ENERGIJA, DRUŠTVO I OKOLINA

Božo Udovičić

Energetske pretvorbe i bilance

Knjiga II

GRAĐEVINSKA KNJIGA

Božo Udovičić

ENERGIJA, DRUŠTVO I OKOLINA

Knjiga II

Energetske pretvorbe i bilance

IRO "GRAĐEVINSKA KNJIGA"
Beograd, 1988.

Prof. dr Božo Udovičić, dipl. ing.
Znanstveni savjetnik u Institutu za elektroprivredu i redovni profesor u dopunskom radu na Elektrotehničkom fakultetu u Zagrebu i Fakultetu elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje u Splitu.

Suizdavači na ovoj ediciji su:

Zajednica elektroprivrednih organizacija Hrvatske, Zagreb, Proleterskih brigada 37
Institut za elektroprivredu iz Zagreba, Proleterskih brigada 37

Izdavanje knjiga pomogli su:
INA, Zagreb, Proleterskih brigada 78
INA - Naftaplin, Zagreb, Šubićeva 29

Recenzenti:
Prof. dr Vlado Mikuličić
Mr Miljenko Šunjić

Crteži: Mihaela Tomić

ISBN 86-395-0095-9

Za IRO "Građevinska knjiga"
Milan Višnjić, direktor - glavni urednik
Milica Dodić, odgovorni urednik
Olga Arsenijević, urednik
Vera Knežević, korektor
Dragan Paunović, tehnički urednik i korice

Tiraž: 700 primeraka
Štampa: Štamparija "Bakar" - Bor

Zdenki

SADRŽAJ

1. MOGUĆNOSTI KORIŠTENJA PRIRODNIH OBLIKA ENERGIJE I POTREBE ZA PRETVORBAMA 1
2. POSTUPCI ZA PRETVORBE OBLIKA ENERGIJE 3
2.1. Pretvorbe prirodnih oblika energije u prikladnije oblike energije 3
2.1.1. Postupak isplinjavanja ugljena 3
2.1.2. Postupak rasplinjavanja ugljena 6
2.1.3. Postupak destilacije 10
2.1.4. Postupak prerade plina - degazolinaže 19
2.2. Pretvorba kemijske energije u unutrašnju termičku energiju 21
2.2.1. Izgaranje 22
2.2.1.1. Općenito o izgranju 22
2.2.1.2. Stehiometrijski odnosi izgaranja 23
2.2.1.3. Određivanje potrebnih količina kisika i zraka kod izgaranja 26
2.2.1.4. Sastav i količina dimnih plinova izgaranja 27
2.2.1.5. Ložišta i temperature izgaranja, prvi i drugi glavni stavak termodinamike 29
2.2.1.6. Fizikalni uvjeti i dinamika izgaranja 30
2.2.1.7. Izgaranje krutih goriva 30
2.2.1.8. Izgaranje tekućih goriva 32
2.2.1.9. Izgaranje plinovitih goriva 33
2.2.1.10. Prijelaz topline 34
2.2.1.11. Izmjenjivači topline 39
2.3. Pretvorba nuklearne energije u unutrašnju energiju 45
2.3.1. Općenito o nuklearnoj energiji 45
2.3.2. Nuklearne reakcije i udarni presjeci 49
2.3.3. Nuklearna fisija 52
2.3.3.1. Nuklearni reaktor 57
2.3.4. Nuklearna fuzija 61
2.3.4.1. Općenito o značenju fuzije 61
2.3.4.2. Fizikalne osnove fuzije 62
2.3.4.3. Ostvarenje fuzijskih uvjeta 64
2.4. Pretvorba unutrašnje termičke u mehaničku energiju 70
2.4.1. Općenito o pretvorbi unutrašnje termičke energije 70
2.4.2. Pretvorba unutrašnje termičke energije u mehaničku preko klipnih strojeva 83
2.4.2.1. Klipni motori na temelju Otto-procesa 83
2.4.2.2. Sabathe ili kombinirani disel proces 90
2.4.3. Pretvorba unutrašnje termičke energije u mehaničku preko turbina 94
2.4.3.1. Parna turbina 94
2.4.3.2. Plinske turbine 104
2.5. Pretvorbe potencijalne energije vode u mehaničku energiju 112
2.5.1. Općenito 112
2.5.2. Snaga i stupanj djelovanja turbina 115
2.5.3. Izbor broja okretaja i tipa turbine 124
2.5.4. Ograničenja u radu turbina 128

2.6. Pretvorbe kinetičke energije u mehaničku energiju 134
2.6.1. Teoretske postavke i podloge za korištenje energije vjetra 134
2.6.2. Stupanj djelovanja i izbor tipa zračne turbine 141
2.6.3. Izbor tipa zračne turbine 142
2.7. Pretvorbe mehaničke u električnu i električne u mehaničku energiju 145
2.7.1. Temeljni pojmovi i fizikalne podloge za pretvorbe mehaničke u električnu i električne u mehaničku energiju 145
2.7.2. Istosmjerni električni strojevi 154
2.7.3. Izmjenični električni sinhroni strojevi 161
2.7.4. Asinhroni električni strojevi 166
2.8. Pretvorba električne energije u potencijalnu energiju vode 177
2.8.1. Centrifugalne crpke 178
2.8.2. Crpke - turbine 184
2.9. Neposredne pretvorbe oblika energije u električnu energiju 192
2.9.1. Općenito 192
2.9.2. Neposredna pretvorba toplinske energije u električnu energiju 193
2.9.2.1. Termoelektrična pretvorba 193
2.9.2.2. Termoionska pretvorba 203
2.9.2.3. Magnetohidrodinamički generator (MHD generator) 209
2.9.3. Neposredna pretvorba sunčeve energije u električnu - fotonaponska (fotoelektrična pretvorba) 215
2.9.4. Neposredna pretvorba kemijske energije u električnu energiju 224
2.9.5. Fotoelektrokemijska pretvorba 235
3. PRIJEVOZ I PRIJENOS OBLIKA ENERGIJE 239
3.1. Općenito o prijevozu i prijenosu oblika energije 239
3.2. Načini i sredstva za prijevoz i prijenos energije 240
3.2.1. Prijevoz oblika energije morima i jezerima 242
3.2.2. Prijevoz oblika energije rijekama 244
3.2.3. Prijevoz oblika energije cestama i putovima 245
3.2.4. Prijevoz oblika energije željeznicom 246
3.2.5. Prijenos oblika energije cjevovodima 248
3.2.6. Prijenos energije električnim vodovima 251
3.2.7. Prijevoz nuklearnih goriva 254
3.2.8. Prijenos oblika energije žičarama i transportnim trakama, te kombiniranje prijevoza i prijenosa oblika energije 255
4. ENERGETSKA BILANCA 257
4.1. Izrada energetskih bilanci 257
4.2. Energija potrebna za proizvodnju energije 268

PREDGOVOR

U ovoj knjizi obuhvaćene su sve pretvorbe primarnih oblika energije u tzv. pretvorbene oblike koji su u svom novom obliku pogodniji za korištenje.

Opisana su osnovna fizikalna, kemijska i tehnološka saznanja o pojedinim energetskim pretvorbama, energetske karakteristike pretvorbenih oblika energije te mogućnosti i načini njihovog korištenja.

Osim pretvorbe prirodnih oblika energije u pogodnije pretvorbene oblike, postupcima isplinjavanja, rasplinjavanja, destilacije ili degazoliniranja u knjizi su opisane i sve preostale pretvorbe. Obrađene su pretvorbe kemijske i nuklearne energije u unutrašnju termičku energiju za što se, kao što je poznato, koriste procesi izgaranja odnosno nuklearne fisije ili fuzije, zatim pretvorbe unutrašnje termičke energije u mehaničku energiju što se postiže turbinskim ili stapnim strojem. Dobivanje mehaničke energije također je moguće vjetro-turbinama koje iskorištavaju kinetičku energiju vjetra ili vodnim turbinama koje mehaničku energiju proizvode pretvorbom potencijala energije vode pa je i za te procese provedena odgovarajuća analiza. Ukoliko se mehanička energija direktno ne iskorištava kao korisni oblik energije normalno je da se pomoću generatora pretvara u električnu energiju dok se opet električna energija često pretvara, pomoću elektromotora, ponovno u mehaničku energiju. U energetskom, odnosno elektroenergetskom sistemu ponekad se električna energija takodjer pretvara i u potencijalnu energiju vode pa je to bio razlog da se obrade i crpke. Konačno, obrađene su i neposredne pretvorbe u električnu energiju tj. termoelektrične pretvorbe, termoionske pretvorbe, MHD generatori, fotoelektrične pretvorbe, gorive ćelije i fotoelektrokemijske pretvorbe.

Nakon što su obrađene sve spomenute energetske pretvorbe određena pažnja posvećena je i transportu energije pa su tako obrađene mogućnosti i načini prijevoza i prijenosa oblika energije morima i rijekama, cestama i putevima, cjevovodima, željeznicom, transportnim trakama i žičarama te električnim vodovima.

Na temelju saznanja iz prve i ove knjige o prirodnim i pretvorbenim oblicima energije, o načinima njihovog prijevoza, prijenosa i razdiobe i o mogućnostima upotrebe korisnih oblika energije bilo je moguće načiniti metodologiju za izradu energetske bilance određenog područja, što je urađeno na kraju ove knjige.

Autor

1. MOGUĆNOSTI KORIŠTENJA PRIRODNIH OBLIKA ENERGIJE I POTREBE ZA PRETVORBAMA

U danas uobičajenoj praksi energetski oblici energije dijele se na: prirodne, pretvorbene i korisne oblike energije.

Kao prirodni oblici energije mogu se pojaviti slijedeći oblici energije:

- energija Sunčeva zračenja
- energija goriva
- energija hrane
- energija vodotoka
- energija vjetra
- energija morskih struja i valova
- energija plime i oseke
- energija nuklearnih goriva
- energija vrućih izvora
- energija topline Zemlje (kopna i mora)
- energija vulkana.

Potrošači koriste energiju (zbog toga se ti oblici energije i nazivaju "Korisni oblici energije") kao: toplinsku energiju, mehaničku energiju, kemijsku energiju i energiju za rasvjetu.

Vrlo rijetko se prirodni oblici energije mogu koristiti, bez posebnih pretvorbi, kao korisni oblici energije, a veoma često se događa da se već pretvoreni oblik energije mora još jednom pretvoriti da bi se dobio korisni oblike energije.

Bez energetskih pretvorbi mogu se u korisne svrhe upotrijebiti samo toplina Sunčeva zračenja, vrući izvori i toplina Zemlje, dok se svi ostali izvori energije mogu korisno upotrijebiti samo preko energetskih pretvorbi.

Temeljne energetske pretvorbe ostvaruju se preko: izgaranja, gorivih ćelija, energije živih bića, fotoćelija i nuklearnih reakcija. Navedenim energetskim pretvorbama dobivaju se oblici energije koji se ne mogu koristiti kao korisni oblici (izuzev topline kod izgaranja i misaone energije kod energije živih bića) nego moraju doživjeti još jednu ili više pretvorbi. Pretvorbom energije zračenja preko fotoćelija dobiva se električna energija, a ona se dalje pretvara u korisne oblike energije (toplinu, kemijsku energiju, mehaničku energiju i energiju za rasvjetu). Pretvorbom energije goriva preko gorivih ćelija također se dobiva električna energija, koja se pretvara u korisne oblike.

