Dn} - i_{Bn})}{i_D - i_A + \sum_1^n a_n (i_{Dn} - i_{Bn})} \quad (36)$$

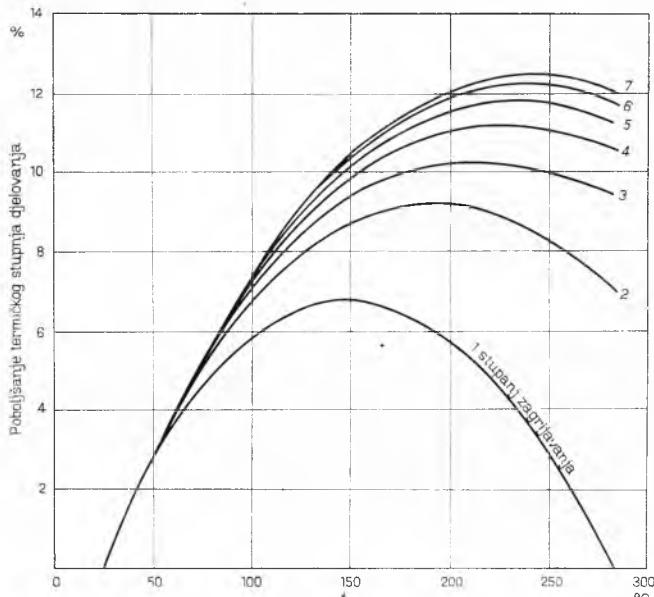
Povećanje broja stupnjeva zagrijavanja kondenzata poboljšava termički stupanj djelovanja jer se s njime povećava i količina topline koja se — bez povećanja topline odvedene u kondenzatoru — može iskoristiti u turbini. Međutim, svaki novi stupanj zagrijavanja ne donosi isto poboljšanje stupnja djelovanja: to se povećanje smanjuje povećanjem broja stupnjeva (sl. 61).

Određivanje termičkog stupnja djelovanja i određivanje po-djele na stupnjeve zagrijavanja izvršeno je uz pretpostavku da se kondenzat zagrijava mijешanjem s parom. Takav način zagrijavanja



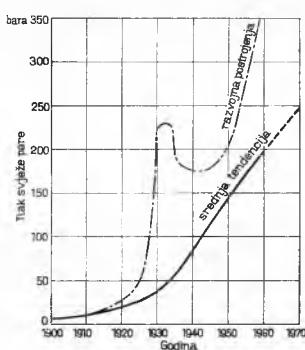
Sl. 60. Shematski prikaz procesa s tri stupnja zagrijavanja kondenzata

ima prednosti s obzirom na stupanj djelovanja, ali zahtijeva da se postavi pumpa za ukupnu količinu kondenzata (iz kondenzatora i kondenzirane pare za zagrijavanje) iza svakog stupnja zagrijavanja. Stoga se po pravilu upotrebljavaju površinski zagrijaci, u kojima se zbog prolaza topline kroz stijenku kondenzat zagrijava do niže temperature uz isti tlak pare za zagrijavanje. Vraćanje kondenzirane pare u krug ostalog kondenzata može se postići ili pumpanjem kondenzata iz svakog zagrijaca ili odvodenjem kondenzata iz zagrijaca višeg tlaka u zagrijac nižeg tlaka sve do

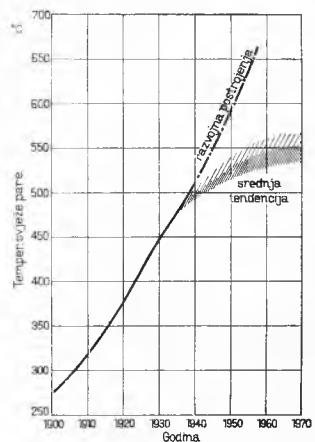


Sl. 61. Poboljšanje termičkog stupnja djelovanja u zavisnosti od temperature za grijanja kondenzata θ_2 i broja stupnjeva zagrijanja, za stanje svježe pare $p = 8.6$ a $i_p = 500^\circ\text{C}$ i za apsolutni tlak u kondenzatoru $p = 0.04$ at

turbinskog kondenzatora. U prvom slučaju prilike su jednake kao u slučaju zagrijavanja miješanjem, jer nakon dovođenja kondenzirane pare kondenzat se zagrije na istu temperaturu. U drugom slučaju postiže se niži stupanj djelovanja jer se dio topline dovodi u prethodni zagrijач, pa se na taj način smanjuje korisna



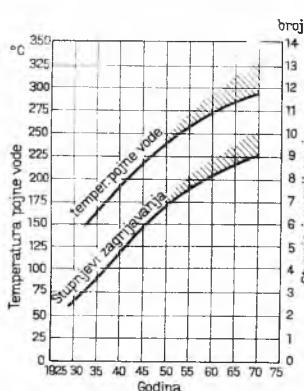
Sl. 62. Upotrijeljeni tlakovi pare u termoelektranama, razvoj od 1900. godine



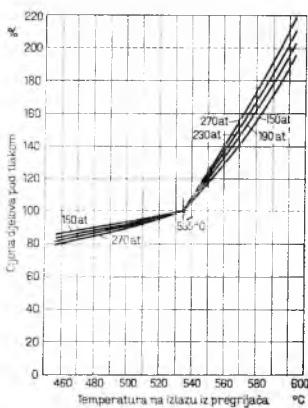
Sl. 63. Porast temperature svježe pare u termoelektranama, razvoj od 1900. godine

energija koju para za zagrijavanje proizvodi u turbini. Poboljšanje se postiže postavljanjem pomoćnih zagrijača u kojima kondenzirana para predaje toplinu prije ulaska u prethodni zagrijač.

Zaključak. Težnja za što višim stupnjem djelovanja doveo je do upotrebe sve viših tlakova (sl. 62) i sve viših temperaturi (sl. 63). Iz istih razloga danas se izvode postrojenja i sa devet

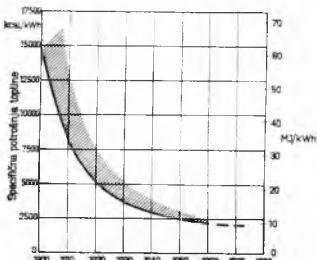


Sl. 64. Broj stupnjeva zagrijavanja kondenzata i temperatura pojne vode, razvoj od 1900 godine

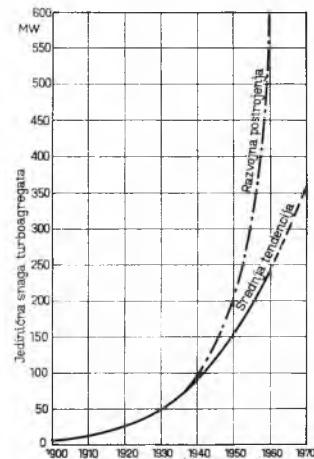


Sl. 65. Cijena dijelova termoelektrane pod tlakom u zavisnosti od temperature i tlaka pare

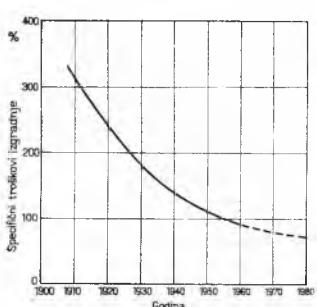
stupnjeva zagrijavanja kondenzata (sl. 64), pa i sa dva međupregrijanja. Izvjesno zasićenje u porastu temperature pare (sl. 63) prouzrokovano je činjenicom da za temperature pare iznad 535 °C treba dijelove pod tlakom izvesti od austenitnih čelika, koji su znatno skuplji od feritnih (sl. 65). Povišenje tlakova, temperatura, broja stupnjeva zagrijavanja kondenzata i upotreba međupregrijanja dovelo je do znatnog sniženja specifičnog potroška topline



Sl. 66. Specifični potrošak topoline za proizvodnju električne energije, razvoj od 1900 godine



Sl. 67. Snaga turboagregata u USA, razvoj od 1900 godine



Sl. 68. Specifične investicije termoelektrane srednje snage u pojedinim razdobljima, razvoj od 1900 godine

u termoelektranama (sl. 66). S druge strane, povećanje elektroenergetskih sistema omogućilo je upotrebu turbogeneratora velike snage (sl. 67), što je omogućilo sniženje specifičnih investicija po jedinici snage termoelektrane (sl. 68).

Troškovi izgradnje i pogona termoelektrana. Troškovi izgradnje termoelektrana obično su karakterizirani specifičnim investicijama i po jedinici instalirane snage (Din/kW). Troškovi izgradnje iznose dakle $I = i P_1$. U USA specifične investicije kreću se između 200 \$/kW za termoelektranu snage 50 MW i 130 \$/kW za termoelektranu snage 400 MW. Specifične investicije

zavise od niza faktora, od kojih su najvažniji: vrsta goriva, učin kotlova i snaga turboagregata, parametri pare, termička shema spoja, opskrba vodom, doprema ugljena, predviđena proširenja itd. Na osnovu iskustva u USA može se reći da se specifične investicije smanjuju za 20% udvostručenjem snage termoelektrane, otvorena izvedba (kotlovi i turboagregati na slobodnom) smanjuje specifične investicije za 12 do 18 \$/kW, termoelektrane ložene teškim uljem ili plinom mogu se izgraditi jeftinije do 35 \$/kW, utjecaji lokalnih prilika (priključci na prometne putove, opskrba vodom, zemljište, radionice i sl.) na povećanje specifičnih investicija zbog kasnijeg proširenja mogu se kretati između 12 i 95 \$/kW.

Udio pojedinih dijelova u ukupnim investicijama termoelektrane iznosi:

kotao	31...46%	prosjek	40%
turboagregat	30...45%	prosjek	34%
cjevovodi	7...11%	prosjek	10%
doprema ugljena	0,5...6%	prosjek	3%
regulacija i pogonska			
kontrola	3...6%	prosjek	4%
opskrba vodom	2...6%	prosjek	4%
ostalo	1...10%	prosjek	5%

Ukupni godišnji troškovi (Din/god) mogu se u termoelektranama podijeliti na dva dijela: na troškove proporcionalne instaliranoj snazi (stalne troškove) i troškove proporcionalne proizvedenoj energiji (troškove rada).

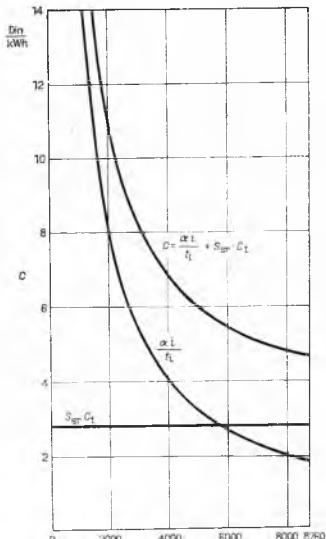
U prvu grupu troškova spadaju kamati na osnovna sredstva, amortizacija, otpisi, troškovi uprave, uzdržavanje nezavisno od proizvodnje, i plaće. Svi ti troškovi mogu se prikazati kao udio α od troškova izgradnje, pa su stalni troškovi jednak $K_S = \alpha i P_1$. Veličina α kreće se u granicama 0,12...0,18. U drugoj grupi troškova daleko najveći dio čine troškovi za gorivo; u tu grupu uključeni su još troškovi za mazivo i pripremu vode i troškovi uzdržavanja zavisni od proizvodnje. Za sve te troškove može se pretpostavljati da su proporcionalni proizvedenoj energiji, pa troškovi rada iznose $K_R = -c_g W$, gdje c_g praktički predstavlja srednje specifične troškove za gorivo, po jedinici energije, jer je udio ostalih troškova malen. Ako se uvede srednji specifični potrošak topline s_{sr} (MJ/kWh) i cijena topline c_t (Din/MJ) fco kotao, može se pisati $K_R = s_{sr} c_t W$. Ukupni godišnji troškovi iznose, dakle,

$$K = K_S + K_R = \alpha i P_1 + s_{sr} c_t W, \quad (37)$$

odakle se može odrediti proizvodna cijena energije c dijeljenjem s godišnjom poizvodnjom W , za koju se može još postaviti $W = P_1 t_1$, gdje je t_1 vrijeme kroz koje se iskorištava instalirana snaga, pa je

$$c = \frac{K}{P_1 t_1} = \frac{\alpha i}{t_1} + s_{sr} c_t. \quad (38)$$

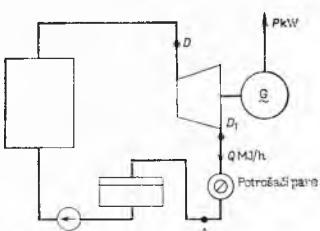
Za promatranoj termoelektranu sve su veličine konstantne osim t_1 i s_{sr} . Srednji potrošak topiline s_{sr} zavisi od iskorištenja elektrane, koje je karakterizirano veličinom t_1 i načinom korištenja (trajanju pogona, obliku dijagrama opterećenja). Ako se promatra zavisnost s_{sr} od t_1 , može se ustanoviti da srednji specifični potrošak s porastom t_1 najprije opada do nekog minimuma, a zatim za veće vrijednosti od t_1 raste. Međutim, te promjene veličine s_{sr} nisu znatne, pa se u znatnom broju slučajeva može računati sa $s_{sr} = \text{konst}$. Uz tu pretpostavku proizvodna cijena energije zavisi samo od trajanja iskorištenja t_1 (sl. 69).



Sl. 69. Zavisnost proizvodne cijene c u termoelektrani od trajanja iskorištenja t_1

Kombinirana proizvodnja pare i električne energije.

Neke industrije trebaju za tehnološki proces osim električne energije i paru. Para se osim toga koristi za grijanje prostorija bilo u tvornicama bilo u javnim zgradama i stanovima. Istovremena potreba električne energije i topline omogućuje u *toplanama i industrijskim elektranama* kombiniranu proizvodnju, koja poboljšava stupanj djelovanja.

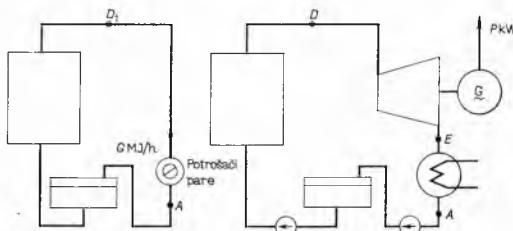


Sl. 70. Kombinirana proizvodnja pare i električne energije

potrošačima (sl. 70). Uspoređujući takav proces s odvojenom proizvodnjom pare i električne energije (sl. 71), dolazi se do omjera termičkih stupnjeva djelovanja

$$\frac{\eta_1}{\eta_2} = \frac{i_{D_1} - i_A}{i_D - i_A} + \frac{i_D - i_{D_1}}{i_D - i_E}, \quad (39)$$

gdje je η_1 stupanj djelovanja za proces prema shemi na sl. 70, a η_2 za proces prema shemi na sl. 71. Na sl. 72 prikazan je primjer



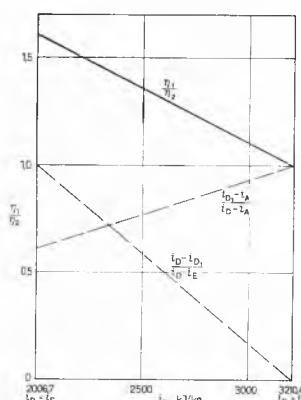
Sl. 71. Odvojena proizvodnja pare i električne energije

zavisnosti omjera (39) od stanja i_{D_1} na izlazu iz turbine (v. sl. 70) za određeno stanje svježe pare.