Energija koja se dobiva izgaranjem (osim energije za toplinu), energija živih bića (osim misaone) energija nuklearnih reakcija, potencijalna energija vodotoka, energija vjetra morskih struja i valova, energija plime i oseke, te energija vrućih izvora (osim energije za toplinu) služe kao energija za pogon. Budući da se radi o različitim

oblicima energije za pogon, bit će potrebne i različite pretvorbe tih oblika energije u korisne oblike. Međutim, najčešći rezultat tih pretvorbi je električna energija koja se dalje pretvara u korisne oblike ili mehanička energija kao koristan oblik energije.

Pod mogućnošću direktnog korištenja prirodnih oblika energije smatrat će se korištenje prirodnih oblika energije bez energetskih pretvorbi, zatim s energetskim pretvorbama koje ne ulaze u energetsku bilancu (proizvodnja i korištenje hrane, a ne energija za proizvodnju hrane), te korištenje prirodnih oblika uz pretvorbe bez posebnih postrojenja za energetske pretvorbe (obična vatra, jedrenjaci i sl.).

U svom razvoju čovjek je najprije počeo koristiti energiju Sunca i obožavao je Sunce, jer je čvrsto vjerovao da ovisi o njemu i da se zahvaljujući njemu, on razvio. I danas čovjekova egzistencija ovisi o biološkom ciklusu kojega Sunce održava.

Energija Sunčeva zračenja koristi se direktno za zagrijavanje okoline, a može se koristi i za zagrijavanje sanitarne vode, te za sušenje drugih oblika energije.

Vrući izvori (vrela voda ili para) mogu se neposredno upotrijebiti za grijanje bilo prostorija bilo u industrijskim procesima.

Toplina Zemlje može se koristi za čuvanje materije od smrzavanja.

Sunčeva energija igra temeljnu ulogu u rastu vegetacije. Kroz katalitičku akciju klorofila, Sunčeva energija je uhvaćena i spremljena u biljke kao potencijalna kemijska energija. Čovjek koristi vegetaciju kao hranu i kao gorivo. Životinje također koriste vegetaciju kao hranu da bi dali čovjeku hranu i mehaničku energiju. Danas čovjek ovisi o energiji isto kao i njegovi prethodnici samo s tom razlikom da troši mnogo više energije ne iz tekućeg vegetacionog ciklusa, nego iz energije fosilnih goriva, vrućih izvora ili iz energije nuklearnih goriva. Razlozi zbog kojih se dijeli problem prehrane od problema opskrbe energijom su dvojaki i to: prvo, prehrana je specifični oblik koja mora imati posebna i određena svojstva i drugo, prehrana mora imati prednost pred svim drugim oblicima energije s obzirom na životne potrebe.

Čovjek energiju hrane (kemijsku energiju) pretvara u mehaničku i misaonu. Prosječna snaga pri normalnom naponu čovjeka kroz radno vrijeme iznosi do 100 W, što za godinu dana daje energiju do 200 kWh.

Neposrednim izgaranjem goriva u pojedinačnim ložištima (domaćinstvima) osigurava se znatan dio toplinske energije za kuhanje, grijanje i pripremu tople vode.

Za osiguranje mehaničke energije čovjek je najprije koristio svoju snagu, zatim snagu životinja, vjetra i potencijalnu energiju vodotoka. Svoju snagu čovjek je uglavnom koristio za pridobivanje hrane i za ovladavanje drugim oblicima energije. Snagu životinja, čovjek je koristio za dobivanje mehaničke energije (teži poslovi u osiguranju hrane) i za prijevoz. Snaga vjetra počela se koristiti (bez složenih uređaja za pretvorbe) upotrebom jedrenjaka (za transport) i upotrebom vjetrenjača (za mehaničku energiju: crpljenje vode, mlinovi itd.). Potencijalna energija vodotoka uglavnom je korištena za navodnjavanje i za mlinove.

Energija za rasvjetu korištena je od momenta pronalaska vatre, znači korištenjem drveta, nafte i plina.

Navedenim neposrednim korištenjem prirodnih oblika energije, te korištenjem energije živih bića i energije prirodnih oblika energije, bez posebnih pretvorbi osigurava se mali dio korisnih oblika energije u životu suvremena čovjeka.

Najveći dio korisnih oblika energije osigurava se pretvorbom prirodnih oblika energije u prikladnije prirodne oblike ili u pretvorbene oblike energije, koji se mogu bolje i efikasnije koristiti u suvremenim strojevima i postrojenjima.

U nastavku slijedi detaljan opis svih pretvorbi oblika energije.

2. POSTUPCI ZA PRETVORBE OBLIKA ENERGIJE

Veliki dio prirodnih oblika energije ne može se koristiti u izvornom obliku, nego se mora pretvoriti u pogodniji oblik energije za korištenje. Najčešće su slijedeće pretvorbe oblika energije:

- **prirodnih oblika u prikladnije oblike energije**
- **kemijske energije u untrašnju termičku energije**
- **nuklearne energije u unutrašnju termičku energiju**
- **unutrašnje termičke energije u mehaničku energiju**
- **potencijalne energije vode u mehaničku energiju**
- **kinetičke energije u mehaničku energiju**
- **mehaničke u električnu i električne u mehaničku energiju**
- **električne energije u potencijalnu energiju vode**
- **neposredne pretvarače u električnu energiju.**

2.1. PRETVORBE PRIRODNIH OBLIKA U PRIKLADNIJE OBLIKE ENERGIJE

Pored direktnog korištenja goriva za dobivanje topline, veoma često se ta goriva pretvaraju u pogodnije oblike, što je najčešće uvjetovano potrebama potrošača.

Najčešća pretvorba ugljena u pogodnije prirodne oblike energije obavlja se postupcima isplinjavanja i rasplinjavanja, dok se pretvorbe nafte vrše preko osnovnog postupka koji se naziva destilacijom, a prirodni plin preko postupka degazolinažama.

2.1.1. POSTUPAK ISPLINJAVANJA UGLJENA

Isplinjavanje je jedan od prvih razvijenih postupaka za pretvorbu prirodnog oblika energije u pogodniji oblik energije. Naime, njegov razvoj je vezan za dobivanje koksa, pa je prvi patent za dobivanje koksa prijavljen u Engleskoj 1620. godine. Prije samog postupka isplinjavanja potrebno je ugljen najprije pripremiti, a to znači odstraniti jalovinu i sortirati ga.

Isplinjavanje je ustvari destilacija ugljena bez kemijske promjene sastojaka, pri čemu najveći dio čine kruti otpaci. Samo isplinjavanje se provodi dovođenjem topline

bez prisustva zraka, a iz goriva se izlučuju plinovite i tekuće tvari dok se krute tvari talože u pećima.

Iako se postupkom isplinjavanja (koksiranjem i švelovanjem) dobiva koks, polukoks, plinovi i tekućine, ne bi se smjelo zaključiti da se plinovi i tekućine koji se dobivaju isplinjavanjem već nalaze u ugljenu.

Sam postupak isplinjavanja može se najbolje opisati ako se prikaže što se događa s ugljenom koji se nalazi u zatvorenoj komori (bez prisustva zraka), a kome se dovodi toplina. Pri povećanju temperatura događa se slijedeće:

Temperatura

373-550 K Pri temperaturi ugljena od 373-550 K uglavnom se isparava higroskopska vlaga,

550-575 K U tom intervalu temperatura dolazi do izdvajanja vode koja je vezana u kemijskim spojevima, zatim dolazi do izlučivanja ugljičnog dioksida i sumpora u obliku sumporovodika. Do te temperature vrlo malo se stvara bitumenskih para i gorivih plinova, pa u tom rasponu temperatura ustvari vrši pougljivanje, jer se struktura ugljena ne mijenja,

575-625 K Kod tih temperatura počinje se značajnije taliti bitumen, te počinje značajnije stvaranje gorivih plinova,

625-675 K To je područje u kome se nastavlja talenje i stvaranje plinova, te ugljen postaje kao kašasta masa,

675-775 K U tom temperaturnom području nastaje značajnije izlučivanje para i plinova, a bitumenozni sastojci bogati ugljikom služe kao vezivo za ugljene čestice,

775-875 K U području tih temperatura počinje ponovno skrućivanje i nastaje polukoks,

875-1275 K Povećanjem temperature iznad 875 K polukoks se počinje pretvarati u pravi koks, te počinje intenzivno isplinjavanje.

Iz navedenoga može se zaključiti da su dva područja isplinjavanja. Početno isplinjavanje odvija se kod temperatura 575-675 K, glavno isplinjavanje nastaje kod ponovnog skrućivanja kašaste mase, te završno isplinjavanje kod temperatura oko 1000 K.

Ovisno o tome što se želi postići isplinjavanjem kao konačni produkt (koks, polukoks ili plinovi) postoji nekoliko postupaka isplinjavanja: koksiranje, švelovanje, te dobivanje plinova i tekućih ugljikovodika.

Postupak švelovanja provodi se do temperature 875 K, a osnovna svrha je proizvodnja katrana i polukoksa. Za švelovanje se najčešće upotrebljava mrki ugljen, a katkad kameni ugljen slabije kvalitete. Osnovno obilježje ugljena za švelovanje je da treba sadržavati najmanje 6-8% bitumena. Polukoks koji se dobiva švelovanjem uglavnom se upotrebljava za rasplinjavanje ili u termoelektranama za proizvodnju električne energije. Mana je polukoksa u tome što je lako zapaljiv pa ga je teško transportirati na veće udaljenosti. Katran dobiven postupkom švelovanja ima široku primjenu u kemijskoj industriji (kao sirovina) te primjenu u građevinarstvu i za proizvodnju sintetičkog benzina.

Za koksiranje se primjenjuju samo neke vrste kamenog ugljena koje sadrže 18-28% hlapljivih sastojaka, a to su u prvom redu masni ugljen i dio plinskog ugljena. U koliko se nema na raspolaganju tih vrsta ugljena, a želi se proizvesti koks, tada se te

osobine moraju postići miješanjem raznih vrsta ugljena. Pored hlapljivih sastojaka, vrlo važni zahtjevi za proizvodnju kvalitetnog koksa postavljaju se na ugljen u pogledu sadržaja pepela (ne više od 7%), krupnoće ugljena (do 10 mm), te sadržajem vlage (do 10%). Osnovni proizvod koksiranja je koks velike čvrstoće, a upotrebljava se za visoke peći pri proizvodnji sirovog željeza, te za kupolne peći kod proizvodnje ljevanog željeza. Sitnije vrste koksa upotrebljavaju se u kemijskoj industriji, te u širokoj potrošnji.

Pri koksiranju jedne tone ugljena obično se dobiva oko:

750 - 780 kg koksa
300 - 340 m^3 koksnog plina
30 - 40 kg katrana
8 - 10 kg benzola i
oko 10 kg amonijaka.