Takvi se odnosi dobivaju u svim slučajevima, što ukazuje na to da je energetski povoljno — kad god je to moguće — ostvariti kombiniranu proizvodnju pare i električne energije. Međutim,

ostvarenje kombinirane proizvodnje moguće je samo kad se potrošač topline nalazi u neposrednoj blizini elektrane, jer prenos pare na veće udaljenosti nije ekonomski podnošljiv.

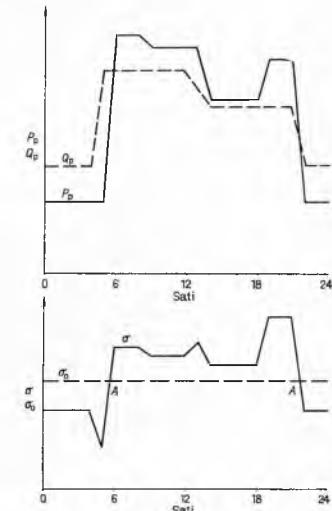
Kombinirana proizvodnja pare prema shemi na sl. 70 može se ostvariti kad postoji vremenski sklad između potrošnje pare i potrošnje električne energije, tj. kad je $P_p = \sigma_0 Q_p$, gdje je σ_0 konstanta, a P_p (kW) i Q_p (MJ/h) potrošnja električne i toplinske energije u svakom momentu, i kad mreža može da preuzme svu električnu energiju koja se može proizvesti. U svim drugim slučajevima treba za kombiniranu proizvodnju upotrijebiti druge sheme.



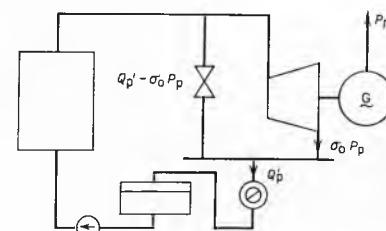
Sl. 72. Zavisnost omjera stupnjeva djelovanja η_1/η_2 od entalpije pare za grijanje i_{D_1} za $i_D = 3201,4 \text{ kJ/kg}$, $i_E = 2006,7 \text{ kJ/kg}$ i $i_A = 125,6 \text{ kJ/kg}$

Pri razmatranju energetskih odnosa u slučaju kombinirane proizvodnje treba razlikovati dva omjera: omjer moguće proizvodnje σ_0 i omjer potražnje σ . Omjer moguće proizvodnje definiran je izrazom $\sigma_0 = P/Q$, gdje je P (kW) snaga na generatoru, a Q (MJ/h) toplina koja se predaje potrošačima u kombiniranoj proizvodnji električne energije. Ako se zanemari utjecaj stupnjeva djelovanja i njihova zavisnost od opterećenja, omjer σ_0 zavisi od parametara svježe pare, od tlaka pare za potrošače i od temperature konden-

zata koji se vraća u elektranu. Taj omjer je, dakle, praktički konstantna veličina za izgrađenu elektranu, odnosno za odabrane parametre svježe pare, jer su ostale veličine zavisne od potrošača. S druge strane, omjer potražnje σ , koji zavisi od potrošnje električne energije P_p i od potrošnje topline Q_p prema izrazu $\sigma = P_p/Q_p$, varira i tokom dana u vrlo širokim granicama. Na sl. 73 prikazan je primjer dnevnog dijagrama potražnje električne energije i topline, te promjena omjera σ tokom dana, koja odgovara dijagramima potražnje. Samo u dva momenta tokom dana (tačke A na sl. 73) postoji jednakost $\sigma = \sigma_0$, pa je samo tada moguće zadovoljiti potražnju i električne energije i topline shemom na sl. 70. Pogon prema shemi na sl. 70 za slučaj $\sigma < \sigma_0$ nije moguće, jer se potrebnom količinom pare može proizvesti električna snaga veća od one koja je potrebna potrošačima. To bi dovelo do povećanja broja okretaja turbine, do djelovanja regulatora turbine i do smanjenja dovoda pare turbinu dok se ne uspostavi ravnoteža između proizvodnje i potrošnje električne snage, ali onda ne bi bila zadovoljena potražnja pare. Shema na sl. 74 omogućava opskrbu potrošača za slučaj $\sigma < \sigma_0$, jer osim protutlačne turbine postoji redukcijski ventil, preko kojega se dopunjuje manjak



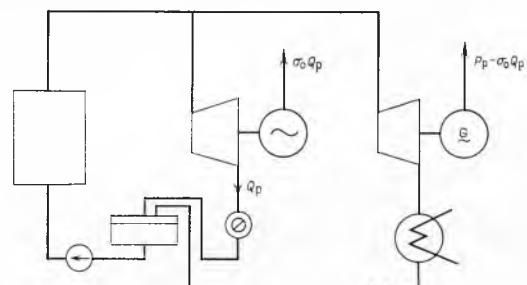
Sl. 73. Dijagrami potražnje električne energije P i topline Q te promjena omjera σ tokom dana



Sl. 74. Shema spoja za slučaj $\sigma < \sigma_0$

pare. Kroz turbinu naime prolazi količina pare koja odgovara toplini $\sigma_0 P_g$, a kroz redukcijski ventil struji razlika koja odgovara količini topline $Q_p - \sigma_0 P_g$.

Obrnuta je slika za slučaj $\sigma > \sigma_0$, jer tada potrošači električne energije traže snagu veću od one koju ekspanzijom u protutlačnoj turbinu može proizvesti para potrebljana potrošačima pare. Da se zadovolje oba potrošača, potrebno je postaviti još jednu kondenzacijsku turbinu (sl. 75), koja će osigurati nezavisnost proizvodnje električne energije od potražnje pare. Protutlačni agregat daje sada snagu $\sigma_0 Q_p$, a kondenzacijski agregat ostatak $P_p - \sigma_0 Q_p$.

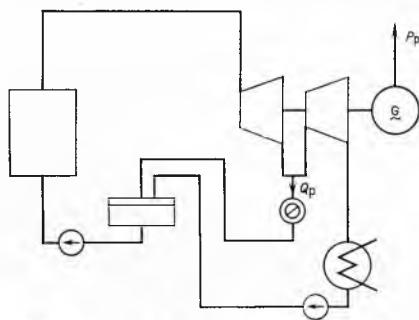


Sl. 75. Shema spoja za slučaj $\sigma > \sigma_0$

Razmatranja o odnosu između omjera σ_0 i σ ima puno značenje samo u slučaju kad promatrana elektrana radi izolirano od elekt-

troenergetskog sistema ili kad je elektroenergetski sistem malen u odnosu na promatranoj elektranu. Ako je elektroenergetski sistem velik prema promatranoj elektrani, može se računati da će se svi manjkovi električne energije moći nadoknaditi iz sistema i da će sistem moći preuzeti sve viškove.

Da se osigura potpuna elastičnost pogona, vrlo često se izvode parne turbine s oduzimanjem pare (sl. 76), koje uz korištenje reduk-



Sl. 76. Shema spoja turbine s oduzimanjem pare

cijskog ventila omogućuju opskrbu potrošača za sve moguće odnose između omjera σ i σ_0 .

Ukupni troškovi elektrane ne mogu se egzaktno podijeliti na troškove za proizvodnju pare i troškove za proizvodnju električne energije, pa je stoga nemoguće npr. odrediti proizvodnu cijenu za paru nezavisno od proizvodne cijene za električnu energiju. Često se stoga određuje proizvodna cijena električne energije u zavisnosti od proizvodne cijene pare ili proizvodna cijena pare u zavisnosti od proizvodne cijene električne energije.

Zavisnost između proizvodnih cijena električne energije i pare može se prikazati jednadžbom

$$K = c_e W + c_p Q, \quad (40)$$

u kojoj su K ukupni godišnji troškovi za proizvodnju pare i električne energije, c_e (Din/kWh) i c_p (Din/MJ) proizvodna cijena električne energije odnosno pare, W (kWh/god) proizvodnja električne energije, a Q (MJ/god) količina topline za potrošače. Dijeljenjem jednadžbe (40) sa W dobiva se izraz

$$\frac{K}{W} = c_{eo} = c_e + c_p \frac{Q}{W}, \quad (41)$$

u kojemu c_{eo} predstavlja fiktivnu proizvodnu cijenu električne energije uz pretpostavku da se svi troškovi prebacuju na električnu energiju. Omjer W/Q čija recipročna vrijednost dolazi u jedn. (41) ima značenje godišnjeg omjera σ_g . Kad se radi o protutlačnim agregatima bez mogućnosti uzimanja pare preko reduksionog ventila, omjer σ_g jednak je omjeru σ_0 ; u svim drugim slučajevima σ_g predstavlja omjer između proizvedene električne energije i topline potrebne potrošačima pare. Uvodjenjem omjera σ_g u jedn. (41) dobiva se:

$$c_{eo} = c_e + \frac{c_p}{\sigma_g}, \quad (42)$$

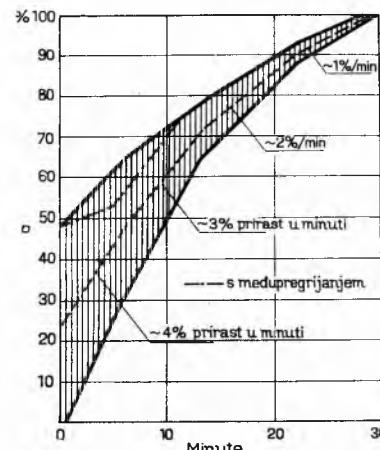
gdje su c_{eo} i σ_g konstante za promatranoj elektranu, pa se izraz (42) može prikazati pravcem u koordinatnom sistemu c_e , c_p (sl. 77). Taj pravac može poslužiti ne samo za grafičko određivanje proizvodnih cijena, nego on i ograničava odsjećima na osima ordinat i apscisā područje u kojem je kombinirana proizvodnja ekonomičnija od nekog drugog načina opskrbe potrošača potrebnom energijom. Neka npr. neka industrija koja treba i električnu energiju i paru može dobaviti električnu energiju po cijeni c_e' , a paru po cijeni c_p' . Unošenjem

tih cijena u dijagram (sl. 77) dobiva se tačka A , koja leži na desnoj strani pravca c_{eo} nacrtanog prema jedn. (42). Ako se sada pretpostavi da se troškovi u industrijskoj elektrani dijele tako da je proizvodna cijena električne energije upravo jednaka c_e' , tačkom B bit će određena proizvodna cijena pare c_p' u takvom postrojenju. U njemu se, dakle, može postići za dužinu AB niža proizvodna cijena pare od cijene uz koju se potrebna količina pare može dobaviti izvana. Izgradnja postrojenja je, dakle, ekonomski opravdana. Dužina AC prikazuje smanjenje cijene električne energije ako se polazi od cijene pare c_p' .

Prilagođavanje parnih termoelektrana opterećenju. U termoelektranama treba razlikovati mogućnost prilagođavanja promjenama opterećenja u razdoblju velikih opterećenja od mogućnosti prilagodavanja malim opterećenjima.

Mogućnost brze promjene opterećenja *kotlova* zavisi od dva faktora: od sposobnosti regulacije loženja i pomoćnih pogona i od sposobnosti akumuliranja topline u kotlu. Sposobnost regulacije loženja s utjecajem pomoćnih pogona definirana je kao mogućnost porasta opterećenja u jedinici vremena, u postocima od maksimalnog učina kotla u jedinici vremena. Ta sposobnost za kotlove s prirodnim cirkulacijom kreće se od $\sim 0,1\%$ do $\sim 0,8\%/\text{s}$, zavisno od načina loženja, vrste kotla i vrste ugljena. Sposobnost regulacije loženja kotlova s prisilnom cirkulacijom može iznositi i do $3\%/\text{s}$. Sposobnost akumuliranja topline u vodi kotla još više povećava mogućnost brze promjene opterećenja kotla.

Brzina promjene opterećenja *parne turbine* ograničena je dodatnim naprezanjem kućišta, što je posljedica promjene temperature i tlaka pare. Uz pretpostavku da je turbina prilikom upuštanja dobro zagrijana, može se brzina promjene opterećenja prikazati dijagramom na sl. 78. Srednja crtkana linija prikazuje mogućnost promjene opterećenja po unaprijed utvrđenom voznom redu.

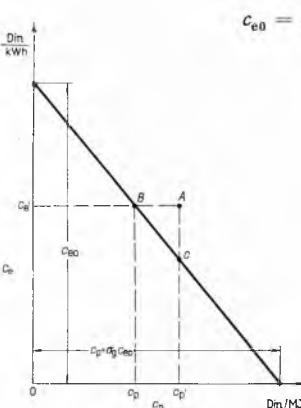


Sl. 78. Granice brzine promjene opterećenja parne turbine

Osim toga, moguće su promjene opterećenja po svakoj liniji koja leži između gornje i donje linije. Poraste li, na primjer, opterećenje od donje granične linije na gornju, daljnja promjena opterećenja smije se vršiti po gornjoj graničnoj liniji.

Za određivanje mogućnosti prilagođavanja promjenama opterećenja mjerodavna je turbina, jer je dopuštena brzina promjene opterećenja turbine manja od dopuštene promjene opterećenja kotla.

Pitanje prilagođavanja potrebama u razdoblju malih opterećenja nije, međutim, samo tehničko, nego i ekonomsko pitanje. Postoje, naime, u principu dvije mogućnosti: prva, da se obustavi dio aggregata ili dio termoelektrana koji je bilo potrebno staviti u pogon za pokrivanje potreba u razdoblju velikih opterećenja, i druga, da se ti aggregati ili termoelektrane ne obustave. Obustava aggregata izaziva dodatni potrošak goriva za stavljanje u pogon kotla i turbine, kao i za potrošak za vrijeme obustave (otpunjivanje, polaganje okretanje aggregata i slično). S druge strane, ako se aggregati ne obustave, to dovodi do potrebe da aggregati, ili dio aggregata, rade s malim opterećenjem pri kojem je stupanj djelovanja nizak, što također izaziva dodatni potrošak goriva. Usposredovanjem



Sl. 77. Odnos proizvodne cijene električne energije c_e i cijene pare c_p u termoelektrani s kombiniranim proizvodnjom

dodatnog potroška zbog obustavljanja i dodatnog potroška zbog neobustavljanja, a uvezvi u obzir trajanje malih opterećenja, donosi se odluka o načinu pogona u tom razdoblju. Takva situacija pojavljuje se u elektroenergetskom sistemu u kojem rade same termoelektrane ili u kojem je udio hidroelektrana neznatan, a omjer minimalnog i maksimalnog opterećenja m_0 nije suviše nizak.

U elektroenergetskom sistemu u kojem je udio hidroelektrana značajan pojavljuje se u periodu velikih voda potreba obustavljanja agregata u termoelektranama radi sprečavanja preljeva u razdoblju malih opterećenja, jer je zbog tehničkog minimuma nemoguće proizvodnju termoelektrana smanjiti ispod odredene granice. Takva situacija može nastupiti i u sistemu samih termoelektrana kad je omjer m_0 vrlo nizak, pa je suma tehničkih minimuma agregata veća od minimalnog opterećenja. U prvom slučaju obustavljanje agregata predstavlja smanjenje ukupne potrošnje goriva, koja bi bila potrošena za slučaj neobustavljanja agregata, pa je obustavljanje još povoljnije nego kad se radi samo o razlici potroška između rada s povolnjim i nepovolnjim stupnjem djelovanja. U drugom slučaju se radi o nužnom obustavljanju agregata zbog nepovoljnog dijagrama opterećenja.