Ako početno isplinjavanje daje mnogo plina i katrana, to je redovno znak da upotrijebljeni ugljen neće dati dobar koks jer se bitumen destilira bez znatnijeg rastvaranja. Na taj se način smanjuje mogućnost vezivanja i sljepljivanja ugljenih čestica pomoću ostatka rastvorenog bitumena, pa se dobiva mekani i nekvalitetni koks. Prekomjerno glavno isplinjavanje očituje se u bubrenju ugljena, osobito ako je plastična masa žilava, jer tada plinovi ne mogu slobodno izlaziti iz ugljena, odnosno iz bitumena. Ta pojava može ugroziti zidove komora za isplinjavanje. Ako je završno isplinjavanje intenzivno, koks dobiva pukotine jer se za vrijeme isplinjavanja steže.

Mrki ugljen gubi najveći dio svoje bituminozne tvari za vrijeme početnog isplinjavanja, pa pri višim temperaturama nema veziva za stvaranje koksa. Tako dobiveni koks lako se raspada, pa ne podnosi ni dulji transport, a kamoli opterećenje u metalurškim pećima.

Za proizvodnju plinova (u prvom redu rasvjetnog plina koji je osnovna komponenta kod proizvodnje gradskog plina) i tekućih ugljikovodika u procesu isplinjavanja upotrebljavaju se ugljeni s relativno visokim sadržajem hlapljivih sastojaka.

Proces proizvodnje plinova i tekućih ugljikovodika u suštini je isti kao postupak švelovanja i koksiranja, s tom razlikom što je kod švelovanja glavni proizvod katran i polukoks, a kod koksiranja koks, a kod proizvodnje plina i tekućih ugljikovodika su koks, polukoks i katran sporedni proizvodi. Jedan od najčešćih i najvažnijih plinovitih proizvoda je rasvjetni plin, a benzol, amonijak i naftalin od tekućih ugljikovodika.

Razlika između koksnog plina i rasvjetnog plina najbolje se može vidjeti po sastavu istih

	CO	H_2	C_mH_m	MJ/m^3
Koksni plin	5-6%	55-60%	oko 25%	18-19
Rasvjetni plin	7-9%	48-52%	35-45%	17-24

Kod proizvodnje plina i tekućih ugljikovodika postupkom isplinjavanja proizvodi se i velika količina koksa, koji se u ovom slučaju naziva "plinski koks". Karakteriziran je manjom čvrstoćom, većim udjelom hlapljivih sastojaka i pepela od koksa koji se dobiva postupkom koksiranja. Plinski koks se upotrebljava u nekim kemijskim industrijama i u širokoj potrošnji.

2.1.2. POSTUPAK RASPLINJAVANJA UGLJENA

Postupak rasplinjavanja ugljena vrši se u postrojenjima koja se nazivaju plinskim generatorima ili sa podzemnim nalazištima ugljena. U plinskom generatoru izgara ugljen, pa zrak ili smjesa drugih plinova, ili vodena para, u dodiru s ugljikom čine kemijsku reakciju. Prema tome, rasplinjavanje ugljena je kemijski proces u kome se gorivi sastojci ugljena pretvaraju u gorive plinove i pepeo. Postupkom rasplinjavanja mogu se goriva slabijih kvaliteta pretvarati u plinovita goriva koja se bolje mogu koristiti kod potrošača.

Razlika je između isplinjavanja i rasplinjavanja u tome što kod isplinjavanja nema kemijskog procesa i što najveći dio procesa čine kruti sastojci (koks), a kod rasplinjavanja nastaju kemijske promjene i manji je dio krutih sastojaka (pepeo).

Rasplinjavanje ugljena služi za dobivanje različitih vrsta plinovitih goriva. Vrste i sastav plinovitih goriva koji se dobivaju rasplinjavanjem uglavnom ovise o sastavu goriva te o mediju u kome izgara gorivo (zrak, smjesa plinova, vodena para, smjesa zraka i vodene pare).

Ako je medij u kome izgara ugljen zrak, u tom slučaju govori se o proizvodnji zračnog plina, ako je medij vodena para onda se govori o proizvodnji vodenog plina, kad je medij smjesa zraka i vodene pare onda se govori o generatorskom plinu i kada je kombinacija s drugim plinovima, tada se govori o regenerativnim plinovima.

Kod postupka rasplinjavanja može se pored dobivanja plinova dobiti i određena količina topline, što se može vidjeti prilikom kemijske reakcije ugljika i kisika, a prema slijedećoj relaciji

$$1\ \text{kmol C} + 1\ \text{kmol O}_2 \rightarrow 1\ \text{kmol CO}_2 + 393.7\ \text{MJ}. \qquad (1)$$

Kod navedene relacije dolazi do potpunog vezivanja ugljika i kisika, pa se u tom slučaju govori o potpunom izgaranju ugljika. Toplina koja nastaje pri potpunom izgaranju ugljika troši se na zagrijavanje ugljena. Kod visokih temperatura ugljik se može vezati s ugljičnim dioksidom i pri tome nastaje ugljični monoksid i potrošak topline, što se vidi iz slijedeće relacije

$$1\ \text{kmol C} + 1\ \text{kmol CO}_2 \rightarrow 2\ \text{kmol CO} - 172.6\ \text{MJ}. \qquad (2)$$

Kemijska reakcija vezanja ugljika s kisikom iz vodene pare ovisna je o temperaturi kod koje se odvija kemijska reakcija. Ako se radi o temperaturama iznad 1000 K u tom slučaju reakcija teče ovako:

$$1\ \text{kmol C} + 1\ \text{kmol H}_2\text{O} \rightarrow 1\ \text{kmol CO} + 1\ \text{kmol H}_2 - 118.8\ \text{MJ}. \qquad (3)$$

a ako je reakcija pri nižim temperaturama u tom slučaju je:

$$1\ \text{kmol C} + 2\ \text{kmol H}_2\text{O} \rightarrow 1\ \text{kmol CO}_2 + 2\ \text{kmol H}_2 - 76.2\ \text{MJ}. \qquad (4)$$

Ugljični monoksid reagira na kisik iz vodene pare prema relaciji:

$$1\ \text{kmol CO} + 1\ \text{kmol H}_2\text{O} \rightarrow 1\ \text{kmol CO}_2 + 1\ \text{kmol H}_2 + 42.3\ \text{MJ} \qquad (5)$$

a ugljični dioksid reagira na slobodan vodik prema relaciji

$$1\ \text{kmol CO}_2 + 1\ \text{kmol H}_2 \rightarrow 1\ \text{kmol CO} + 1\ \text{kmol H}_2\text{O} - 42.3\ \text{MJ}. \qquad (6)$$

Iz navedenih relacija evidentno je da proces u plinskom generatoru, u slučaju kada je zrak, vodena para ili zrak i vodena para medij u kome izgara ugljik, nije jednostavan i jednoznačan.

Da bi se moglo dobro razlučiti jednu vrstu plina (ili smjese plinova) od druge, potrebno je poznavati neka osnovna svojstva i zakone o plinovima.

Jedinica kilogram (kg) posve je unierzalna jedinica mase, a njom se može izražavati masa krutih, tekućih i plinovitih tvari. Jedinica kilogram ne vodi računa o tome od kakvih je molekula sastavljeno neko tijelo, da li su molekule teške ili lagane, da li ih ima mnogo ili malo. Da bi se ipak mogle uočiti razlike uvedena je individualna jedinica mase mol (mol). Mol je količina tvari sistema koji sadržava toliko elementarnih čestica koliko ima atoma u 0.012 kilograma ugljika 12. Elementarne čestice mogu biti atomi, molekule, ioni, elektroni i druge čestice ili određene skupine tih čestica.

Ugljikov izotop C-12 ima šest neutrona, šest protona i šest elektrona pa je radi toga odabran da se njime odredi jedinica količine tvari, te se prema njemu određuju relativne mase drugih kemijskih elemenata. Prema tome može se kazati, da je mol neke tvari masa koja je jednaka toliko grama tvari koliko je njena relativna molekularna masa. Pođe li se od Avogadrova zakona koji kaže: "Jednaki volumeni različitih plinova sadržavaju pri jednakim temperaturama i tlakovima jednak broj molekula", može se konstatirati, da se svako tijelo ili svaka količina tvari mase 1 mol (bez obzira na kemijski sastav) sastoji od 6.023×10^{23} molekula (Avogadrov broj).

Iz Avogadrova zakona i Avogadrova broja može se zaključiti da se gustoće plinova odnose pri jednakim temperaturama i tlakovima kao njihove molekularne mase.

Za idealne plinove (plinovi koji se sastoje od potpuno elastičnih molekula među kojima ne djeluju privlačne sile) može se kazati da je tlak plina proporcionalan masi promatrane količine plina, a obrnuto proporcionalan volumenu koji plin zauzima (Boyle-Mariotteov zakon) ili pri istoj temperaturi tlakovi stanovite količine plina odnose se obrnuto od odnosa volumena, odnosno pri istoj temperaturi umnožak tlaka i volumena stanovite količine plina konstantna je vrijednost (sl. 1)

$$p\,V = \text{konstantno.} \tag{7}$$

Uzme li se u obzir promjena temperature, u tom slučaju se jednadžba može pisati

$$p\,v = \text{const.}\,T = R\,T \tag{8}$$

gdje su:

p - tlak plina

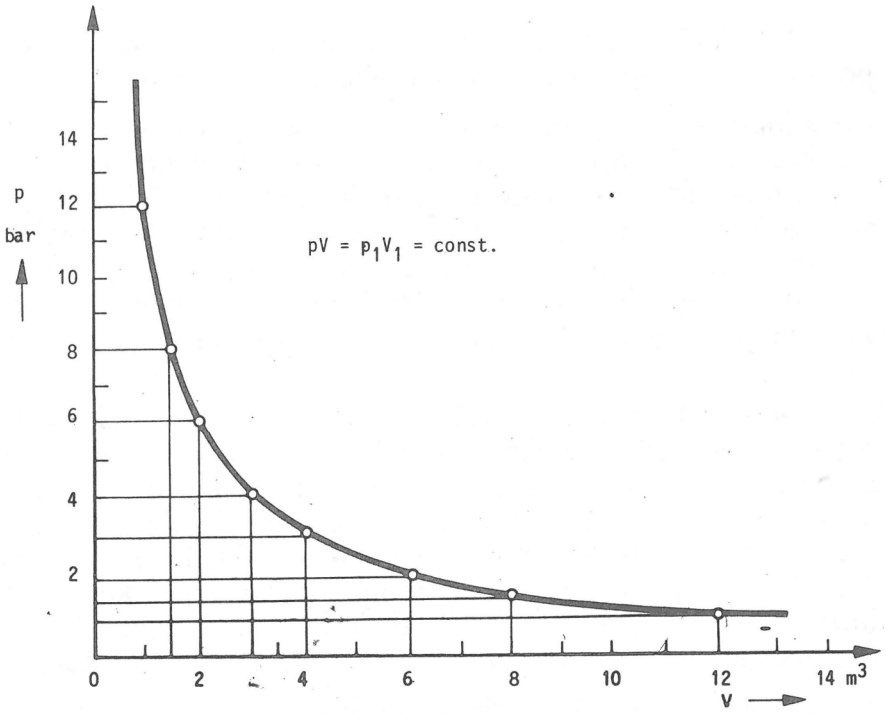
v - specifični volumen, tj. omjer volumena i odgovarajuće mase plina

R - individualna plinska konstanta, koja ima stalnu vrijednost za svaki idealni plin

T - iznosi temperatura.