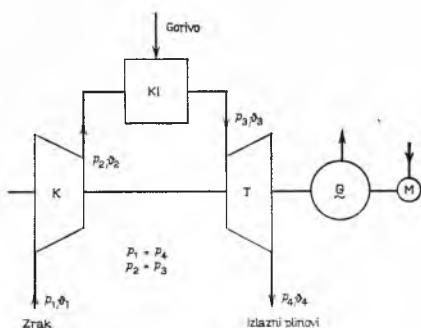
Tehnički minimum rada kotlova zavisi od vrste loženja, od vrste goriva i od održavanja stabilnog izgaranja. Kotlovi s loženjem na rešetki mogu se održati u pogonu u praznom hodu, što nije slučaj s kotlovima loženim ugljenom prašinom, kod kojih tehnički minimum zavisi, uglavnom, od sadržaja hlapljivih sastojaka u gorivu. Tehnički minimum kotla može se još smanjiti uvođenjem vrlo vrućeg zraka u komoru za izgaranje, kao i postavljanjem pomoćnih sapnica za loženje, na primjer, mazutom, koje se stavljuju u pogon samo u slučaju pogona sa sniženim tehničkim minimumom.

Tehnički minimum turboagregata je određen temperaturom pare na izlazu iz turbine. Praktički može turbina raditi u praznom hodu uz uvjet da se poduzmu posebne mјere, naročito što se tiče hlađenja ejektora (korištenje sirove vode) i dobave pare za otprijećaj pojne vode.

Termoelektrane s plinskim turbinama

U takvim termoelektranama pogonski strojevi generatora su plinske turbine. Danas se plinske turbine grade kao turbine s otvorenim procesom, jer dosada nije uspjelo izgraditi plinske turbine s zatvorenim procesom koje bi imale potrebnu pogonsku sigurnost.

Osnovni su elementi postrojenja s plinskim turbinama koje rade s otvorenim procesom: kompresor, komora za izgaranje i



Sl. 79. Osnova shema postrojenja s plinskom turbinom. K kompresor, KI komora za izgaranje, T plinska turbina

plinska turbina (sl. 79). Kompressor K upija zrak iz atmosfere i tiski ga u komoru za izgaranje KI, u koju se dovodi gorivo (u tekućem ili plinovitom stanju). Izgaranje se događa uz konstantni tlak, a izlazni plinovi struje kroz turbinu T i ekspandiraju u njoj do atmosferskog tlaka.

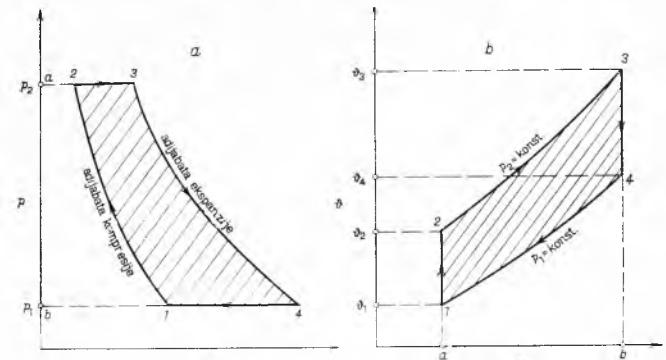
Kao gorivo za plinske turbine dolaze u obzir derivati nafte, zemni plin, grotleni plin i plinovi iz rafinerije nafte.

Postrojenje s plinskom turbinom može se staviti u pogon samo pomoćnim izvorom energije. U tu svrhu služi asinhroni motor (sl. 79).

Stupanj djelovanja plinske turbine zavisi od izvedbe (zagrijavanje zraka, višestepena kompresija i višestepena ekspanzija), pa s komplikiranom izvedbom raste stupanj djelovanja, ali rastu i potrebne investicije. Postrojenja s plinskim turbinama sa višestrukom kompresijom i višestrukom ekspanzijom imaju stupanj djelovanja i specifične investicije usporedive sa stupnjem djelovanja i specifičnim investicijama modernih termoelektrana. Na suprot tome najjednostavnija postrojenja s plinskim turbinama rade sa znatno nižim stupnjem djelovanja (17...20%), a specifične investicije iznose samo polovinu od specifičnih investicija za postrojenja s visokim stupnjem djelovanja.

Stupanj djelovanja elektrana s plinskim turbinama.

Proces u postrojenju s plinskom turbinom bez gubitaka može se prikazati u $p-v$ -dijagramu (sl. 80 a) ili u $\vartheta-s$ -dijagramu (sl. 80 b)



Sl. 80. Osnovni proces u plinskoj turbinu

(v. Termodynamika). Od 1 do 2 uzduh se adijabatski komprimira u kompresoru, a toplina se dovodi u komoru za izgaranje uz konstantan tlak p_2 . Plin u turbinu adijabatski ekspandira (od 3 do 4), a odvodi iz nje uz konstantan tlak p_1 , koji je jednak tlaku okoline. Dovedena toplina proporcionalna je površini $23ba$ u $\vartheta-s$ -dijagramu (sl. 80 b) odnosno $Q_1 = c_p(\vartheta_3 - \vartheta_2)$, a odvedena toplina proporcionalna je površini $14ba$, odnosno $Q_2 = c_p(\vartheta_4 - \vartheta_1)$. Korisna toplina je razlika tih toplina, a termički stupanj djelovanja je omjer te razlike i dovedene topline, pa je

$$\eta_{ter} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{\vartheta_4 - \vartheta_1}{\vartheta_3 - \vartheta_2}, \quad (41)$$

a efektivni stupanj djelovanja

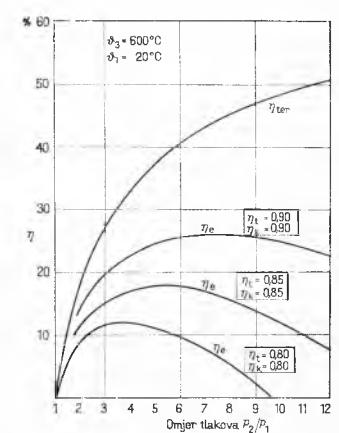
$$\eta_e = \frac{\eta_t \vartheta_3 \left[1 - \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] - \frac{\vartheta_1}{\eta_k} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]}{\vartheta_3 - \vartheta_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}}, \quad (42)$$

gdje je η_t i η_k , stupanj djelovanja turbine odnosno kompresora.

Termički stupanj djelovanja (sl. 81) raste s povećanjem omjera tlakova. Omjer uz koji se postiže optimalni efektivni stupanj djelovanja zavisi, međutim, od stupnjeva djelovanja turbine i kompresora, a kreće se između 4 i 7.

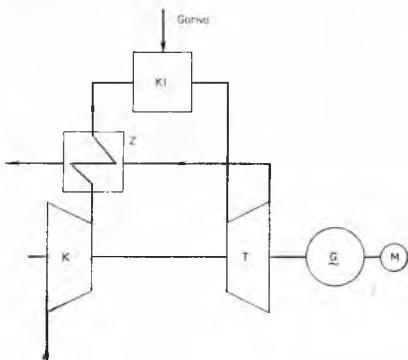
Stupanj djelovanja postrojenja prikazanog na sl. 79 nizak je zbog velike količine topline koju odvode plinovi na izlazu iz turbine i zbog znatne energije koju treba utrošiti za kompresiju uzduha; kreće se između 12 i 26%.

Plinovi koji su ekspandirali u turbinu imaju temperaturu (ϑ_4 na sl. 80) višu od temperaturu komprimiranog uzduha (ϑ_2),



Sl. 81. Termički stupanj djelovanja η_{ter} i efektivni stupanj djelovanja η_e postrojenja s plinskom turbinom

pa je moguće izlaznim plinovima predgrijavati komprimirani uzduh za izgaranje. To se postiže postavljanjem zagrijača uzduha (sl. 82). Međutim, nije moguće iskoristiti svu toplinu izlaznih plinova jer se izlazni plinovi mogu koristiti za zagrijavanje u zraku.



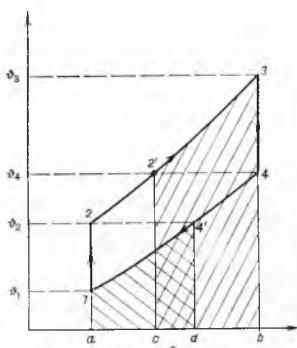
Sl. 82. Schemat potrojenja s plinskom turbinom i zagrijaćem uzduha. K kompresor, KI komora za izgaranje, T plinska turbina, Z zagrijać uzduha

javanje uzduha samo do temperature ϑ_2 komprimiranog uzduha. S druge strane, stoga što je zagrijan uzduh potrebno je dovesti samo onu količinu goriva koja je potrebna za zagrijavanje uzduha od temperature ϑ_4 do temperature ϑ_3 (sl. 83). To dovodi do smanjenja dovedene i smanjenja odvedene topline, pa je termički stupanj djelovanja

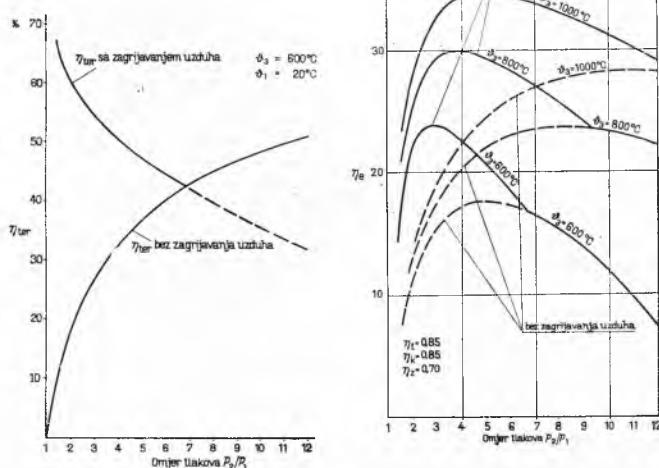
$$\eta_{ter} = 1 - \frac{\vartheta_2 - \vartheta_1}{\vartheta_3 - \vartheta_4}. \quad (43)$$

Termički stupanj djelovanja postrojenja sa zagrijaćem uzduha veći je od termičkog stupnja djelovanja bez tog zagrijjača u svim slučajevima kad je $\vartheta_4 > \vartheta_2$. Upotreba zagrijjača za slučaj $\vartheta_4 < \vartheta_2$, do čega dolazi kod viših omjera tlakova, smanjuje termički stepen djelovanja u usporedbi s postrojenjem bez zagrijjača uzduha (sl. 84) jer se tada komprimirani uzduh hlađi izlaznim plinovima.

Efektivni stupanj djelovanja postrojenja sa zagrijaćem uzduha može se odrediti također iz jedn. (42), ali sada dovedenu toplinu — koja dolazi u na-



Sl. 83. Proces u plinskoj turbinu sa zagrijaćem uzduha. I 4' da odvedena toplina, 2' 3 b c dovedena toplina

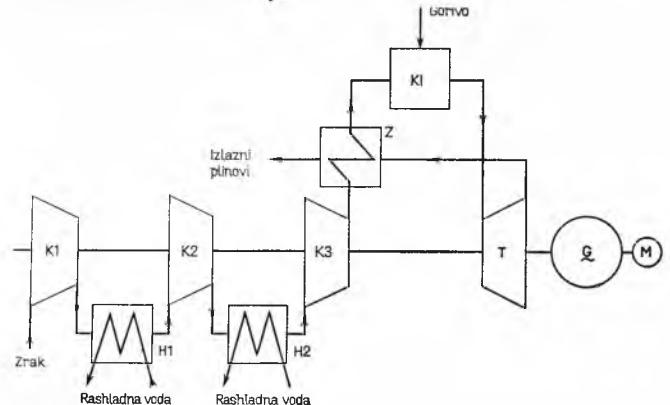


Sl. 84. Termički stupanj djelovanja postrojenja s plinskom turbinom sa zagrijaćem i bez zagrijjača uzduha

zivniku — treba smanjiti za količinu topline koja se u zagrijajuču predaje komprimiranom uzduhu.

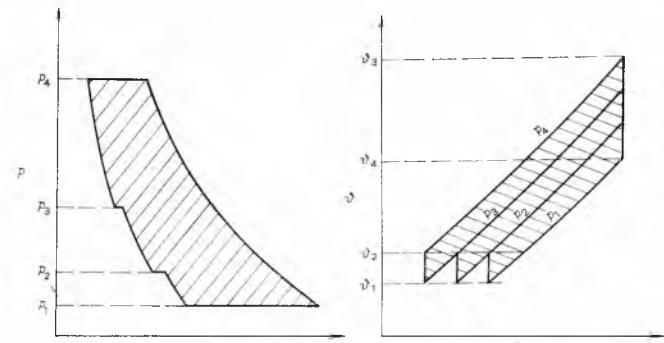
Zbog visokog termičkog stupnja djelovanja postrojenja sa zagrijjačem uzduha (sl. 84) postiže se u području malih omjera tlakova maksimalni efektivni stupanj djelovanja za niži omjer tlakova nego u postrojenju bez zagrijavanja uzduha (sl. 85). Taj je optimalni omjer to niži što je niža maksimalna temperatura procesa.

Poboljšanje stupnja djelovanja može se postići kompresijom u više stupnjeva s hlađenjem između pojedinih stupnjeva. Sniženjem temperature uzduha smanjuje se specifični volumen uzduha v , što dovodi do smanjenja potrebnog rada kompresije, koji je proporcionalan integralu $\int v dp$.



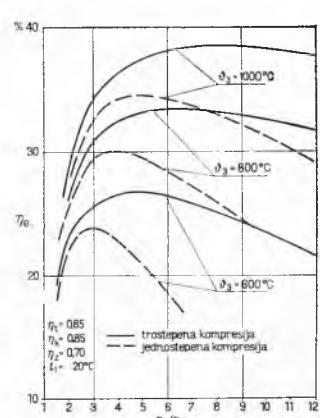
Sl. 86. Schemat postrojenja s plinskom turbinom s trostopenom kompresijom i sa zagrijavanjem uzduha. K1, K2, K3 kompresori, KI komora za izgaranje, T plinska turbina, H1, H2 hladionici uzduha, Z zagrijać uzduha

Shema postrojenja sa tri stupnja kompresije prikazana je na sl. 86, a prikaz procesa u pV -dijagramu i ϑs -dijagramu nacrtan se na sl. 87.