Navedeni zakoni mogu se gotovo u potpunosti primjeniti i na ostale plinove i pare kada se radi pri dovoljno visokim temperaturama i dovoljno malim gustoćama.

U tabeli 1. nalaze se podaci o relativnim molekularnim masama, plinskim konstantama, specifičnim toplinama i gustoćama nekih plinova pri 1000 kPa i temperaturi 273.15 K.



Sl. 1. Grafički prikaz Boyle-Mariotteova zakona

Tabela 1.

Plin	Kemijska formula	Relativna molekularna masa M	Plinska konstanta R kJ/kg K	Specifična toplina c_p kJ/kg K	Gustoća ρ_o kg/m^3
Helij	He	4.003	2.0780	5.237	0.1785
Argon	Ar	39.940	0.2082	0.523	1.7834
Vodik	H_2	2.016	4.1220	14.245	0.0899
Dušik	N_2	28.020	0.2967	1.038	1.2505
Kisik	O_2	32.000	0.2598	0.913	1.4290
Zrak	-	28.960	0.2870	1.005	1.2928
Ugljični monoksid	CO	28.010	0.2699	1.042	1.2500
Ugljični dioksid	CO_2	44.010	0.1888	0.820	1.9768
Sumporni dioksid	SO_2	64.060	0.1298	0.607	2.9265
Amonijak	NH_3	17.030	0.4882	2.055	0.7713
Acetilen	C_2H_2	26.040	0.3196	1.511	1.1709
Metan	CH_4	16.040	0.5187	2.156	0.7168
Metiklorid	CH_3Cl	50.490	0.1647	0.737	2.3084
Etilen	C_2H_4	28.050	0.2967	1.612	1.2604
Etan	C_2H_6	30.070	0.2767	1.729	1.3560

U nastavku navode se osnovni sastavi i karakteristike plinova koji nastaju rasplinjavanjem ugljena.

	Zračni plin	Vodeni plin	Generatorski plin
Vodik (H_2)	do 5%	50-55%	18-22%
Ugljični monoksid (CO)	30-32%	33-42%	12-22%
Ugljični dioksid (CO_2)	preko 5%	2-6%	do 16%
Metan (CH_4)	3%	do 2%	2-3%
Dušik (N)	do 65%	3-7%	do 55%
Ogrijevna moć	3.4-4.2 MJ/m^3	10.3-10.9 MJ/m^3	4.6-5.4 MJ/m^3

Podzemno rasplinjavanje ugljena može se provesti tako da se na nalazištima ugljena iskopa sistem rovova, koji će služiti za cirkulaciju zraka i plina. Pogodan raspored rovova i bušotina od odlučnog je značenja za uspjeh podzemnog rasplinjavanja. Poremećaji u tom rasporedu, najčešće uzrokovani urušavanjem rovova, najveće su teškoće za praktičnu realizaciju tog postupka. Pojedini dijelovi rovova nužno se urušavaju zbog samog procesa rasplinjavanja jer se njima postepeno smanjuje ugljena masa između pojedinih rovova. Osim toga, za vrijeme rasplinjavanja vlada u nalazištu visoka temperatura.

Glavni je problem podzemnog rasplinjavanja nadzor cirkulacije plinova. Proces se postepeno odvija od jednog kraja nalazišta prema drugome, pa se bušotinama kojima se u početku odvodio plin postepeno dovodi komprimirani zrak. Taj zrak se spaja s ugljikom iz ugljena u ugljični dioksid (CO_2) uz oslobađanje topline. Tom toplinom griju se udaljeniji dijelovi ugljenog sloja, u kojima se provodi redukcija ugljičnog dioksida (CO_2) u ugljični monoksid (CO). Ovaj se postupak razlikuje od procesa u plinskom generatoru samo u tome što se gorivo ne pomiče, već se ugljeni slojevi postepeno zahvaćaju i rasplinjavaju.

Temperature u nalazištu za vrijeme rasplinjavanja obično nisu dovoljno visoke jer velike količine vlažnog ugljena i jalovine apsorbiraju znatne količine topline. Visoke temperature mogu se postići samo intenzivnim rasplinjavanjem.

Proizvedeni plin zbog niske temperature obično sadrži veći postotak ugljičnog dioksida. Pokusi podzemnog rasplinjavanja pomoću kisika (umjesto zraka) daju obično dobre rezultate, jer se na taj način može proizvoditi vodeni plin i podržavati visoka radna temperatura.

Sastav i ogrjevna moć plinova proizvedenih podzemnim rasplinjavanjem ugljena ovise u prvom redu o kvalitetu ugljena, te o vrsti i količini medija za rasplinjavanje (zrak, vodena para, vodena para i zrak, vodena para i kisik)

Za očekivati je da će u budućnosti podzemno rasplinjavanje ugljena imati važnu ulogu jer se mogu dobiti velike količine energije i upotrijebiti i ona nalazišta koja se inače ne mogu racionalno eksploatirati ili zbog tankih slojeva ili zbog visokog postotka pepela i vlage. Osim toga, podzemnim rasplinjavanjem mogli bi se iskoristiti i ostaci ugljena (koji, normalno, nisu maleni do 40%) u već napuštenim rudnicima koji se normalnim rudarskim radovima ne mogu eksploatirati.

Nije, međutim, poznato može li se podzemnim rasplinjavanjem sva količina ugljena eksploatirati. Ako to bude moguće i ako se postupak tehnološki dovoljno razvije, i bogata ugljena nalazišta mogla bi se obuhvatiti podzemnim rasplinjavanjem. Time bi se postigle znatne uštede u radnoj snazi, koja danas sve više postaje problem za eksploataciju podzemnih nalazišta, i smanjili bi se općenito troškovi proizvodnje.

2.1.3. POSTUPAK DESTILACIJE

Nafta dobivena iz zemlje ne može se izravno transportirati i prerađivati, jer u sebi, pored otopljenih plinova i soli, sadrži i mehaničke nečistoće: vodu, mulj i pijesak.

Kod izlaska nafte iz zemlje obično dolazi do sniženja tlaka, pa dolazi do pojave mjehurića. Odvajanje plina (najlakših plinovitih ugljikovodika i sumporovodika) od nafte vrši se u separatorima za sirovu naftu, a postupak se naziva otplinjavanje nafte. Ako pak sirova nafta sadrži i veće količine težih plinovitih ugljikovodika (propana i butana), postupkom stabilizacije dobivaju se ukapljeni plinovi i stabilizirana nafta.

Odsoljavanje, odvodnjavanje, odmuljivanje i odstranjivanje pjeska provodi se u neposrednoj blizini nalazišta nafte, a u za to specijalno uređenim spremnicima. Skladištenjem u tim spremnicima, iz nafte se istaloži veći dio vode, mulja i pjeska. Odsoljavanje nafte vrši se pomoću dodavanja vode (količina dodavanja vode ovisi o količini soli u nafti) uz istovremeno zagrijavanje do 400 K. Tim postupkom ostaje nešto vode u nafti ali se uklanja veliki postotak soli (do 95%).

Voda se s naftom ne miješa, ali pravi emulzije koje mogu biti više ili manje stabilne. Ukoliko u sirovoj nafti, koja dođe u preradu, ima više vode, proces će trošiti više topline, a povećava se i tlak plinova, što stvara razne poteškoće u pogonu postrojenja. Pjesak i mulj, mogu izazvati veće troškove održavanja u postrojenjima za preradu nafte, a može doći i do začepljenja cijevi.

Za razvijanje emulzije vode i nafte, te za otklanjanje mehaničkih nečistoća, koriste se slijedeći postupci:

a) mehanički postupak,
b) fizikalno-kemijski postupak,
c) električni postupak.

a) mehanički postupak se sastoji uglavnom u tome da se nafta uskladišti u velike spremnike. Nakon nekoliko sati, iz nafte se istaloži pijesak, mulj i voda koja se ispušta sa dna. Za ubrzavanje postupka potrebno je naftu u spremnicima zagrijavati.

b) fizikalno-kemijski postupak sastoji se u razbijanju emulzije pomoću posebnih sredstava koja ubrzavaju proces razdvajanja emulzije. Ove kemikalije djeluju na površinsku napetost sirove nafte.

c) električna deemulgacija vrši se pomoću elektroda između kojih je napon 10-20 V. Nafta s emulzijom propušta se kroz izmjenično električno polje 35 kV. U njemu se izazivaju vibracije električno nabijenih kapljica, što dovodi do razbijanja emulzija.

Ovako pripremljena nafta transportira se do rafinerije.

Transport nafte vrši se na različite načine. Na kopnu je najčešći transport sa željezničkim cisternama kapaciteta 10-15 tona, te auto-cisternama. Za prekomorski transport koriste se brodovi tankeri, a po rijekama šleperi.

Transport velikih količina nafte, od izvora do pomorskih luka ili od njih do rafinerija, vrši se naftovodima.

Rafinerije nafte su skup postrojenja za preradu nafte u prikladnije oblike energije za potrošnju. Broj i veličina postrojenja u jednoj rafineriji u prvom redu ovisi o kapacitetu rafinerije, zatim o kemijskom sastavu nafte koja se prerađuje, te o količini, strukturi i svojstvima derivata koji se dobivaju preradom nafte.

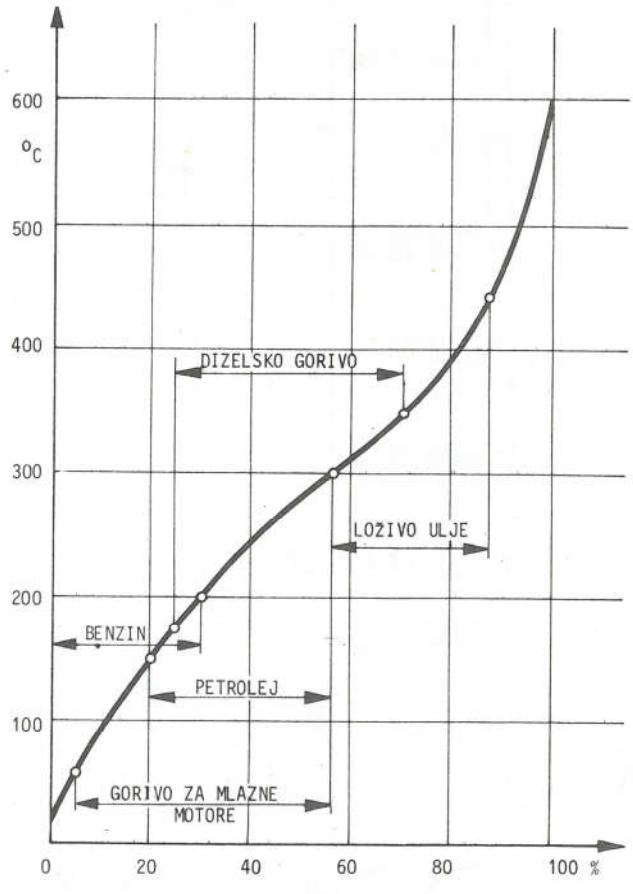
Osnovno postrojenje u svakoj rafineriji nafte je kolona za destilaciju, a za svaku dalju preradu proizvedenih destilata potrebna su druga dodatna postrojenja koja ovise

o traženoj strukturi i kvaliteti derivata. Proizvodnja pak pojedinih derivata ovisna je ne samo o potrebama tržišta nego i o sastavu nafte koja se prerađuje, pa je radi toga uvijek nemoguće uskladiti mogućnosti proizvodnje pojedinih derivata s potrebama tržišta.