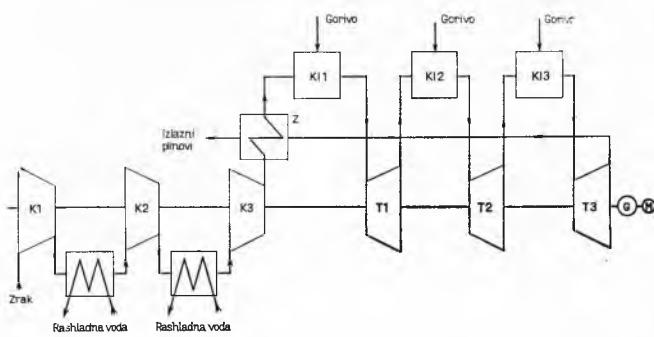
Sl. 87. Proces u postrojenju s plinskom turbinom s trostopenom kompresijom

Efektivni stupanj djelovanja za postrojenje s kompresijom u tri stupnja, u zavisnosti od omjera konačnog i početnog tlaka, prikazan je na sl. 88. U svim je slučajevima stupanj djelovanja postrojenja s kompresijom u tri stupnja bolji nego u postrojenju s kompresijom u jednom stupnju. Maksimalni stupanj djelovanja postiže se uz veći omjer tlakova nego u slučaju jednostepene kompresije. Kompresija u više stupnjeva djeluje, dakle, s obzirom na omjer tlakova uz koji se postiže maksimalni stupanj djelovanja, u protivnom smjeru nego što djeluje zagrijavanje komprimiranog uzduha.



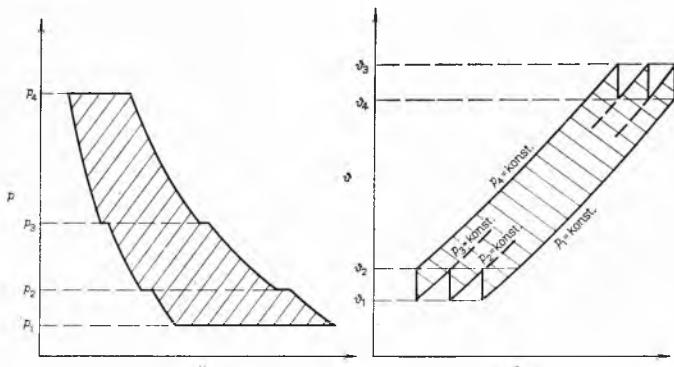
Sl. 88. Efektivni stupanj djelovanja postrojenja s plinskom turbinom i s trostopenom kompresijom

Kod ekspanzije u više stupnjeva plinovi se ponovo zagrijavaju dovodenjem goriva nakon djelomične ekspanzije. Ponovno zagrijavanje se vrši do najviše temperature procesa (ϑ_s).



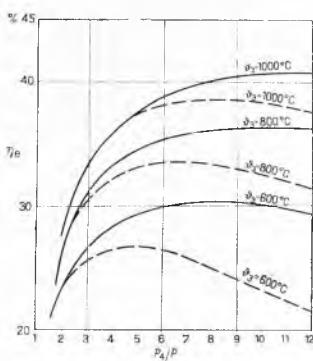
Sl. 89. Shema postrojenja s plinskom turbinom s trostopenom kompresijom i trostopenom ekspanzijom te sa zagrijavanjem uzduha. K1, K2, K3 kompresori, KI1, KI2, KI3 komore za izgaranje, T1, T2, T3 plinske turbine, Z zagrijivač uzduha

Shema postrojenja s tri stupnja ekspanzije prikazana je na sl. 89, a na sl. 90 prikazan je proces u $p-v$ -dijagramu i ϑ_s -dijagramu.



Sl. 90. Proces u postrojenju s plinskom turbinom sa trostopenom kompresijom i trostopenom ekspanzijom

Ekspanzija u više stupnjeva povećava stupanj djelovanja, pogotovo u području velikih omjera tlakova (sl. 91), pa se maksimalni stupanj djelovanja postiže uz veći omjer tlakova nego u slučaju kompresije u više stupnjeva i ekspanzije u jednom stupnju.

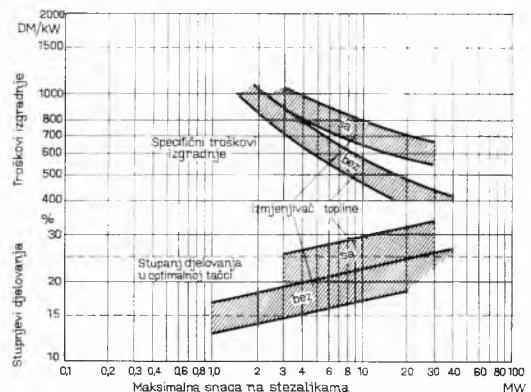


Sl. 91. Efektivni stupanj djelovanja postrojenja s plinskom turbinom s trostopenom kompresijom i trostopenom ekspanzijom. Puna crta: trostepena ekspanzija i trostepena kompresija, crticano: jednostepena ekspanzija i trostepena kompresija

sve turbine rade s konstantnim brojem okretaja, što otežava prilagođavanje promjenama opterećenja i povećava potrošnju goriva pri djelomičnom opterećenju. Podjela kompresije i ekspanzije u dva ili više stupnjeva omogućava da se izbjegnu navedene poteškoće. U tom slučaju postrojenje ima dva ili tri vratila: na jednom od

njih je generator s jednom turbinom i jednim kompresorom, a na ostalima po jedna turbina i po jedan ili dva kompresora. Na taj način samo se na jednom od vratila mora održavati konstantni broj okretaja, a na ostalima broj okretaja može se mijenjati s promjenom opterećenja kako bi se postigao što bolji stupanj djelovanja.

Uzevši u obzir kompresiju u više stupnjeva, mogućnost postavljanja zagrijivača uzduha i podjelu postrojenja na više vratila, može se ostvariti čitav niz postrojenja od vrlo jednostavnih s malim investicijama do komplikiranih koja traže velika ulaganja.



Sl. 92. Specifične investicije i stupanj djelovanja postrojenja s plinskim turbinama

Kao što smo ustanovili, uvodenjem novih elemenata u postrojenje i podjelom kompresije i ekspanzije u dva ili više stupnjeva poboljšava se stupanj djelovanja postrojenja, ali to je po pravilu spojeno s povećanjem investicija za izgradnju postrojenja. Zavisnost specifičnih investicija od snage i izvedbe postrojenja prikazana je na sl. 92.

Prednosti i nedostaci elektrana s plinskim turbinama.

Uspoređujući postrojenja s parnim turbinama i postrojenja s plinskim turbinama može se zaključiti da obje izvedbe imaju prednosti i nedostatke o kojima treba voditi računa prilikom izbora.

Priprema vode za napajanje kotlova u postrojenjima s parnim turbinama zahtijeva znatne uređaje, koji potpuno otpadaju u postrojenjima s plinskim turbinama ili su zamijenjeni filterima za uzduh u područjima u kojima u uzduhu ima znatnih količina prašine. Uzdržavanje tog filtera neusporedivo je jednostavnije od pripreme vode za kotlove.

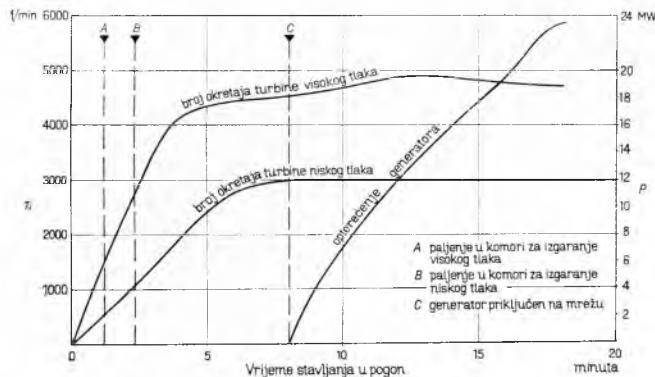
Za pogon postrojenja s višestrukom kompresijom potrebna je određena količina vode za hlađenje uzduha, ali potrebna količina vode znatno je manja (u odnosu 5 : 1) od količine vode potrebne za hlađenje kondenzatora parne turbine iste snage. Razlog toj razlici treba tražiti u činjenici da plinska turbina znatan dio topline koja se ne može iskoristiti predaje neposredno okolini, dok se u postrojenju s parnom turbinom najveći dio neiskorištene topline predaje okolini posredstvom vode za hlađenje kondenzatora.

Postrojenje s plinskom turbinom smješta se u jednoj prostoriji, što olakšava nadzor nad postrojenjem i ima za posljedicu da je površina potrebna za izgradnju postrojenja s plinskom turbinom manja od površine potrebne za postrojenje s parnom turbinom iste snage.

Vrijeme potrebno za stavljanje u pogon iz hladnog stanja postrojenja s parnom turbinom iznosi i nekoliko sati, a za postrojenje s plinskom turbinom otvorenog sistema to vrijeme nije dulje od 20–30 min, pa i za postrojenje s dva vratila (sl. 93).

Međutim, uz navedene prednosti plinska turbina u usporedbi s parnom turbinom ima i nedostatke, koji su dosada onemogućili veću upotrebu plinskih turbina za proizvodnju električne energije. Glavni je nedostatak plinskih turbina nemogućnost upotrebe ugljena kao goriva. Čak je i upotreba teških ulja kao goriva ograničena na temperature koje nisu znatno više od 600 °C. U pepelu teških ulja ima naime soli, koje ulaze u turbine u tekućem stanju, tamo se talože i izazivaju koroziju lopatica turbine. Vanadijum-pentoksid je glavni predstavnik uzročnika korozije. Kao drugi

nedostatak može se navest nemogućnost (prema današnjem stanju razvoja) izgradnje jedinica većih od 15 MW (na jednom vratilu), odnosno od ~ 40 MW (na dva vratila), što predstavlja nekoliko puta (i desetak puta) manje jedinice od onih koje se mogu postići parnim turbinama.



Sl. 93. Dijagram stavljanja u pogon postrojenja s plinskom turbinom (Livorno) snage 25 MW

Navedeni nedostaci plinskih turbina imaju svoje puno značenje kad se radi o izgradnji elektrana koje treba da proizvode temeljnu energiju. Međutim, kad treba izgraditi rezervne elektrane ili vršne elektrane za manje područje, dolaze više do izražaja prednosti plinskih turbina nego njihovi nedostaci. Zbog malog trajanja iskorištenja rezervne ili vršne elektrane, troškovi za gorivo nemaju presudni utjecaj, pa se može upotrijebiti postrojenje s plinskom turbinom jednostavne izvedbe koja radi s relativno niskom maksimalnom temperaturom. Postrojenje jednostavne izvedbe (bez zagrijavanja komprimiranog uzduha, s jednostrukom kompresijom i ekspanzijom) traži niske investicije, omogućava vrlo brzo stavljanje u pogon i lako održavanje postrojenja, te praktički ne traži vode za hlađenje (osim za hlađenje ulja za regulaciju i za mazanje).

Postrojenje s plinskom turbinom vrlo je pogodno za energetsko korištenje otpadnih plinova u industriji (grotlenih plinova visokih peći, plinova iz rafinerija nafte i kemijskih industrija).

Plinska turbina može se upotrijebiti i za kombiniranu proizvodnju električne energije i topline bilo u obliku tople vode bilo u obliku pare. Za zagrijavanje vode, odnosno za zagrijavanje i isparavanje vode, upotrebljava se smjesa plinova i uzduha na izlazu iz turbine. Parametri pare koja je proizvedena topilom izlaznih plinova iz plinske turbine ne mogu se odabratи proizvoljno, jer oni zavise od temperature izlaznih plinova; da bi se iskoristila toplina tih izlaznih plinova za proizvodnju pare, doveđe se izlazni plinovi u kotao normalne konstrukcije, u kojem se loži bilo kakvo gorivo. Izgaranje goriva u kotlu može se osigurati jer se u izlaznim plinovima nalaze dovoljne količine kisika za potpuno izgaranje goriva, budući da gorivo u komori za izgaranje plinske turbine izgara uz znatan višak uzduha.

Nuklearne termoelektrane

Nuklearne termoelektrane su postrojenja u kojima se toplinska energija koja se oslobada u nuklearnim reaktorima prilikom raspada atoma »nuklearnih goriva« iskorištava za proizvodnju električne energije. Na taj način dobivena toplinska energija upotrebljava se, pri današnjem stanju razvoja tehnike, samo za stvaranje vodene pare kojom se tjeraju turboagregati.

Prva nuklearna termoelektrana koja je uključena u električnu mrežu stavljena je u pogon 1954 u SSSR. Snaga je 5 MW, gorivo na 5–6% obogaćeni uran, moderator grafit, a rashladni medij voda. U Velikoj Britaniji je prva nuklearna termoelektrana stavljena u pogon 1956 (Calder Hall, gorivo prirodni uran, moderator grafit, rashladni medij ugljik-dioksid). Iste je godine i u Francuskoj išla u pogon prva nuklearna termoelektrana (Marcoule G-1). Prva nuklearna termoelektrana u USA stavljena je u pogon krajem 1957 (Shippingport, 60 MW, gorivo visokoobogaćeni uran, rashladni medij voda pod tlakom od ~ 140 bara). Danas je u pogonu i u izgradnji veći broj nuklearnih termoelektrana u mnogim zemljama.

U nuklearnoj termoelektrani termički proces u principu je isti kao u parnoj kondenzacionoj termoelektrani. Novi je element reaktor, koji s obzirom na funkciju zamjenjuje ložiste kotla (ako u krugu postoji izmjenjivač topline), odnosno parni kotao (ako se para iz reaktora dovodi neposredno u turbinu). Na slici 94

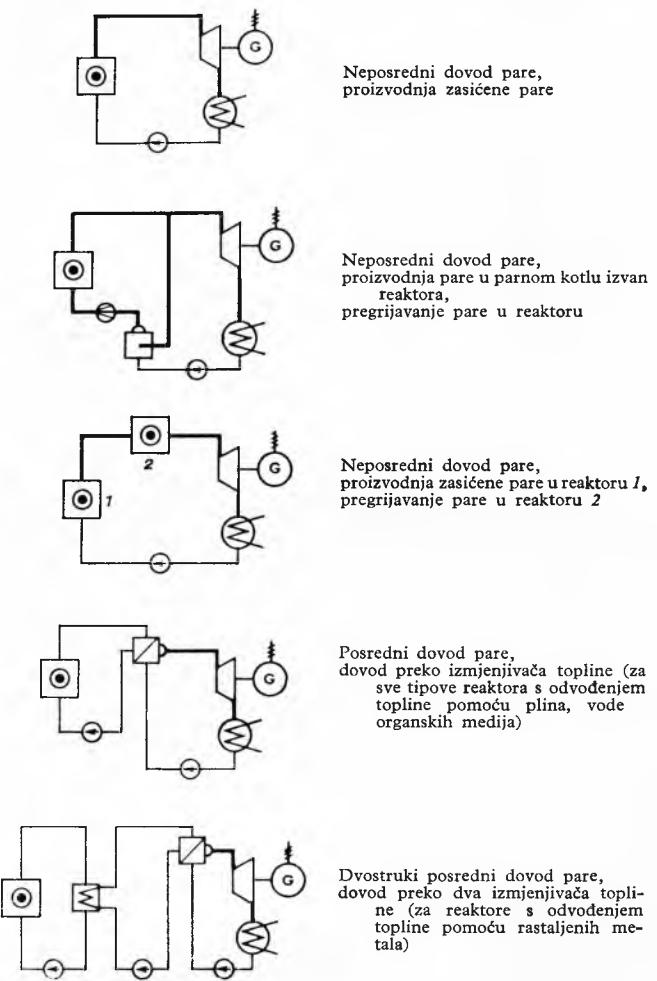
prikazane su osnovne sheme spoja za proizvodnju pare u nuklearnoj termoelektrani.

Nuklearni reaktor je uređaj u kojem se fisioni materijal izvrgnut bombardiraju neutronima raspada, a pri tom raspodu oslobađaju se novi neutroni koji su po broju i po brzini dovoljni da održavaju raspadanje. (V. o tome članke *Fisija atomskog jezgra* i *Nuklearni reaktor*.)

Za odvodenje topline iz tijela reaktora mogu se upotrijebiti: voda, neki plinovi (CO_2 , He), rastaljeni metali (Na, K) i neki organski spojevi. Rashladni medij struji kroz tijelo reaktora, preuzima toplinu i dovodi je bilo neposredno u turbinu (ako je rashladni medij voda koja izlazi iz reaktora u obliku pare) ili u izmjenjivač topline u kojem se isparava voda.

Odvodenje topline običnom vodom ima znatnih prednosti (mogućnost i iskustvo pripreme vode, visoki koeficijent prelaza topline), ali i nedostataka. Ako se kao rashladni medij upotrebljava voda, ne može se upotrijebiti kao fisioni materijal prirodni uran, a za postizanje visokih temperatura potrebno je raditi pod visokim tlakom. Posebnu pažnju treba posvetiti pripremi vode jer nečistoće u vodi mogu postati znatno radioaktivne. Ugljik-dioksid je podesan za odvodenje topline iz reaktora zbog njegovih povoljnih nuklearnih karakteristika, relativno velikog koeficijenta prelaza topline i zbog njegove kemijske stabilnosti. Ugljik-dioksid ne postaje radioaktiv u prilikom prolaza kroz reaktor, što pojednostavnjuje izvedbu. Osim toga ne postoje problemi korozije. Mogućnost rada s visokim temperaturama uz male tlakove, kao i visoki koeficijent prelaza topline, dovele su do upotrebe rastaljenih lakih metala kao medija za odvodenje topline iz reaktora. Kao medij se upotrijebiti natrijum ili legura natrijuma i kalijuma. (V. *Nuklearni pogon*.)

Zrake što ih emitiraju izvori ionizirajućih zračenja (reaktor, rashladni medij, radioaktivni otpaci) izazivaju oštećenja pojedinih



Sl. 94. Osnovne sheme spoja za proizvodnju pare u nuklearnoj termoelektrani

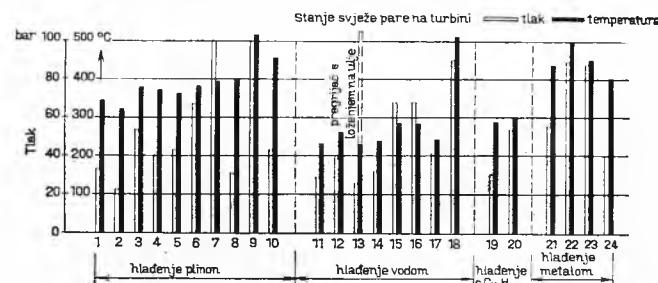
ELEKTRANE

organu ljudi koji su im izvrgnuti, ili njihovog organizma u cijelini. Intenzitet oštećenja je razmjeran energiji koju zračenje ionizacijskim procesima predaje organizmu, tzv. apsorbiranoj dozi zračenja, a apsorbirana doza zračenja zavisna je od intenziteta zračenja kojemu je organizam izvrgnut i vremena kroz koje mu je izvrgnut. Radi biološke zaštite osoba koje rade u nuklearnoj elektrani ili se nalaze u njezinoj blizini treba da budu poduzete mјere kako bi intenzitet zračenja kojemu bi one mogle biti izložene bio neopasan; treba također voditi kontrolu postojanja nuklearnog zračenja u prostorima gdje se ljudi kreću i apsorbirane doze koju oni primaju.

Zaštita osoblja u elektrani i u okolini može se podijeliti u tri dijela: zaštitu oko reaktora, zaštitu svih dijelova postrojenja koja su radioaktivna ili to mogu postati i zaštitu okoline od radioaktivnih otpadaka.

Biološki štit je zaštita oko reaktora koja se izvodi najčešće betonskim zidem (debljine i nekoliko metara) s dodacima bora, željeza i sl. O tome vidi članak *Biološki štit*, TE 2, str. 37.

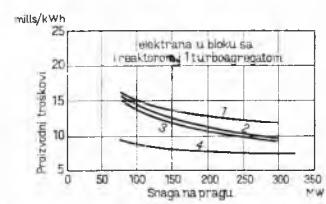
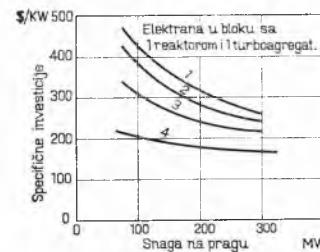
Dijelovi postrojenja koji su radioaktivni ili to mogu postati postavljaju se u čelične posude, dok se zaštita od radioaktivnih otpadaka vrši već prema vrsti tih otpadaka. Razlikuju se stalni i povremeni otpaci. Stalni otpaci su uzduh i plinovi iz nuklearne termoelektrane koji se puštaju u atmosferu, pa lokacija s obzirom na okolinu i na meteorološke prilike mora biti tako odabранa da to ne smeta okolini. Proizvodi raspadanja, ostaci nuklearnih goriva, ostaci izmjenjivača za pripremu vode, koji se uvrštavaju u povremene otpatke, vrlo su radioaktivni i moraju se deponirati. Proizvodi raspadanja i ostaci goriva smještaju se u posebne betonske posude u kojima se prevoze bilo u postrojenja za ponovnu obradu bilo za deponiranje u more ili u zemlju u nenaseljenim područjima. Otpaci koji su slabije radioaktivni spremaju se kroz izvjesno vrijeme u betonske rezervoare, a nakon toga se ispuštaju u rijeku ili more. (V. *Fisioni proizvodi*.)



Radi zaštite okoline u slučaju težeg kvara ili eksplozije u nuklearnoj termoelektrani, nuklearnu termoelektranu treba smjestiti izvan naseljenog područja, tako da zaštitna površina oko termoelektrane iznosi najmanje 2,5 km².

O utvrđivanju postojanja ionizirajućih zračenja i određivanju njihovog intenziteta v. članak *Detectacija nuklearnog zračenja* (sl. 240). O metodama određivanja apsorbirane doze v. članak *Dozimetrija ionizujućih zračenja* (str. 387).

Tlakovi i temperature pare u nuklearnim termoelektrana niži su nego u termoelektrana s parnim kotlom iste snage (sl. 95). Specifične investicije za izgradnju nuklearnih termoelektrana



Sl. 97. Zavisnost specifičnih investicija američkih nuklearnih termoelektrana od snage elektrane. 1 Reaktor s vremenom vodom, 2 reaktor s vodom pod tlakom, 3 organski moderirani i hlađeni reaktor, 4 termoelektrana ložena ugljenom

veće su nego za izgradnju termoelektrana s parnim kotlovima (sl. 96 i 97), a to za sada vrijedi i za cijenu energije na pragu (sl. 98).

Geotermičke elektrane

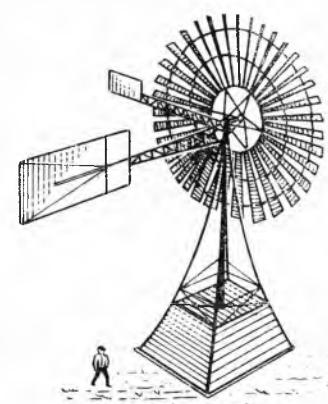
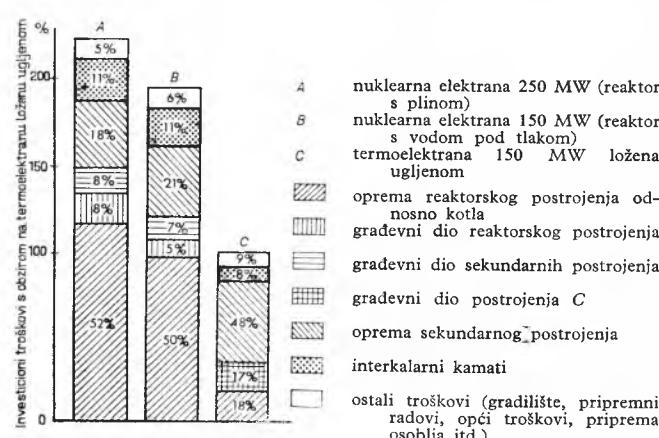
Geotermičke elektrane su termoelektrane koje iskorištavaju tople izvore za proizvodnju električne energije.

Toplim izvorima nazivaju se izvore vodene pare ili vrele vode koji izbjaju na površinu zemlje. Takvih izvora ima u nekim područjima Kanade, Islanda, Kalifornije, Italije, Japana itd. Energetsko iskorištenje u većem opsegu provedeno je za sada samo u Italiji. Električna energija proizvedena u takvima elektrana predstavlja ~ 4% od ukupne proizvodnje u Italiji.

Iskorištenje pare za proizvodnju električne energije vrši se danas u području Lardarello na tri načina: jedan uz upotrebu protutlačne turbine, a dva uz upotrebu kondenzacijskih agregata. Protutlačna turbina dimenzionirana je za paru od 4,4 bar i 185 °C a protutlač iznosi 1,08 bara. Kondenzacioni agregati postavljeni su na većim izvorima; u njima se kondenzacija postiže mijешanjem jer u tom području nema dovoljnih količina površinskih voda za površinsko hlađenje kondenzatorima. Upotrijebljene su dvije sheme i to jedna s izmjenjivačem topline i otplinjačem, a druga s neposrednom upotrebom pare iz toplih izvora za pogon turbina. Potrošak pare u prvom slučaju iznosi 19 kg/kWh, u drugom 14 kg/kWh, a u trećem 9,5 kg/kWh.

ELEKTRANE NA VJETAR

U elektrana na vjetar koristi se kinetička energija vjetra za pogon vjetrenjače (elise) koja tjeru električni generator. Mala koncentracija snage (0,17 kW/m²) površine kruga koji opisuju vrhovi elise uz brzinu vjetra od 30 km/h jedan je od osnovnih nedostataka koji su do danas spriječili korištenje energije vjetra u velikim opsegima. Za postizanje većih snaga potrebne su elise ili zračne turbine velikih promjera, što zahtijeva i izgradnju visokih tornjeva (sl. 99). Osim toga brzina vjetra — a s njom i snaga — mijenjaju se vrlo brzo, s tim više što je snaga proporcionalna trećoj potenciji brzine vjetra. Upoređujući promjene brzine vjetra s promjenama protoka u vodotocima može se zaključiti da se protok u toku dana može smatrati konstantnim, dok brzina vjetra nije konstantna ni u toku jednog sata. Minimum protoka nastupa u određeno doba godine, a vjetar malih brzina (manjih od minimalne brzine koja se još može



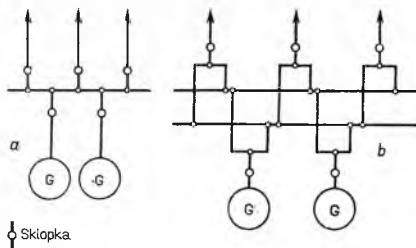
energetski koristiti), kao i razdoblja bez vjetra, mogu nastupiti svakog dana u bilo koje godišnje doba. S druge strane, stvaranjem akumulacijskih bazena na vodotocima mogu se smanjiti promjene protoka i povećati minimalni protoci; akumuliranje zraka u svrhu energetskog korištenja praktički je neizvedivo.

Zbog promjenljivosti brzine vjetra nemoguće je energetsko iskorištavanje vjetra za proizvodnju električne energije bez akumuliranja energije ili bez dopune iz drugih izvora. Za postrojenja vrlo male snage (nekoliko kilovata) moguća je upotreba akumulatora za akumuliranje energije. U USA postoji $\sim 50\ 000$ malih električnih generatora prosječne snage 2 kW, koji su tjerani vjetrom a služe za opskrbu farma i seoskih kućanstava električnom energijom. Za veće snage rješenje s akumulatorima nije ekonomski opravданo, već je potrebno predvidjeti paralelan rad s dopunskim agregatom ili priključak na elektroenergetski sistem koji može praktički uvijek preuzeti energiju iz postrojenja tjeranih vjetrom. U Danskoj, npr., postavljen je veći broj elektrana na vjetar snage 30 do 50 MW, koje rade paralelno s dizelskim agregatima za opskrbu seoskih područja.

ELEKTRIČNA SHEMA ELEKTRANE

Da bi se omogućilo napajanje električne mreže, opskrba vlastitog potroška elektrane i opskrba uređaja za zaštitu, regulaciju i upravljanje, u elektrani je izведен *razvod električne energije*. Pojedini strojevi, aparati i uređaji spojeni su među sobom vodičima; način spoja definiran je *električnom shemom*. S obzirom na svrhu razvod razlikuju su glavni strujni krugovi, strujni krugovi vlastitog potroška i pomoćni strujni krugovi.

Glavni strujni krugovi povezuju priključnice generatora sa rasklopnim postrojenjem za vezu s elektroenergetskim sistemom i sa rasklopnim postrojenjem za opskrbu vlastitog potroška. Na



Sl. 100. Shema elektrane sa sabirnicama generatorskog napona; a s jednostrukim sabirnicama, b s dvostrukim sabirnicama

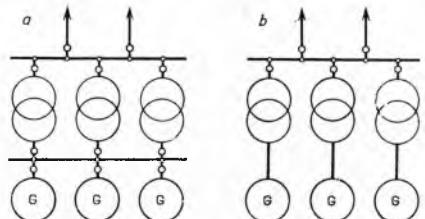
zbor sheme glavnih strujnih krugova utječe pogonski zahtjevi, ekonomski obziri i mogućnost izvedbe. U pogonske zahtjeve mogu se ubrojiti: naponi vodova koji će biti priključeni na sabirnice elektrane, potreba odvojenog pogona generatora ili odvojenog pogona pojedinih vodova, sigurnost pogona i potrebe opskrbe vlastitog potroška. Visina investicija za izgradnju postrojenja predstavlja glavni ekonomski pokazatelj, jer gubici praktički ne zavise od sheme spoja. Konačno, prilikom izbora sheme spoja glavnih strujnih krugova treba uzeti u obzir maksimalno izvedljivu veličinu generatora, transformatora i sklopaka, vodeći računa i o mogućnosti transporta od tvornice do mjesta ugradnje.

Elektrane manje snage obično neposredno napajaju mrežu napona 0,4, 3, 5, 6 ili 10 kV, pa je tada moguće upotrijebiti i najjednostavniju shemu: shemu sa sabirnicama generatorskog napona (sl. 100). Jednostrukne sabirnice dolaze u obzir kad se radi o elektranama male snage i male važnosti za opskrbu potrošača, jer se tada neće postaviti u pogonu zahtjev za odvojenim pogonom agregata i jer se radi o elektranama koje neće dovesti u pitanje redovitu opskrbu potrošača. Kad postoji mogućnost da dode do potrebe odvojenog pogona generatora ili kad se sa sabirnicama elektrane opskrbljuju potrošači osjetljivi na prekid dobave električne energije (npr. kemijska industrija), imaju opravdanje dvostrukе sabirnice. Pod odvojenim pogonom razumijeva se npr. odvojeno napajanje dijela vodova iz jednog (ili jedne grupe) generatora, a drugog dijela vodova iz drugog (ili druge grupe) generatora.