Rafinerije se mogu graditi da prerađuju naftu samo u goriva, ili samo za maziva ulja ili pak da proizvode cijeli spektar produkata koji se mogu dobiti preradom nafte.

Destilacija je osnovni, najstariji i najrasprostranjeniji postupak koji se primjenjuje u preradi nafte. Svrha je destilacije da se iz tekućine, koja je smjesa različitih sastojaka, odvoje njezini sastojci, a to se postiže različitim temperaturama isparavanja. Ili, destilacija je postepeno izdvajanje ugljikovodika putem postepenog isparavanja te ponovne kondenzacije pojedinih sastojaka sadržanih u sirovoj nafti. Svaki sastojak (komponenta) koji se dobiva destilacijom naziva se frakcija.

Svaka frakcija ima svoj početak i kraj destilacije, koji je određen početnom i krajnjom temperaturom destilacije. Na sl. 2. prikazana je krivulja destilacije određene nafte, što znači da njen oblik ovisi o sastavu nafte. Prema sl. 2. vidljivo je da postoje preklapanja početka destilacije jedne frakcije sa svršetkom destilacije prethodne ili prethodnih frakcija. Kod projektiranja i izgradnje postrojenja za destilaciju uvijek se nastoji da bude što manje preklapanja destilacija pojedinih frakcija.

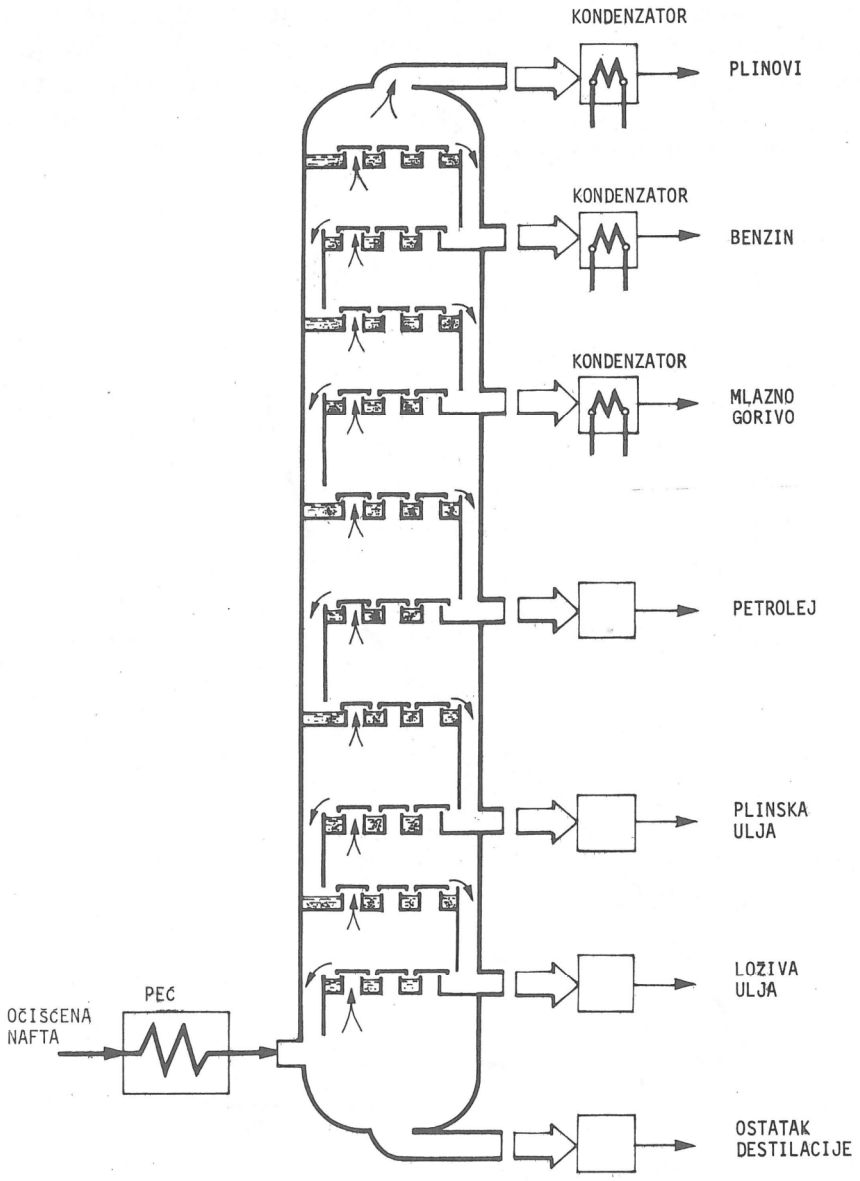


Sl. 2. Krivulja destilacije nafte

S obzirom na tlak koji vlada u kolonama za rektifikaciju (niz isparavanja i kondenzacija) destilacije mogu biti:

- atmosferska
- volumenska
- pod tlakom.

Osnovni princip rada za sve vrste destilacija prikazan je na sl. 3. Pri dnu kolone za rektifikaciju uvodi se nafta. Prije ulaza u kolonu nafta se zagrije do temperature koja omogućuje isparavanje onih frakcija koje se žele proizvoditi. Obično je u prvoj koloni za rektifikaciju nafta zagrijana do 700 K, što znači da će se u prvom koraku dobiti sve frakcije. Kolona za rektifikaciju po svojoj visini podijeljena u veći broj komora s podacima koji se nazivaju tanjuri. Pored tanjura postoje pretočne cijevi prema donjim podovima, a prema gornjim podovima postoje zvona. Ulaskom zagrijane nafte u kolonu za destilaciju počinje ishlapljivanje i pare iz nižih tanjura dižu



Sl. 3. Shematski prikaz destilacije

se i ulaze u zvona viših tanjura, iz kojih im dalje strujanje onemogućuje tekućina koja se nalazi u tanjuru i djeluje kao zapor pa se pare s njom mješaju. Kod tog mješanja kondenziraju se pare frakcije s višom temperaturom isparavanja pa se kao tekućina preljevaju preko ruba cijevi (smještenih uz rubove tanjura) u niži sloj. Temperatura para uvijek je nešto viša od temperature kondenzata kroz koji prolazi. Mješanjem pare i kondenzata dolazi do izjednačavanja temperatura. Na taj način se kondenzat ugrije pa iz njega lako ispare hlapljivi sastojci koji kreću prema višoj koloni, a u isto vrijeme para se nešto ohladi pa se iz nje (u promatranoj frakciji - komori) kondenziraju najteži sastojci.

Idući prema vrhu kolone i pare i tekućina imaju sve više temperature, pa se radi toga u pojedinim visinama kolone pojavljuju pare samo određene frakcije. Njihovim odvođenjem i hlađenjem (kondenziranjem) moguće je dobiti frakcije koje se žele. Za kvalitet frakcije vrlo bitno je da se u svim dijelovima kolone za rektifikaciju održava stalna temperatura. Održavanje stalne temperature nije tehnički niti tehnološki problem i može se osigurati na nekoliko načina.

Atmosferska destilacija obično se naziva primarnom destilacijom, a dobila je ime po tome što se provodi pod atmosferskim tlakom. Atmosferskom destilacijom ne mogu se destilirati ugljikovodici koji sadrže više od 18 atoma ugljika po molekuli, pa se radi toga javlja veliki dio kao ostatak destilacije (do 40%). Koliki će biti ostatak atmosferske destilacije ovisno je u prvom redu o sastavu nafte. Ostatak atmosferske destilacije sadrži još dosta vrijednih frakcija koje je potrebno dodatno destilirati.

Vakumska destilacija razlikuje se od atmosferske samo po tome što je u koloni za rektifikaciju niži tlak od atmosferskog. Obično je tlak dosta niži od 10^4 Pa, pa se na taj način smanjuje temperatura isparavanja, a to ujedno omogućava isparavanje i frakcija s većim brojem atoma ugljika po molekuli. Obično se ostatak iz atmosferske destilacije dovodi u kolonu vakumske destilacije, a postupak je potpuno analogan postupku atmosferske destilacije.

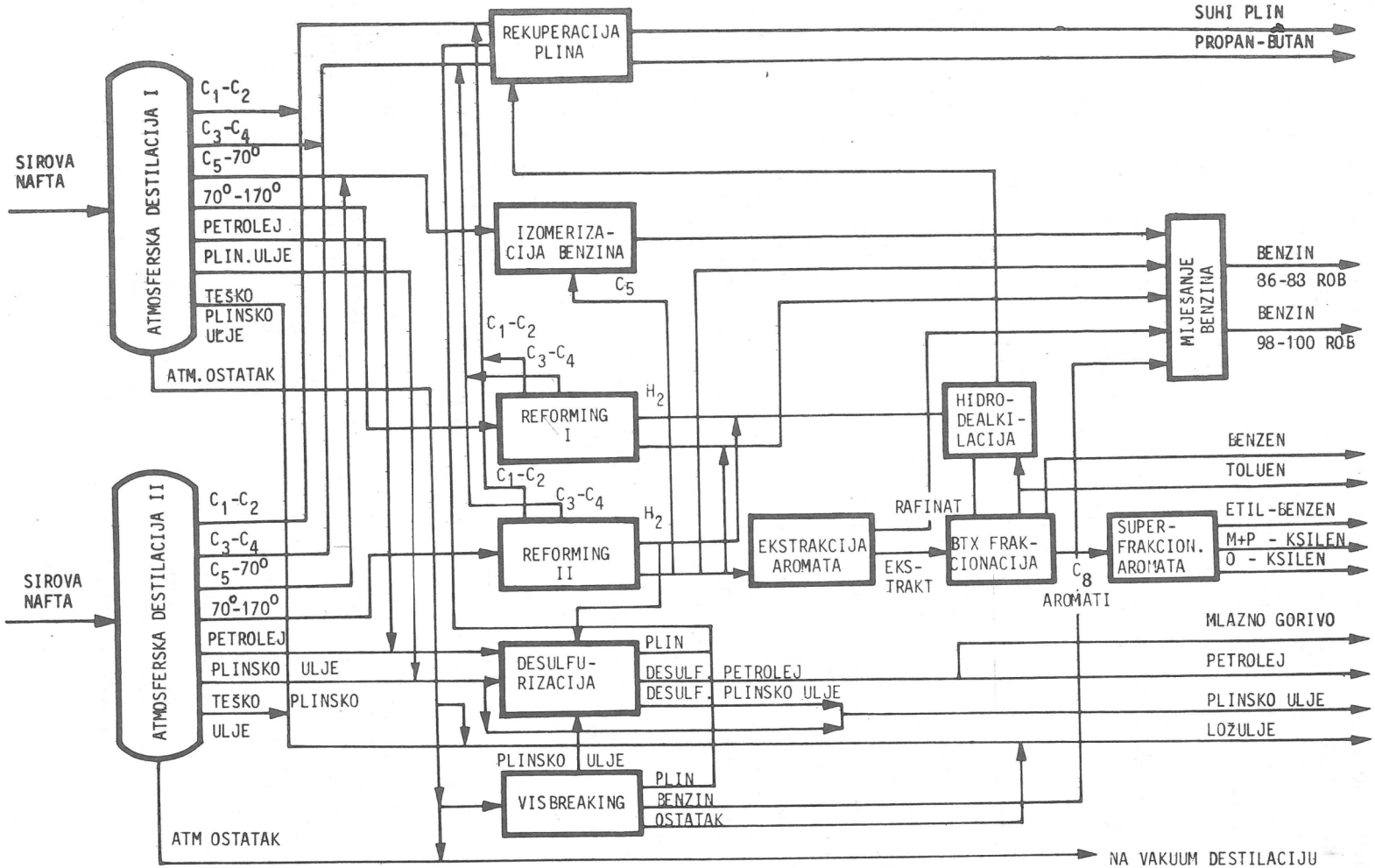
U slučajevima kada se žele odjeliti suhi rafinerijski plinovi (sastoje se od vodika, etana i metana) od plinova koji čine ukapljeni plin (propan, butan i teži ugljikovodici), upotrebljava se destilacija pod tlakom. Stlačeni ugljikovodici propan i butan (vrelište im je pri normalnom tlaku na 228.5 K i 272.5 K, pri tlaku od 1-2 MPa i pri temperaturi okoline prelaze u tekuće agregatno stanje, pa ih je moguće destilacijom pod tlakom odijeliti od ostalih plinova s više od četiri ugljikova atoma u molekuli.

Da bi se dobili čisti plinovi potrebno je pri procesu destilacije pod tlakom upotrebiti apsorbciono sredstvo. Obično je to petrolej koji upija sve plinove osim vodika, metana i etana, koji izlaze kao suhi rafinerijski plinovi. Petrolej koji je apsorbirao ugljikovodike s više od četiri atoma po molekuli uvodi se u kolonu za rektifikaciju i dalje se vrši normalna destilacija u kojoj se odvajaju propan i butan te frakcije težih ugljikovodika i petrolej, koji ponovo preuzima ulogu apsorbcionog sredstva. Dodatnim postupcima mogu se razdvojiti i ostali plinovi.

Postrojenja za preradu nafte u nekoj rafineriji ovise o vrsti nafte koja se prerađuje i o željenom asortimanu proizvoda. Rafinerije nafte mogu imati, pored postrojenja za pripremu, zagrijavanje i destilaciju nafte, i slijedeća postrojenja:

- za doradu tekućih plinova
- za aplikaciju
- za hidrodesulfurizaciju
- za izomerizaciju

TEHNOLOŠKA SHEMA PRERADE NAFTE



Sl. 4.

- za katalitičko reformiranje
- za Bender proces poznat pod nazivom "slađenje"
- za procese termičkog krekinga (termički kreking, viskreaking i koking)
- za procese katalitičkog krekinga (Fluid katalitički kreking i hidrokreking)
- za dobivanje maziva
- za dobivanje bitumena.

Na sl. 4. nalazi se tehnološka shema jedne kompleksnije rafinerije. Derivati nafte dobiveni destilacijom ili postupcima krekiranja nisu uvijek prikladni za upotrebu zbog toga što vrlo često sadrže spojeve sumpora, kisika i dušika. Ti spojevi uzrokuju koroziju i nestabilnost samog derivata. Da bi se ti spojevi uklonili, potrebno je derivate doraditi odnosno rafinirati.

Tekući plin dobiven destilacijom ili kreking procesom sadrži u sebi anorganske spojeve sumpora (sumporovodik) i organske sumpore (merkaptane), koji se mogu ukloniti doradom u meroksprocesu.

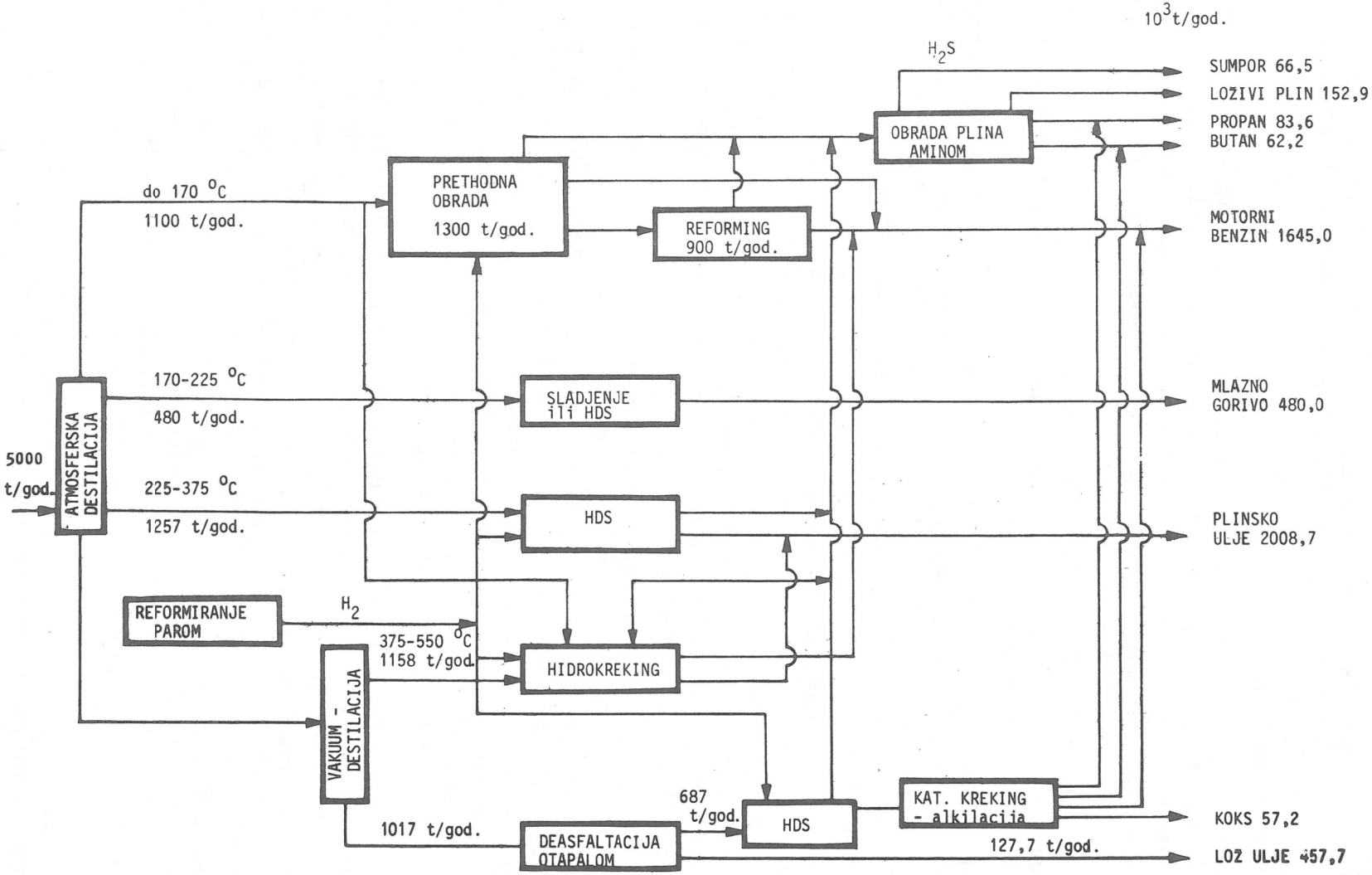
Alkilacija je sekundarni proces u preradi nafte, a služi za dobivanje kvalitetnog benzina. Može biti termički ili katalitički proces u kojem se dodaju alkilne grupe. Alhibiranjem se mogu dobiti ugljikovodici s vrlo visokim oktanskim brojevima. Proces alkilacije zasniva se na katalitičkoj reakciji izobutana s laganim olefinima u prvom redu s propanom i butanima radi dobivanja parafina s višim vrelištem.

Hidrodesulfurizacija je proces u kome se iz tekućih frakcija uklanjaju sumporni, dušikovi i kisikovi spojevi. To je najrasprostranjeniji proces u preradi nafte, jer se procesu hidrodesulfuracije podvrgavaju frakcije od lakog benzina do ostataka atmosferske destilacije. Tim postupkom se povećava kemijska stabilnost frakcija. U postupku se traže znatne količine vodika, a one se osiguravaju u samoj rafineriji kod postupka katalitičkog reformiranja.