Kad se radi o vezi s mrežom višeg napona nego što je napon generatora, u principu su moguće dvije sheme spoja: shema spoja

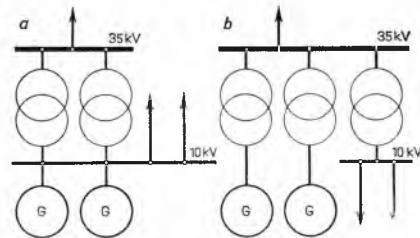
s generatorskim sabirnicama (sl. 101a) i shema u blok-spoju (sl. 101b). U prvom slučaju postoji rasklopno postrojenje generatorskog napona; u drugom slučaju takvo rasklopno postrojenje nije potrebno, pa je to glavna prednost sheme u blok-spoju. Ta prednost je to veća što je veća snaga i što je veći broj generatora, jer se tada povećavaju i struje kratkog spoja.

Na prvi pogled izgleda da blok-spoj daje znatno manju sigurnost proizvodnje u elektrani nego spoj s generatorskim sabirnicama.



Sl. 101. Spoj elektrana na mrežu napona višeg od napona generatora. a Shema spoja s generatorskim sabirnicama, b shema blok-spoja

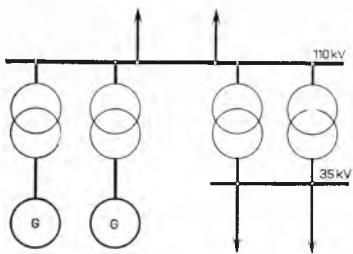
To proizlazi iz razmatranja navedenog u nastavku. Neka se u oba slučaja radi o generatorima i transformatorima iste snage (samo je tako moguće provesti ispravnu komparaciju). Označi li se sa P nazivna snaga generatora i transformatora, u ispravnom stanju se u oba slučaja može proizvesti i transformirati snaga $3P$. Ako dođe do kvara na jednom od generatora ili na jednom od transformatora, bilo u elektrani s generatorskim sabirnicama bilo u elektrani u blok-spoju, moći će elektrana proizvesti i predati u mrežu snagu $2P$. To smanjenje prouzrokovano je smanjenjem mogućnosti proizvodnje (kvar generatora) ili smanjenjem mogućnosti transformacije (kvar transformatora) i pored mogućnosti proizvodnje. Dakle, u slučaju jednog kvara obje su sheme spoja jednakov vrijedne. Međutim, mogu se dogoditi istodobno dva kvara: na jednom od generatora i na jednom od transformatora. Za elektranu sa generatorskim sabirnicama to predstavlja smanjenje mogućnosti proizvodnje za P , dakle za snagu jednog generatora, jer se energija proizvedena u bilo kojem generatoru može transformirati u bilo kojem transformatoru. Kad se radi o elektrani u blok-spoju, mogućnost proizvodnje zavisi od toga da li su u kvaru generator i transformator istog bloka ili različitih blokova. U prvom slučaju smanjuje se mogućnost proizvodnje elektrane za P , a u drugom slučaju za $2P$. Dakle samo kad se radi o istodobnom kvaru generatora i transformatora različitih blokova, elektrana u blok-spoju ima manju mogućnost proizvodnje nego elektrana s generatorskim sabirnicama. Kvarovi na generatorima i transformatorima su rijetki, pa su pogotovo rijetki istodobni kvarovi na generatoru i transformatoru u istoj elektrani, a još rijetki kvarovi na generatoru i transformatoru različitih blokova. Stoga se danas sve veće elektrane izvode u blok-spoju; sigurnost je praktički jednaka kao za elektranu s generatorskim sabirnicama a investicije su manje.



Sl. 102. Spoj elektrana s mrežom generatorskog i mrežom višeg napona. a Shema s generatorskim sabirnicama, b shema u blok-spoju

Ako je potrebna veza elektrane s mrežom generatorskog napona i s mrežom višeg napona, u principu su moguće dvije sheme spoja: shema s generatorskim sabirnicama (sl. 102a) i shema u blok-spoju (sl. 102b). S obzirom na investicije i snage kratkog spoja opravdanost eliminiranja generatorskih sabirnica to je veća što je potrebna manja snaga za mrežu generatorskog napona u odnosu na snagu generatora.

Kad je potrebno elektrane priključiti na dvije mreže višeg napona nego što je generatorski, po pravilu se na jedan napon priključuje blok generator-transformator, a veze s drugom mrežom ostvaruju se preko transformatora. Na sl. 103 blok generator-transformator priključen je na sabirnice 110 kV, dok se sabirnice 35 kV napajaju preko transformatora 110/35 kV. Moguća je i



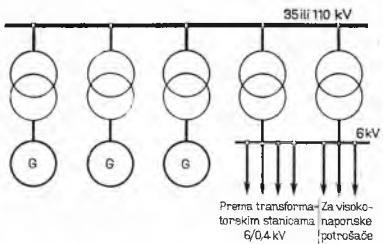
Sl. 103. Spoj elektrane s dvije mreže različitog napona. Blok-spoj na napon mreže većeg opterećenja

shema spoja s blokom priključenim na sabirnice 35 kV i transformacijom 35/110 kV. Povoljnije je blok generator-transformator priključiti na napon one mreže koja traži veću snagu, jer je tada manji zbroj snaga transformatora. Takvo rješenje povoljno je i u pogledu sigurnosti, jer je uz takvo rješenje i opskrba većeg potrošača sigurnija.

Strujni krugovi vlastitog potroška služe za napajanje pomoćnih uređaja u elektranama. Među pomoćne uređaje mogu se ubrojiti: uređaji za transport goriva i pepela, uređaji na kotlu (mlinovi ugljena, pojne pumpe, ventilatori, filteri dimnih plinova), uređaji na turbini (kondenzatne pumpe, pumpe za ulje), rasvjetu, dizalice, punjenje akumulatorske baterije, upravljanje zapornim organima u hidroelektranama.

Kad postoje u elektrani sabirnice generatorskog napona, obično je najpovoljnije priključiti vlastiti potrošak na same generatorske sabirnice. Da li će to biti priključak neposredno na generatorske sabirnice ili na posebne sabirnice istog napona koje su s generatorskim sabirnicama spojene prigušnicom za smanjenje kratkog spoja, to zavisi od veličine struje kratkog spoja na generatorskim sabirnicama i od visine investicija, koje za izgradnju rasklopнog postrojenja (za zadani broj odvoda) zavise od tih struja.

Nepostojanje generatorskih sabirница znači da je upotrijebljena shema u blok-spoju, pa je i tada moguće vlastiti potrošak priključiti na sabirnice elektrane, iako je na sabirnicama napon viši od generatorskog napona (sl. 104). Takva shema spoja dolazi



Sl. 104. Shema spoja elektrane s priključkom vlastitog potroška na sabirnice napona višeg od generatorskog napona

u obzir praktički uvijek kad u elektrani postoje sabirnice 35 kV, jer se za taj napon mogu ekonomično izvesti transformatori dovoljno male snage. Ako u elektrani postoje sabirnice 110 kV ili sabirnice još višeg napona, opravdanost priključka vlastitog potrošaka na takve sabirnice zavisi od potrebne snage za vlastiti potrošak.

Zbog toga se često upotrebljava priključak vlastitog potrošaka na otcjep između generatora i transformatora (sl. 105). Normalno se ne izvodi direktni priključak sabirnica vlastitog potrošaka na generator zbog prevelikih struja kratkog spoja i zbog nemogućnosti reguliranja napona na sabirnicama vlastitog potrošaka nezavisno od napona na sabirnicama elektrane. Postavljanjem prigušnice u odvod za vlastiti potrošak smanjuju se struje kratkog spoja u rasklopnom postrojenju vlastitog potrošaka, a regulacija napona omogućuje

se postavljanjem regulacijskog transformatora u štednom spoju u seriji s prigušnicom. Međutim, postavljanjem dvonamotnog regulacijskog transformatora postiže se isto što i u slučaju prigušnica + transformator u štednom spoju, ali obično uz manje investicije. Zato je shema prikazana na sl. 105 najčešće rješenje i pored toga što je u nekim slučajevima isti nazivni napon na generatoru i na sabirnicama vlastitog potrošaka.

U elektranama koje se nalaze na kraju mreže, pa je veza s mrežom slaba i nesigurna, postavlja se kućni agregat za opskrbu vlastitog potrošaka. Kad se želi vlastiti potrošak potpuno odijeliti od mreže, kako bi se normalni rad pomoćnih pogona bolje osigurao od kvarova i ispada mreže, postavljaju se dva kućna agregata (jedan agregat kao rezerva), koji napajaju sabirnice vlastitog potrošaka bez ikakve veze s mrežom.

Pomoći strujni krugovi služe za to da se opskrbe električnom energijom uređaji za mjeđuređenje, upravljanje i regulaciju, te uređaji za zaštitu i signalizaciju.

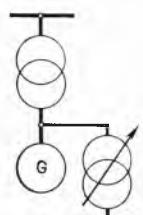
Strujni krugovi za upravljanje i regulaciju. Da bi se mogao voditi pogon elektrane s dovoljno sigurnosti i s maksimalnom ekonomičnošću, potrebno je predvidjeti mogućnost mjeranja svih onih veličina koje mogu na to utjecati. Tako se npr. na kotlu mjeri stanje ugljena u bunkerima, tlak i temperatura pare, nivo vode, opterećenje svih motora, temperatura plinova izgaranja na različitim mjestima kotla, tlakovi u kotlu na strani plinova za izgaranje, temperatura pojne vode itd. Analogna mjerena vrše se na turbini, generatoru, transformatorima. Strujni krugovi za upravljanje služe za pokretanje i obustavljanje motora, otvaranje i zatvaranje zapornih organa, uklapanje i isklapanje sklopki i sl.

U elektrani postoje dva osnovna regulatora: regulator pogonskog stroja i regulator napona generatora. Regulator pogonskog stroja (koji se obično naziva i regulator broja okretaja) služi za regulaciju količine pogonskog sredstva (pare, vode, plina — prema tome kakav je pogonski stroj) koje ulazi u turbinu. Taj regulator djeluje na promjenu broja okretaja, odnosno na promjenu frekvencije mreže, jer su u mreži svi generatori spojeni paralelno. Regulator napona služi za regulaciju uzbude generatora, kako bi se održao određeni napon na priključnicama generatora. Na njega djeluje promjena napona na priključnicama generatora. Osim toga u termoelektranama se upotrebljava regulacija na kotlu i to: regulacija napajanja, koja djeluje na pojne pumpe u zavisnosti od nivoa vode u kotlu; regulacija dovoda goriva, koja djeluje na dovod goriva u zavisnosti od tlaka pare na izlazu iz kotla, i potpuna regulacija kotla koja pored spomenutih obuhvaća i regulaciju izgaranja (dovoda udruha u zavisnosti od sastava izlaznih plinova i temperatupe udruha na izlazu iz kotla). U hidroelektranama se upotrebljava regulacija količine vode u zavisnosti od nivoa gornje vode, gdje to može imati utjecaja na pogon.

U najnovije vrijeme nastoji se pogon elektrana automatizirati, kako bi se, s jedne strane, smanjio broj potrebnog osoblja i, s druge strane, povećala sigurnost u pogonu i poboljšao kvalitet pogona. Automatizacija se ostvaruje pomoću elektroničkih računala. Elektroničko računalo može automatski staviti u pogon i obuhvatiti cijelu elektranu ili dio elektrane uz najveću moguću brzinu i sigurnost. Osim toga elektroničko računalo nadzire pogon i daje impuse za potrebne pogonske zahvate, te registrira sve pojave i vrši potrebna izračunavanja (npr. stupnjeva djelovanja). Primjenom elektroničkih računala nije eliminirana potreba ugradnje svih uređaja za ručni pogon i regulaciju, ali i pored toga smatra se da se ugradnja računala isplati zbog ušteda u pogonu, povećanja sigurnosti, skraćenja trajanja ispada i smanjenja osoblja.

Uredaji za zaštitu treba da ili spriječe nastanak kvara ili, ako kvar nastane, da oštećenja svedu na najmanji mogući opseg. Takvih uređaja ima na kotlovima, turbinama, generatorima, električnim motorima, transformatorima itd. Signalizacija služi za javljanje stanja pojedinih uređaja i aparata (u pogonu ili izvan pogona, uklapljeni ili isklapljeni, i sl.) i za javljanje da li je neka mjerena veličina postigla granično stanje (nivo vode, temperatura, tlak ulja i sl.).

Svi uređaji i organi za daljinsko mjerjenje, daljinsko upravljanje i signalizaciju smješteni su zajedno u komandnom mjestu elek-



Sl. 105. Priključak vlastitog potrošaka na otcjep između generatora i transformatora

trane, gdje su montirani na pregledne zidne i stolne panoe (v. slike u prilogu).

KARAKTERISTIKE GENERATORA I NJEGOVA ZAŠTITA

Danas se u ogromnoj većini upotrebljavaju u elektranama trofazni sinhroni generatori za frekvenciju 50 Hz (u Evropi) ili 60 Hz (u USA i Kanadi). U nekim zemljama (Švicarskoj, Austriji, južnoj Njemačkoj), gdje je elektrifikacija željezница provedena izmjeničnom strujom frekvencije 16 $\frac{2}{3}$ Hz, izgradene su posebne elektrane ili posebni agregati u elektranama za proizvodnju takve struje. Za ovu namjeru služe jednofazni generatori frekvencije 16 $\frac{2}{3}$ Hz. U malim elektranama koje rade u velikim mrežama mogu se postaviti i trofazni asinhroni generatori, ali to se čini rijetko.

Osnovni nazivni podaci generatora. Pod time se razmijevaju četiri podatka koji su projektantu neophodni za projektiranje: napon, faktor snage, snaga i broj okretaja. Pored ovih podataka u nekim slučajevima potrebno je postaviti i posebne zahtjeve: veličina sinhronne reaktancije, opseg regulacije napona, zamašni moment i dr., što zavisi od zahtjeva koje mreža postavlja generatoru. Ponekad definiranje dodatnih podataka nije prijeko potrebno, pa će tada projektant generatora konstruirati generator tražeći optimalno rješenje, a vodeći računa samo o osnovnim podacima.

Nazivni napon. Koliki će se nazivni napon generatora odabratи zavisi od sheme elektrane i o naponu mreže na koju će generator raditi, ako nije predvidena transformacija između generatora i mreže. Standardni nazivni naponi generatora jesu: 3,15, 6,3, 10,5 kV. Dakle, nazivni su naponi generatora za 5% viši od nazivnih napona mreže, kako bi se kompenzirao pad napona u vodovima.

Kad u elektrani postoje generatorske sabirnice na koje je priključena mreža, nazivni napon generatora određen je naponom mreže. Nazivni napon generatora u bloku s transformatorom ne zavisi od napona mreže, pa se taj napon može odabrati na temelju kriterija ekonomičnosti, uvezši u obzir generator, transformator bloka, transformator za vlastiti potrošak (ako takav postoji) i aparate generatorskog napona. Za generatore manje snage može se optimalno rješenje naći upotrebom jednog od nazivnih napona, a za generatore veće snage ima opravdanja upotrijebiti i napone veće od 10,5 kV. Izbor nazivnog napona generatora spojenog u bloku s transformatorom u osnovi je pitanje konstrukcije generatora, a ne projektiranja elektrane kao celine.