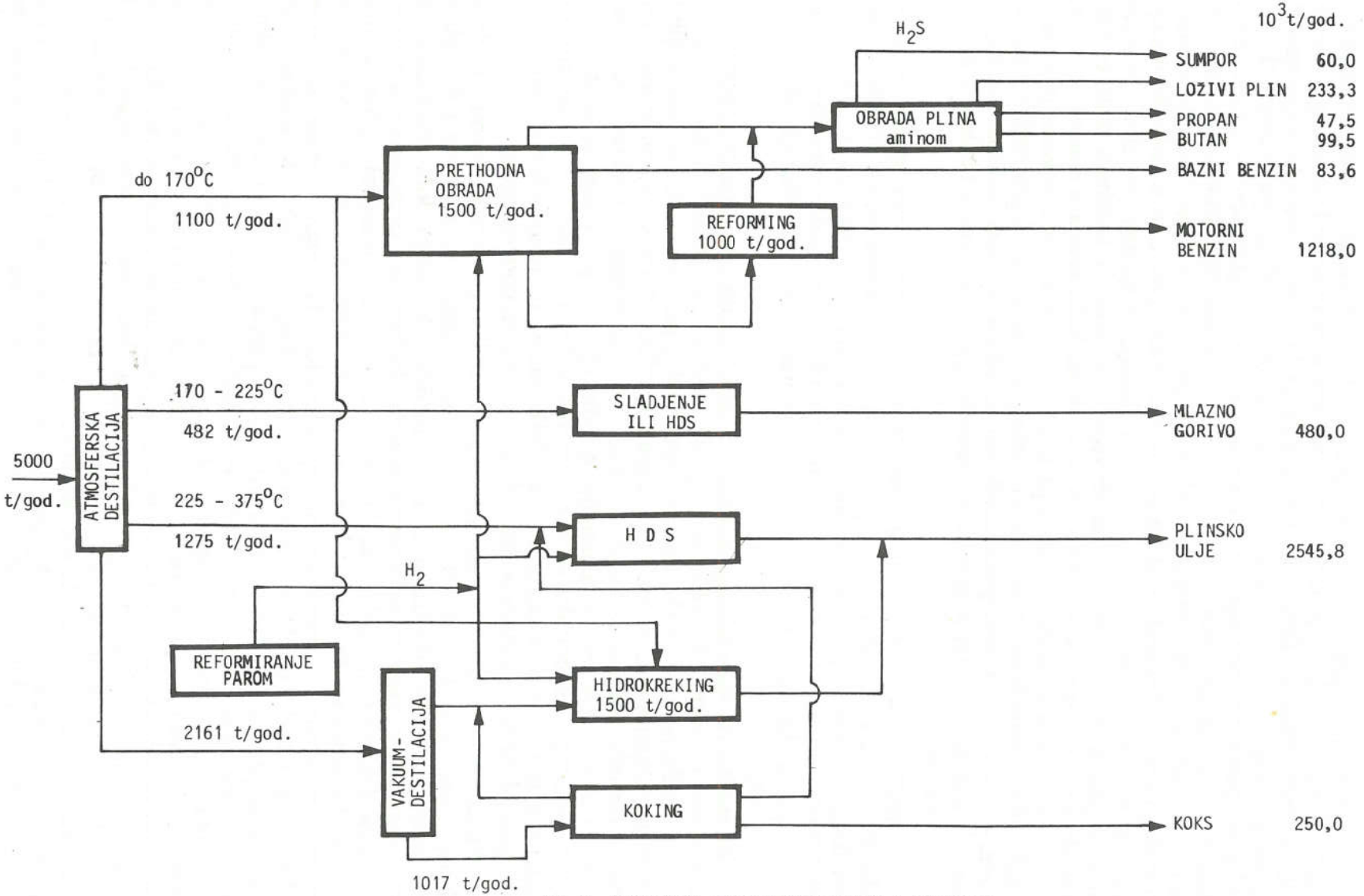
Izomerizacijom kao dodatnim procesom mogu se povećati atomske vrijednosti lakih benzina pretvaranjem normalnog pentana i heksana u razgranate alkane koji imaju bolje antidetonarsko svojstvo. Nakon uvođenja postupka alkiliranja proces izomerizacije gubi na značenju povećanja oktanskog broja, a sve više služi za pripremu izobutana kao sirovine u procesu alkiliranja. U tekućem rafinerijskom plinu obično ima previše butana s obzirom na količine propana i butana, a premalo izobutana. Izomerizacijom butana u izobutan omogućuje se potpuno iskorištavanje propana i butana za dobivanje benzina alkiliranjem.

Teški benzini dobiveni postupkom destilacije imaju nizak oktanski broj i sadrže sumporne i druge spojeve, te se zbog toga ne mogu mješati s lakim benzinima da bi se proizveo motorni benzin. Da bi se taj benzin mogao koristiti za motorni benzin potrebno ga je najprije očistiti u postrojenju za hidrodesulferizaciju, te nakon toga katalitički reformirati. Procesom katalitičke reformacije može se povećati sadržaj izoparafina i aromata. Kemijske redukcije kod katalitičkog reformiranja obavljaju se preko bimetalnog katalizatora (platina-renij) na alumosilikatu kao nosiocu. Kod upotrebe katalizatora uvijek se javlja problem taloženja koksa na katalizatoru što otežava sam proces i smanjuje životni vjek katalizatora. Zbog toga se traže tehničko-tehnološka rješenja za odstranjivanje koksa s katalizatora (regeneracija) u toku samog pogona.

Rafinacija benzina, petroleja i dizelskog goriva u kojoj se pretvara (odstranjuje) korozivni merkoptanski sumpor u nekorozivni disulfid naziva se bender proces odnosno "slađenje". To je katalitički proces koji kao katalizator koristi olovni sulfid (P_bS).



Sl. 5. Shematski prikaz rafinerije s krekingom



Sl. 6. Shematski prikaz rafinerije s kokingom

U posljednje vrijeme nagli razvoj prometa i petrokemijske industrije postavili su zahtjev pred rafinerije da proizvedu čim više svih vrsta benzina i dizelskog goriva, a što manje težih frakcija. Dobivanje lakših frakcija iz teških frakcija omogućeno je razvojem kreking - procesa. U kreking - procesima djelovanjem temperature, tlaka i katalizatora dolazi do cijepanja molekula s većim brojem ugljikovodika u molekule s manjim brojem ugljikovodika. Razvijena su dva osnovna tipa kreking-procesa i to termički i katalitički. Kod termičkog krekinga poznate su tri vrste: termički kreking, visbreaking i koking. Termički kreking je proces kod kojeg se teške frakcije destilacije zagrijavaju na 758 K i tlak od 1 do 30 bara i cijepaju se na ugljikovodike s manjim brojem ugljika u molekulama. Sama reakcija u termičkom krekingu ovisi o vrsti ulazne sirovine, o temperaturi i tlaku, te o vremenu zadržavanja u samom procesu. Obično je uz proces termičkog krekiranja potrebno izgraditi i već opisane procese u preradi nafte. Postupkom termičkog krekiranja ne mogu se dobiti velike količine benzina, jer se u teškim frakcijama destilacije ne nalaze dovoljne količine vodika, pa se tim postupkom dobivaju veće količine plinskih ulja, manje smole i koksa, a daleko najmanje benzina.

Termičko krekiranje (sl. 5) u kome je svrha pretvorba vrlo gustih ostataka destilacije u loživo ulje male viskoznosti naziva se lomljenje viskoznosti ili visbreaking. Visbreaking je ustvari blaži oblik termičkog krekiranja, a to znači da se provodi na nižim temperaturama i tlakovima, te uz relativno kratko trajanje vremena raspada. Tim postupkom dobiva se vrlo malo laganih derivata, jer se raspadanje ograničava samo na promjenu strukture ostatka.

Za razliku od visbreakinga, koking je u stvari produženo termičko krekiranje. Osnovna mu je namjena dobivanje laganih destilata iz ostataka atmosferske i volumske destilacije, te ostataka visbreakinga. Koking proces je jedan od najstarijih i jedan od najjeftinijih načina dobivanja laganih destilata. Petrolkoks koji je jedan od glavnih proizvoda kokinga i ako je dovoljno čist (bez sumpora i metala) može se koristiti za izradu elektroda u aluminijskoj industriji, a u protivnom se koristi kao gorivo u industriji. Tehnološka shema rafinerije u kojoj je ugrađen koking proces prikazana je na sl. 5. Ako se usporede tehnološke sheme rafinerija s krekingom (sl. 5) i kokingom (sl. 6) lako se može uočiti razlika u potrebnim postrojenjima.

Procesi katalitičkog krekinga znatno su se razvili u posljednje vrijeme i to zbog velikih potreba za motornim benzinom. Oni uz prisutnost katalizatora i kod nižih temperatura krekiraju teže frakcije. Kod katalitičkog krekinga dobivena benzinska frakcija zadovoljava zahtjeve suvremenih motora i kvalitetom i kvantitetom, a bolja je od frakcija dobivenih termičkim krekiranjem. Danas su u primjeni uglavnom dva postupka katalitičkog krekinga. Prvi se koristi katalizatorom tipa zeolita u fluidiziranom stanju i naziva se fluidni katalitički kreking, a drugi se, osim katalizatorom, koristi i vodikom, a naziva se hidrokreking. Sirovine za kreking procese su uglavnom plinska ulja dobivena različitim postupcima. Fluidni kreking vrlo lako i efikasno krekira parafinske i naftonske ugljikovodike, a zbog vrlo visoke aktivnosti katalizatora vrijeme međusobnog kontakta vrlo je kratko. Nedostatak mu je osjetljivost katalizatora na sadržaj metala i asfaltena. Proces hidrokrekinga je vrlo sličan procesu hidrodesulfurizacije. Hidrokreking ima mnogo oštrije uvjete, visok tlak i visoke temperature, a pored toga iziskuje mnogo više vodika. Sama tehnologija i proces vrlo su skupi i danas nisu u velikoj primjeni, ali s obzirom na vrlo veliku fleksibilnost procesa i sve slabiju kvalitetu nafte (više sumpora i više težih ugljikovodika) za očekivati je u budućnosti veću primjenu hidrokrekinga. S obzirom na vrlo veliku fleksibilnost hidrokreking može vrlo lako udovoljiti sezonskim oscilacijama tržišta potrošnje derivata, a posebno mlaznog i dizelskog goriva vrlo visoke kvalitete. Za proces hidrokrekinga veoma je karakteristično da je taloženje

koksa na katalizatoru veoma maleno, a to je zbog toga što se reakcija odvija uz prisustvo vodika i visokih tlakova.

Od maziva se zahtjeva: smanjenje trenja i habanja, zaštita od havarije, dobro brtvljenje, hlađenje, odvođenje nečistoća i smanjenje potrošnje goriva. Da bi se udovoljilo navedenim zahtjevima, potrebno je načinti vrlo kompleksnu preradu ostataka destilacije. Najčešće primjenjivana metoda za dobivanje baznih ulja (osnova za dobivanje maziva) je klasična ili solventna rafinerija, a rjeđe duboka hidrorafinacija. Solventna rafinacija (rafinacija otapalima) bazira se na razlici topljivosti pojedinih ugljikovodika u određenom otapalu. Baznim uljima dodaju se aditivi i sintetska ulja kojima se produžava vijek trajanja.

U procese solventne destilacije ubrajaju se i procesi deparafinacije i deasfaltacije. Kod procesa deparafinacije ekstrakt (parafin), a kod procesa deasfaltacije ekstrakt (asfalt) dobiva se u krutom stanju.

Bitumen je proizvod iz ostatka vakum-destilacije, a može biti i mješavina tog ostatka s asfaltom dobivenim procesom deasfaltacije i ekstraktom iz procesa ekstrakcije. Po kemijskom sastavu bitumen je smjesa različitih ugljikovodika s molekulama vodika, kisika, sumpora i dušika. Ako se žele postići tvrđi bitumeni, u tom slučaju bitumeni dobiveni kao ostatak vakuma - destilacije, ili dobiveni mješanjem, su sirovina za tvrde bitumene, a oni se dobivaju postupkom diskontinuirane oksidacije. Sama oksidacija provodi se upuhivanjem zraka pri čemu se mijenja kemijski sastav bitumena. Jedan dio kisika se veže s bitumenom, a najveći dio izlazi u obliku vodene pare i ugljičnog dioksida. Pri oksidaciji ulja sadržana u bitumenu prelaze u smole, a smole u asfaltene. O udjelu asfaltena ovisi kvaliteta cestograđevnog bitumena, a taj udio mora biti najmanje 10%.