Snaga i nazivni faktor snage generatora. Maksimalna djelatna snaga koju može dati generator zavisna je od maksimalne snage pogonskog stroja, pa se ona ne može povisiti konstrukcijom generatora. Dimenzije generatora, međutim, utječu na maksimalnu jalovu snagu koju može dati generator istodobno opterećen maksimalnom djelatnom snagom. Odnos između maksimalne djelatne snage i istodobne maksimalne prividne snage definiran je *nazivnim faktorom snage*, koji je određen relacijom

$$\cos \varphi_n = \frac{P_n}{\sqrt{P_n^2 + Q_n^2}}, \quad (44)$$

gdje je P_n maksimalna djelatna snaga, a Q_n maksimalna jalova snaga koju generator može proizvesti uz snagu P_n .

Nazivni faktor snage predstavlja, dakle, karakterističnu veličinu generatora koja je mjera za sposobnost generatora da proizvodi jalovu snagu. Generator s manjim nazivnim faktorom snage može uz inače jednake prilike proizvesti veću jalovu snagu, pa izbor nazivnog faktora snage zavisi od potrebe jalove snage u dijelu mreže u neposrednoj blizini generatora. Nazivni faktor snage ima velik utjecaj na dimenzije generatora, jer se — uz istu maksimalnu djelatnu snagu — sa smanjenjem faktora snage povećava nazivna prividna snaga generatora, koja ima značajan utjecaj na dimenzije i težinu generatora.

Odluka o nazivnom faktoru snage zavisi od položaja generatora u mreži s obzirom na potrošače. Ako se generator nalazi u konzumnom centru, povoljno je da sam generator proizvede jalovu snagu potrebnu potrošačima, da se ta jalova snaga ne bi prenosila iz udaljenih elektrana, što bi značilo povećanje gubitaka i pada napona u mreži, a tražilo bi i povećane investicije za vodove i transformatore (vodove i transformatore treba dimenzionirati prema prividnoj snazi!). Stoga se generatori u elektranama koje se nalaze u samom konzumnom centru ili u njegovoj blizini

grade najčešće za $\cos \varphi_n = 0,8$, koliki faktor snage u prosjeku imaju i potrošači. U nekim slučajevima, međutim, kada se veći dio energije potrebne konzumnom centru u kojem se nalazi promatrana elektrana prenosi iz udaljenih elektrana, povoljno je da se generator izgradi i za nazivni faktor snage manji od 0,8 (pa i za $\cos \varphi_n = 0,6$). Iz istih se razloga za generatore u elektranama udaljenim od konzumnih centara, čija se snaga prenosi na veće udaljenosti, bira nazivni faktor snage veći od 0,8 (i do $\cos \varphi_n = 0,95$). Potrebnu jalovu snagu tada proizvodi elektrana u konzumnom centru, sinhroni kompenzator ili kondenzatorske baterije u neposrednoj blizini potrošača. Koji je nazivni faktor snage najpovoljniji potrebno je odrediti u svakom pojedinom slučaju uzimajući u obzir i investicije i pogonske troškove.

Nazivna prividna snaga generatora S_n određena je maksimalnom djelatnom snagom na priključnicama generatora (P_n) i nazivnim faktorom snage generatora ($\cos \varphi_n$) prema relaciji:

$$S_n = \frac{P_n}{\cos \varphi_n}. \quad (45)$$

Broj okretaja generatora. Težnja je da nazivni broj okretaja generatora bude što veći, jer se s povećanjem broja okretaja za istu snagu smanjuju dimenzije generatora, a s tim i težina generatora.

Proizvodna cijena generatora proporcionalna je u prvoj aproksimaciji težini. U sl. 106 prikazana je zavisnost orientacijskih težina generatora od omjera nazivne snage (kVA) i nazivnog broja okretaja (1/min).

Broj okretaja generatora određuje se prema broju okretaja pogonskog stroja s tim da odabrani broj okretaja odgovara jednom od sinhronih brojeva okretaja koji se za mreže s frekvencijom od 50 Hz određuje iz relacije

$$n = \frac{3000}{p} \text{ (min}^{-1}), \quad (46)$$

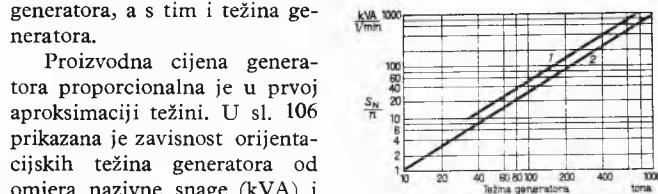
gdje je p broj pari polova ($p = 1, 2, 3 \dots$).

Broj okretaja generatora u hidroelektrani zavisan je od pada i snage turbine prema relaciji jedn. (7). Specifični broj okretaja modelne turbine zavisi naime od pada: što je veći pad to je manji specifični broj okretaja. Za isti pad generator ima to manji broj okretaja što je veća snaga turbine. Osim upotrebom vodne turbine sa što većim specifičnim brojem okretaja, broj okretaja agregata može se povećati i upotrebom dvojne Francisove turbine ili Peltonove turbine s više sapnica. Dvojna Francisova turbina predstavlja agregat sa dvije jednakе turbine na istom vratilu koje tjeraju jedan generator.

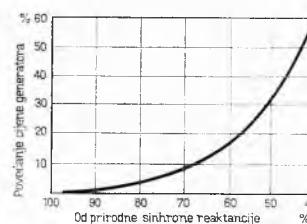
Broj okretaja generatora tjeranog parnom turbinom po pravilu je najveći sinhroni broj okretaja (3000 min $^{-1}$ u mrežama 50 Hz). Samo u slučaju turboagregata sa dva vratila agregat nižeg tlaka ima slijedeći niži sinhroni broj okretaja (1500 min), zbog konstruktivnog ograničenja duljine lopatica posljednjeg stepena turbine.

Reaktancije generatora. Veličina sinhronne reaktancije generatora utječe na snagu koju generator stabilno može davati, a veličina prelazne reaktancije mjerodavna je za dinamičku stabilnost sinhronog generatora. Kad se radi o prijenosu na veće udaljenosti, potrebno je predvidjeti generator s reaktancijama manjim od onih koje bi imao da je dimenzioniran uz optimalno iskoristenje bakra i željeza (prirodna sinhrona reaktancija).

To će dovesti do većih dimenzija generatora i do njegovog poskupljenja. Na sl. 107 navedena su približna povećanja troškova za izgradnju generatora uz smanjenje sinhronne reaktancije. Kako je već spomenuto, smanjenje prelazne reak-



Sl. 106. Orientaciona težina generatora u zavisnosti od omjera nazivne snage S_n (kVA) i broja okretaja n (1/min). 1. Generator tjeran Kaplanovom turbinom, 2. generator tjeran Francisovom ili Peltonovom turbinom



Sl. 107. Povišenje cijene generatora za smanjenje prirodne sinhronne reaktancije generatora s izrazitim polovima

tancije povećava stabilnost generatora u prelaznom stanju, ali utjecaj prelazne reaktancije nije vrlo velik jer je generator spojen s mrežom preko transformatora i vodova, pa treba uzeti u obzir također njihove reaktancije. Utjecaj smanjenja reaktancije generatora to je manji što su veće reaktancije vodova i transformatora u odnosu na reaktanciju generatora. Smanjena prelazna reaktancija dobiva se kad se generator konstruira za smanjenu sinhronu reaktanciju, dakle uz povećanje težine i cijene generatora. Pri tom treba napomenuti da prelazna reaktancija opada sporije nego sinhrona reaktancija (sl. 108).

Cesto se postavlja zahtjev da generator može dati nazivnu snagu i kad radi s povišenim ili sniženim naponom, npr. da uz opseg regulacije napona od $\pm 10\%$ nazivnog napona generator proizvodi nazivnu snagu uz nazivni faktor snage. Zahtjev da generator daje nazivnu snagu i uz sniženi napon ima kao posljedicu povećanje namota na statoru, da bi se uz isto ugrijavanje generator mogao opteretiti većom strujom, a zahtjev da generator daje nazivnu snagu i uz povišen napon povlači za sobom povećanje presjeka namota na rotoru.

Zaštita generatora. Generator predstavlja veliku vrijednost i s obzirom na nabavnu cijenu i s obzirom na štete koje nastaju u slučaju nemogućnosti proizvodnje električne energije, pa je potrebno predvidjeti zaštitu koja će ili sprječiti da dođe do oštećenja generatora ili ograničiti oštećenje zbog već nastalog kvara.

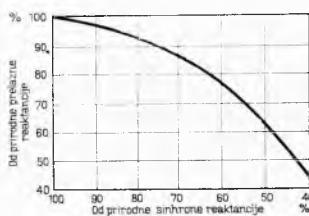
Prilikom donošenja odluke o izboru vrste zaštite i o opsegu zaštite korisno je poznavati vjerojatnost kvarova na generatoru. Prema podacima iz izvještaja Britanske elektroprivredne zajednice, u razdoblju od aprila 1948 do marta 1952 na 477 turbogeneratora bilo je prosječno godišnje 35 grešaka ili prosječno po jedna greška po generatoru svakih 13,6 godina. Prosječno je godišnje bilo 12 grešaka na statoru, a 23 greške na rotoru.

Investicije su za neki zaštitni uredaj, u većini slučajeva, nezavisne od veličine generatora što ga taj uredaj štiti, dok je šteta koju može sprječiti zaštitni uredaj razmjerna veličini generatora. Stoga će i investicije u odnosu na korist od zaštite biti to manje što je veća snaga generatora o kojem se radi. Zato se u praksi manji generatori štite samo najnužnijom zaštitom, dok se za velike generatore predviđaju mnogobrojni zaštitni uredaji. Usprkos tome investicije za zaštitu manjih generatora penju se do 6%, dok za velike generatore iznose 2% od cijene generatora.

Zaštitni uredaji generatora mogu se podijeliti na uredaje koji djeluju kad je već nastao kvar u štićenom generatuру i na uredaje koji treba da zaštite generator od djelovanja kvarova nastalih izvan njega. U prvu grupu zaštitnih uredaja mogu se ubrojiti: a) diferencijalna zaštita od kratkog spoja među fazama generatora, b) zaštita od spoja statorskog namota s masom, odnosno zaštita od zemnog spoja statora, c) zaštita od spoja među zavojima iste faze, d) zaštita od spoja rotorskog namota s masom, odnosno zaštita od zemnog spoja rotora. U drugu grupu spadaju: e) zaštita od kratkih spojeva izvan generatora, f) zaštita od preopterećenja, g) zaštita od povišenja naponu, h) zaštita od nesimetričnog opterećenja, i) zaštita od povratne snage. (V. *Zaštita električnih postrojenja od kratkog spoja, zemljospoja i preopterećenja*.)

PERSPEKTIVA DALJNJE RAZVOJA ELEKTRANA

Stalno povećanje potrošnje električne energije traži izgradnju sve većeg broja elektrana sve veće snage. Dosadašnji razvoj pokazuje da se potrošnja udvostručuje svakih 10 godina. Tokom sljedećih 10 godina bit će, prema tome, potrebno izgraditi u novim elektranama onoliko snage koliko imaju elektrane što danas postoje. Potreba brze izgradnje, zatim težnja za sniženjem investicija i za povišenjem stupnja djelovanja, doveća je do agregata sve većih snaga. To se u prvom redu odnosi na agregate u termoelektranama, jer je snaga hidroelektrana, a prema tome i snaga agregata u njima, zavisna od prirodnih uvjeta (protoka, pada). Danas postoje turbogeneratori i od 1000 MW. Da bi se povećala



Sl. 108. Smanjenje prelazne reaktancije radi smanjenja sinhronne reaktancije

snaga agregata, potrebno je omogućiti upotrebu što duljih lopatica u posljednjem stepenu parne turbine, jer o duljini lopatica zavisi količina pare koja može protjecati kroz turbinu. Uz održanje duljine lopatica u posljednjem stepenu parne turbine, snaga aggregata može se povećati povišenjem tlaka u kondenzatoru (manji specifični volumen pare po jedinici mase!). Pogoršanje termičkog stupnja djelovanja uzrokovano povišenjem tlaka u kondenzatoru kompenzira se povišenjem tlaka pare na ulazu u turbinu. Postizan povoljnijeg termičkog procesa suprotstavljaju se ove poteškoće: povišenje temperature svježe pare (iznad 560°C) otježano je zbog visokih cijena austenitnih čelika, jer se feritni čelici ne mogu upotrijebiti za tako visoke temperature; povišenje temperature pojne vode dovodi do velikih površina zagrijanja, što povećava investicije. Može se ocijeniti da je još moguće smanjiti specifični potrošak topline u termoelektranama za 210 do 420 kJ/kWh (50 do 100 kcal/kWh).

Znatno povećanje mogućnosti proizvodnje nafte, a pogotovo zemnog plina, omogućava sve veće korištenje tih goriva za proizvodnju električne energije. To dovodi do sve većeg interesa za upotrebu plinskih turbina. Zbog toga se teži za ostvarenjem aggregata velike snage s plinskim turbinama (i do 400 MW). Veličina aggregata s plinskim turbinama bila je ograničena zbog velikih volumena plinova na izlazu iz turbine. Povećanje snage omogućeno je povećanjem aksijalne brzine na izlazu ugradnjom posebnih difuzora.

Proučava se mogućnost da se zajedničkim radom plinske turbine i parnog procesa poboljša termički stupanj djelovanja i poveća snaga bez povećanja potrebe vode za hlađenje. Na izlazu iz turbine pojavljuju se plinovi relativno visoke temperature (red veličine 400°C), koji se dovode u ložiste parnog kotla. Na taj način se toplina plinova na izlazu iz plinske turbine iskoristi za zagrijavanje vode u parnom kotlu, što smanjuje potrošnju goriva u kotlu. Stupanj djelovanja može se povećati višestrukom kompresijom i višestrukom kompresijom s međupregrijanjem pare.

Nuklearne termoelektrane prošle su prvu etapu razvoja. Daljnji razvoj vezan je za upotrebu viših parametara pare, za jedinice većih snaga i za razvoj novih tipova reaktora koji će omogućiti potpuno iskorištenje urana u procesu fisije.

Od neposrednih pretvorbi energije koje bi mogle također poslužiti kao osnova za proizvodnju energije mogu se navesti: gorivne baterije, termoelektrični generatori, termionski generatori i magnetohidrodinamički generatori (v. *Gorivni elementi, Magnetohidrodinamika, Termionski elementi, Termoelektricitet*).

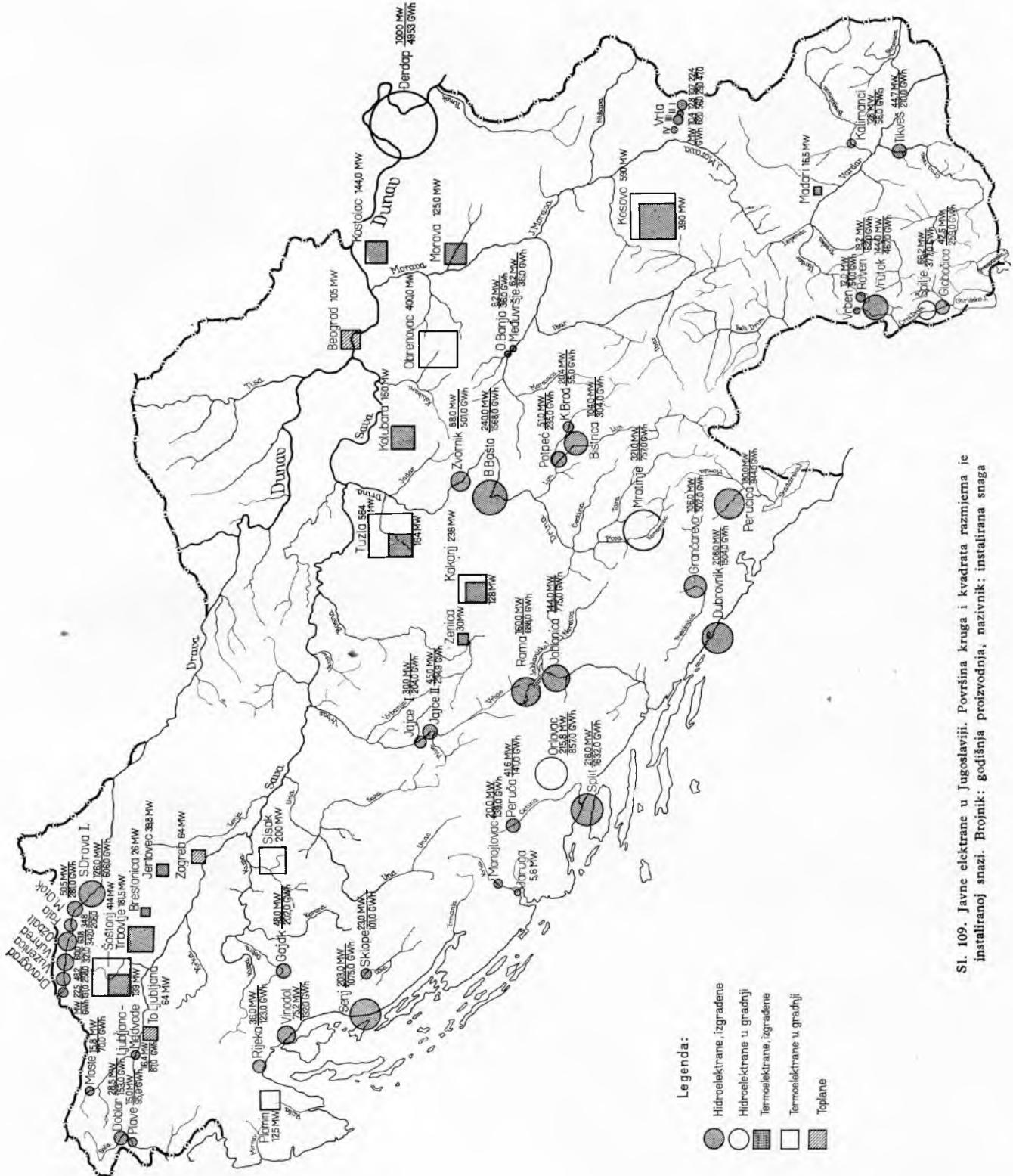
Za izgradnju velikih postrojenja najinteresantniji su magnetohidrodinamički (MHD) generatori. Ako plin visokih temperatura (reda veličine $2200\text{--}2900^{\circ}\text{C}$) struji među polovinama jakog magneta, pojavljuje se u ioniziranom plinu struja elektrona (prema »pravilu desne ruke«) okomito na magnetsko polje i okomito na smjer strujanja nosioca naboja (plina). Među elektrodama postavljenim u struju elektrona pojavit će se razlika potencijala. S obzirom na raspoložive materijale, visoke temperature predstavljaju za danas poteškoću koju treba tek svladati da bi se osigurao trajan pogon i dovoljno dug vijek trajanja postrojenja. Za pogon generatora mogu se upotrijebiti zagrijani plinovi izgaranja fosilnih goriva ili plinovi iz nuklearnog reaktora visokih temperatura. Budući da se u MHD-generatorima iskoristi samo manji dio razlike temperature (područje u kojem dolazi do ionizacije), izlazni plinovi iz MHD-generatora mogu se iskoristiti u parnom kotlu. U takvoj kombinaciji MHD-generatora i parne termoelektrane može se očekivati stupanj djelovanja između 55 i 60%. Ocjenjuje se da će za 10 do 20 godina elektrane s MHD-generatorima biti sposobne za komercijalni pogon.

Kao izvori električne energije manjih snaga doći će vjerovatno u obzir: gorivne baterije, termoelektrični i termionski generatori kad se njihov razvoj, koji je još u toku, završi.

ELEKTRANE U JUGOSLAVIJI

Lokacija, vrsta, instalirana snaga i kapacitet elektrana u Jugoslaviji, sa stanjem krajem 1968., razabire se iz sl. 109.

LIT.: M. Degove, Utilisation des forces hydrauliques, Paris 1946. — L. Musil, Gasturbinenkraftwerke, Wien 1947. — O. Vas, Über das Unterwasserkraftwerk, Wien 1947. — J. Ricard, Équipement thermique des usines géneratrices d'énergie électrique, Paris 1948. — A. Rauch, Wasserkraftanlagen,



Sl. 109. Javne elektrane u Jugoslaviji. Površina kruga i kvadrata razmjeria je instaliranoj snazi. Brojnik: godišnja proizvodnja, nazivnik: instalirana snaga

Stuttgart 1948. — Ф. Губин, Гидроэлектрические станции, Москва—Ленинград 1949. — Р. Ј. Поттер, Steam power plants, New York 1949. — D. Pavel, Hidroenergetica generală, Bucuresti 1951. — Е. Р. Сироков, Насосно-аккумулирующие гидроэлектростанции и их применение в энергосистеме, Ленинград—Москва 1952. — G. A. Gaffert, Steam power stations, New York 1952. — A. Roggendorf, Der Eigenbedarf mittlerer und großer Kraftwerke, Berlin-Göttingen-Heidelberg 1952. — Г. М. Гольденберг, Гидроаккумулирующие электрические станции, Москва—Ленинград 1955. — W. H. Severns, H. E. Degler, J. C. Miles, Steam, air, and gas power, New York 1954. — Ј. Себелька, Вyužitje vodnej energie, Bratislava 1954. — В. Н. Юрьев, А. А. Лазовский (ред.), Тепловые электрические станции, Москва—Ленинград 1956. — A. S. Thompson, O. E. Rodgers, Thermal power from nuclear reactors, New, York 1956. — Л. И. Керзели, В. Я. Рожкин, Тепловые электрические станции, Москва—Ленинград 1956. — H. Goerke, Dampfkraftwerke, München 1956. — M. Mainardis, Centrali elettriche, Milano 1957. — E. Mosonyi, Wasserkraftwerke, 2 Bde., Budapest 1956/59, (i na engleskom: Water power development, Budapest 1957). — Л. Б. Бернштейн, Приливные электростанции в современной энергетике, Москва—Ленинград 1961. — H. Freiberger, Betrieb von Elektrizitätswerken, Berlin-Heidelberg-New York 1961. — H. Požar, Leistung und Energie in Verbundsystemen, Wien 1963. — N. Buchhold, H. Happoldt, Elektrische Kraftwerke und Netze, Berlin-Heidelberg-New York 1963. — H. Witte (Herausg.), Handbuch der Energiewirtschaft, Bd. I: Projektierung und Betrieb der Ausrüstung von Wärmelektrikern, Leipzig 1965. — Ј. Mihajlović, Termoelektrane, Zagreb 1965. — K. Schröder, Große Dampfkraftwerke, 3 Bde., Berlin-Heidelberg-New York 1959/62/66. — L. Musil, K. Knizia, Die Gesamtplanning von Dampfkraftwerken, Bd. I: Die Thermodynamik des Dampfkraftprozesses, Berlin-Heidelberg-New York 1966. — Г. И. Михалин, Эксплуатация дизельных электрических станций, Москва 1968. — H. Požar

ELEKTRICITET, STATIČKI, električni naboji u mirovanju, smješteni na prikladnim tijelima. Razlikuje se od dinamičkog elektriciteta (električne struje) po tome što se zadržava samo na površini tijela i što ga ne prate magnetske, kemijske ni toplinske pojave. Tipični su za statički elektricitet često vrlo visoki naponi (i do više stotina milijuna volti) uz razmjerno male količine elektriciteta.

OSNOVE STATIČKOG ELEKTRICITETA

Svaki atom materije sadrži određen broj pozitivno nabijenih čestica (protona) i negativnih elementarnih naboja (elektrona). Ako neko tijelo nije elektrizirano, broj protona u njemu jednak je broju elektrona i oni su unutar atomâ tog tijela u ravnoteži. Za takva tijela kaže se da su električki neutralna. Od elektrona u električnim vodičima (npr. metalima) neki mogu napustiti atomski sistem i preći na druge atome ili molekule. Atomi ili molekule koje su elektroni napustili, tj. kojima nedostaju elektroni, nazivaju se pozitivnim ionima, a oni na koje su elektroni prešli, tj. u kojima pretiće elektroni, negativnim ionima. Prema tome postoje dvije vrste elektriciteta ili električne: *pozitivni elektricitet* sačinjavaju pozitivni ioni, a *negativni elektricitet* negativni ioni i slobodni elektroni. Za tijelo u kojem pretiće ili nedostaju elektroni kaže se da je negativno odn. pozitivno nabijeno ili elektrizirano. Elektricitet u mirovanju (a ne električna struja) naziva se *električnim nabojem*. Po pravilu elektricitet je vezan za materiju; samo negativni elektricitet u obliku elektrona može ponekad biti neovisan o materiji i lebdjeti poput oblaka u nekom prostoru (*prostorni naboј*). Veličina naboja (*količina elektriciteta*, električno opterećenje) nekog elektriziranog tijela ovisi o broju elektrona koji na njemu pretiće ili nedostaju; u mernom sistemu MKSA mjeri se u kulonima (coulombima, C): $1 \text{ C} = 1 \text{ As}$ (amperekunda). Naboј jednog elektrona naziva se elementarnim naboјem, on iznosi $e = -1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$. Svaki drugi naboј može biti jednak samo nekom mnogokratniku elementarnog naboјa (v. *Elektrotehnika, osnove*).

Električni naboјi istog predznaka (istoimeni, pozitivni ili negativni) među sobom se odbijaju, električni naboјi različitog predznaka (raznoimeni, pozitivni i negativni) privlače se.

Električno polje

Električno polje je prostor oko električnog naboјa (ili više njih) u kome se pojavljuju električne pojave kao što su npr. odbojno ili privlačno djelovanje na električne naboјe, influencija i polarizacija.

Pojam električnog polja uveo je J. C. Maxwell 1873. Do onda su pojave privlačenja i odbijanja dviju odvojenih količina elektriciteta smatrane osnovnim ishodištem znanja o elektricitetu i smatrala su se posljedicom djelovanja električne sile na daljinu, analogno djelovanju gravitacije prema Newtonu.

Električno polje postoji jednako oko vodljivih i nevodljivih tijela na kojima se nalaze električni naboјi (statički elektricitet) kao i oko vodiča kroz koje teče električna struja (dinamički elektricitet). Električno polje može postojati u vakuumu, u plinovitim, tekućim i čvrstim nevodljivim tvarima (*dielektricima*), a u unutrašnjosti

vodiča samo ako kroz njih proteče struja, dok ga u unutrašnjosti vodiča i vodljivih tijela (*elektroda*) koja nose statički naboј nemaju.

Električno polje karakterizirano je dvama vektorima: jakošću električnog polja \vec{E} i elektrostatičkom indukcijom \vec{D} .

Jakost električnog polja (E) je veličina proporcionalna sili F kojom električno polje djeluje na naboј Q kad se ovaj unese u njega. E je vektorska veličina, njezin u prostoru određen smjer poklapa se sa smjerom djelovanja sile:

$$\vec{F} = Q \cdot \vec{E}, \text{ tj. } \vec{E} = \vec{F}/Q. \quad (1)$$

U elektrostatičkom polju, tj. u električnom polju koje potječe od mirujućih (elektrostatičkih) naboјa, jakost se polja (koja je stalno jednaka) može prikazati i kao negativni gradijent jedne skalarne funkcije V koja se naziva *električnim potencijalom* polja:

$$\vec{E} = -\frac{\partial V}{\partial l} = -\text{grad } V. \quad (2)$$

Električni potencijal u određenoj tački elektrostatičkog polja jednak je radu koji je potreban da se jedinični naboј dovede iz beskonačnosti u tu tačku polja, prevladavajući silu koja na taj naboј djeluje. Svaka tačka mirujućeg električnog polja ima dakle određeni električni potencijal. Tačke jednakih potencijala leže na tzv. *ekvipotencijalnim plohama*.

Apsolutne se vrijednosti potencijala ne mogu mjeriti, nego samo vrijednosti razlike potencijala među dvjema tačkama. *Razlika potencijala* $V_1 - V_2$ između dviju tačaka električnog polja predstavlja rad koji je potreban da se jedinični naboј premjesti iz tačke s potencijalom V_1 u tačku s potencijalom V_2 . Razlika potencijala izražava se naponom koji vlada između tih dviju tačaka električnog polja. Uz primjenu pogodnih sondi taj se napon može mjeriti na isti način kao napon između dva vodiča. Ako se potencijalu V_2 proizvoljno pripiše potencijal nula (obično se kao nulli potencijal uzima potencijal zemlje), mjereni napon između neke tačke u polju i jedne tačke s uslovnim nullim potencijalom predstavlja uslovnu vrijednost potencijala u datoj tački električnog polja. Pod potencijalom neke tačke u električnom polju obično se razumjeva, prema tome, napon te tačke prema zemlji.

Da se u električnom polju prenese naboј iz tačke s potencijalom V_1 u tačku s potencijalom V_2 koja se nalazi na udaljenosti l (mjereno duž linije djelovanja sile \vec{F} među tačkama) treba utrošiti mehanički rad W jednak umnošku sile \vec{F} i puta l :

$$W = \vec{F} \int dl. \quad (3)$$

Uvrstili li se \vec{F} iz jedn. (1), dobije se:

$$W = Q \int_l \vec{E} dl. \quad (4)$$

Izraz $\int_l \vec{E} dl$ jednak je razlici potencijala između tačaka s potencijalima V_1 i V_2 , tj. naponu koji vlada između tih tačaka:

$$U_{12} = V_1 - V_2 = \int_l \vec{E} dl. \quad (5)$$

Potencijali i razlike potencijala mjeri se, dakle, u jedinicama napona, u sistemu mjera MKSA u voltima V. Jakost polja, prema definicijskoj jednadžbi (2), mjeri se u sistemu mjera MKSA u voltima po metru (V/m).

Električni tok. Prema današnjem shvaćanju o električnom polju, o naboju Q govoriti se samo kad je riječ o naboju elektrode, a u polju se naboј Q nadomješta veličinom koja se zove električni tok ψ ; za nj se pretpostavlja da izlazi iz elektrode s pozitivnim naboјem, prolazi kroz dielektrik i završava na elektrodi s negativnim naboјem, analogno magnetskom toku Φ kroz feromagnetski materijal. Na samoj površini elektrode je $\psi = Q$. Električni se tok, kao i naboј, mjeri u kulonima (C).

Grafički prikaz električnog polja. Grafički se električno polje prikazuje dvodimenzionalnim ekvipotencijalnim linijama i električnim silnicama. *Ekvipotencijalne linije* predstavljaju presjeke ekvipotencijalnih ploha s prikladnom ravninom kojom je električno polje presječeno (sl. 1). *Električne silnice* (linije sile) su u prostoru zamišljene crte čijе tangente u svim tačkama pokazuju smjer djelovanja