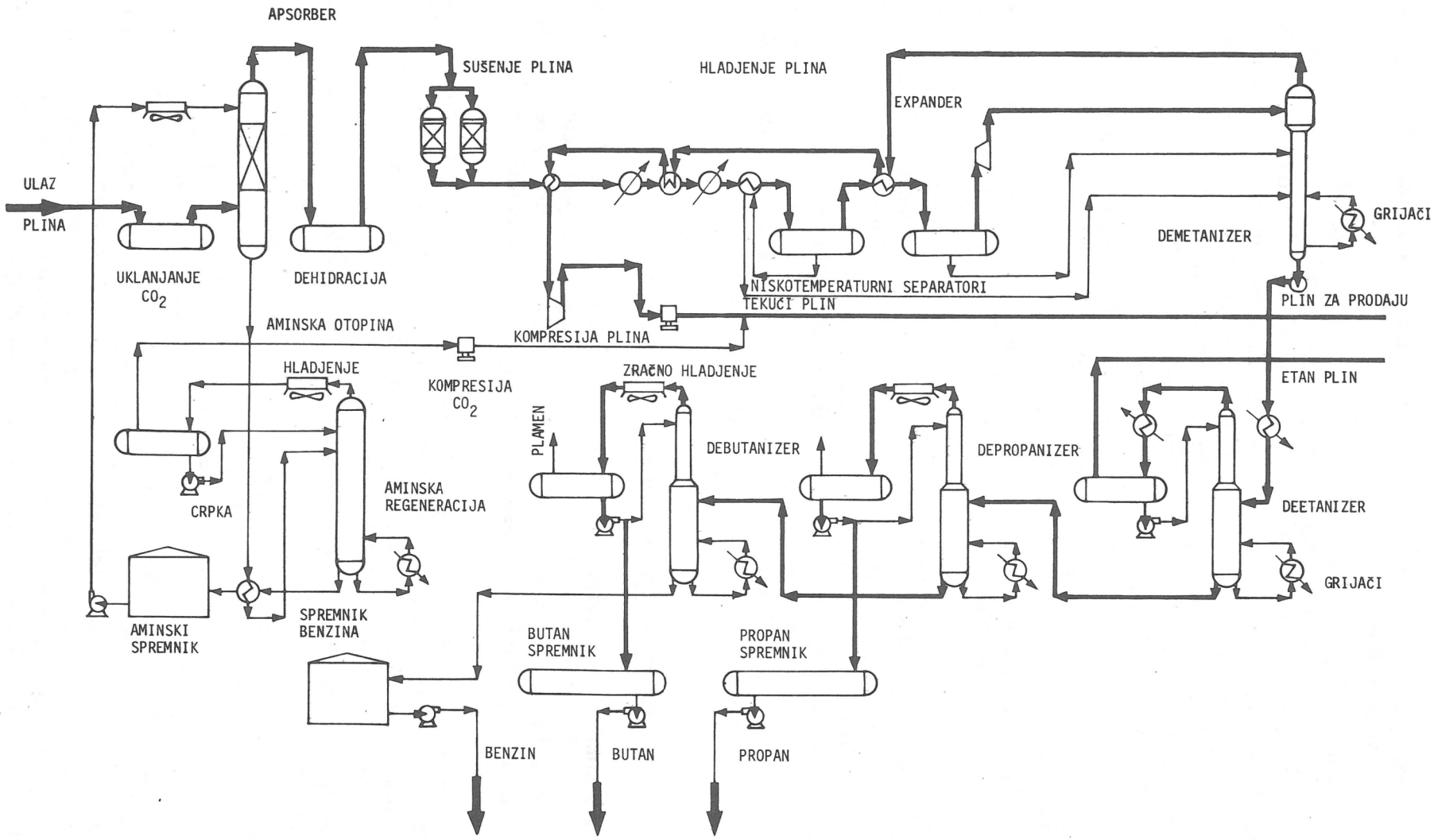
2.1.4. POSTUPAK PRERADE PLINA - DEGAZOLINAŽE

Degazolinažama se nazivaju postrojenja za izdvajanje tekućeg naftnog plina iz prirodnog plina. Uz proizvodnju i pripremu prirodnog plina za potrošnju, proizvodi se: etan, propan, butan, izobutan, pentan i paralni (primarni benzin). U preradi plina upotrebljavaju se tri postupka i to: apsorpcije, odsorpcije i metoda niskotemperaturne separacije.

Metodom apsorpcije dobivaju se veće količine butana, a nešto manje propana, dok se metodom niskotemperaturne separacije dobiva znatno više propana. Najčešća su postrojenja na principu apsorpcije i jednostavna shema jednog takvog postrojenja prikazana je na sl. 7 (postrojenje u Ivanić-Gradu).

Apsorpciono postrojenje (degazolinaža) je tehnološki sklop jedinica za: dehidraciju apsorpciju, hlađenje, demetanizaciju, frakcioniranje, rekompresiju, kompresiju, grijanje, deetanizaciju, depropanizaciju, debutanizaciju, te aminskog i pomoćnih postrojenja.

Postupak u degazolinaži teče prema shemi na sl. 7. Mokri plin pod tlakom većim od MPa i temperaturom 293-303 K uvodi se u dehidracionu jedinicu gdje se uklanja vodena para. Nakon toga plin dolazi u apsorber u kome se odvaja ugljični dioksid, kako bi etan bio bez ugljičnog dioksida. U apsorberu je otopina monoetanolamina, koja bogata ugljičnim dioksidom napušta dno apsorbera i odlazi u sekciju za regeneriranje u aminskom uređaju. Plin iz apsorbera ponovo prolazi dehidraciju i kroz proces sušenja, nakon čega dolazi u kolonu za odvajanje (prolazom kroz molekularno sito). Jedan dio plina prolazi kroz kompresor (uglavnom metan i



Sl. 7 Shema degazolinaže

nešto težih ugljikovodika) pri čemu lakši ugljikovodici se komprimiraju i šalju u plinsku mrežu, a jedan dio se odvaja kao tekući plin. Drugi dio plina odlazi u sekciju za hlađenje i demetanizaciju. Ulazni plin se hladi s početnog stanja 311 K na 239 K pri kojoj temperaturi se kondenziraju ugljikovodici i odvajaju od ostalih para. Hlađenje se provodi u dva koraka nakon čega se plin uvodi u ekspander u kome plin dolazi na niži tlak. Pored plina iz ekspandera u demetanizator dolaze i drugi različito rashlađeni plinovi. Zadatak demetanizatora je da se iz plinova postigne čim veći iscrpak etana, a nakon toga propana, butana itd. Dno demetanizatora se grije da bi se pospješio proces razdvajanja plinova. S dna demetanizatora se crpkom izvlače plinovi i tjeraju frakcije za separaciju pojedinih plinova.

Uređaji za frakcionaciju proizvoda služe za odvajanje i postizavanje čistoće pojedinih ugljikovodika (plinova i primarnog benzina). Svaka frakcija sastoji se od glavnog postojenja (za deetanizaciju, depropanizaciju itd.), destilacije s pomoćnim uređajima od kojih su najvažniji: za zagrijavanje, za separaciju, za hlađenje i za skladištenje.

Tehnološki proces teče tako da ostatak demetanizacije ide u destilaciju deetanizacije, a ostatak te destilacije u depropanizaciju, a njen ostatak u debutanizaciju itd. Plin etan ide u za to izgrađenu plinsku mrežu, a ostali derivati koji su u tekućem stanju (hlađenjem i komprimiranjem) spremaju se u skladišta.

Nakon komprimiranja i hlađenja ostaje jedan dio plinova koji izgaraju na bakljama.

Pored navedenih postrojenja za dobivanje plinova za plinsku mrežu, te etana za industrije i tekućih plinova i primarnog benzina u degazolinažama postoji i jedno pomoćno postrojenje za regeneraciju aminske otopine. U ovom postrojenju se odvaja ugljični dioksid (CO_2) iz aminske otopine, koja se zatim regenerira prije ponovne cirkulacije. I u ovom postrojenju postoje pomoćni uređaji za: grijanje, hlađenje, separaciju, kompresiju i skladištenje.

2.2. PRETVORBA KEMIJSKE ENERGIJE U UNUTRAŠNJU TERMIČKU ENERGIJU

Kemijska energija sadržana u biomasi i fosilnim gorivima najčešće se pretvara u unutrašnju termičku energiju. Ako nekom tijelu ili sistemu dovedemo energiju (na bilo koji način), prema zakonu o održanju energije dovedena energija ne može nestati, ona se nagomilava u tijelu ili sistemu. Tako nagomilanu energiju nazivamo unutrašnja termička energija, i ona je svojstvo termodinamičkog sistema. Unutrašnja termička energija sastoji se od kinetičke energije molekula koji se gibaju i potencijalne energije molekula kao posljedice privlačnih i odbojnih sila koje djeluju među njima.

Proces pretvorbe kemijske u unutrašnju energiju naziva se izgaranjem. Ako se unutrašnja toplinska energija neposredno upotrebljava: za grijanje prostorija, kuhanje, pripremu tople vode ili za tehnološke svrhe (kad su potrebne visoke temperature), u tom slučaju su nosioci topline plinovi izgaranja. Unutrašnja toplina plinova izgaranja može se pretvoriti i u druge oblike energije (npr. u mehaničku preko plinskih turbina) ili se može predati prijelazom topline drugim medijima. Taj drugi medij je najčešće voda odnosno vodena para, koja je prijelazom topline s plinova izgaranja povećala svoju unutrašnju energiju. Vodenom parom ili vodom najčešće se energija koristi za tehnološke svrhe ili za grijanje prostorija. Unutrašnja energija vodene pare veoma često se pretvara u mehaničku energiju preko parnih turbina.

Postrojenja i uređaji za neposrednu upotrebu unutrašnje energije nazivamo ložištima.

2.2.1. IZGARANJE

2.2.1.1. Općenito o izgaranju

Izgaranje je kemijska reakcija oksidacije gorivih sastojaka iz nekog goriva s kisikom iz zraka, uz istovremenu pojavu topline i svjetlosti. Izgaranje može biti i bez prisustva kisika iz zraka kad su u pitanju pogonska goriva za rakete i eksplozivni materijali, jer se već u njima nalazi kisik vezan kemijskim spojevima (eksplozivi) ili se krosti tekući kisik koji se nalazi u samoj raketi. Izgaranje je ustvari izmjena tvari, u kojem se kemijska energija sadržana u gorivu pretvara u toplinsku energiju.

Broj atoma koji sudjeluju u procesu izgaranja ostaje nepromijenjen, pa se prema tome izgaranje goriva odvija po zakonu održanja mase.

Energetska jednadžba izgaranja goriva temelji se na prvom zakonu termodinamike koji glasi: "U svakom sustavu tijela izdvojenom iz okolice energija je konstantna, ona ne iščezava, niti se stvara, jedino se pretvara iz jednog oblika u drugi". Prema tome pri izgaranju energija u gorivu, kojom se atomi održavaju u molekulama goriva, mijenja se, pri prijelazu molekula početne tvari (molekula goriva i zraka) u energiju molekula produkta izgaranja (molekule dimnih plinova i pepela). Iz navedenoga proizilazi, da se u procesu izgaranja istovremeno mijenja tvar i oblik energije. Kod procesa izgaranja oslobođena energija pri kemijskim procesima prenosi se na molekule kao njihova kinetička energija, pri čemu se povećava unutrašnja energija, a zbog toga i temperatura.

S obzirom na uvjete koji vladaju kod izgaranja (mogućnost osiguranja dovoljnih količina kisika, sastav i pripremljenost goriva, temperatura i vrijeme izgaranja), izgaranje može biti potpuno i nepotpuno.

Izgaranje goriva je potpuno kad ovi gorivi elementi, sadržani u gorivu, potpuno oksidiraju (izgore).

Potpuno izgaranje goriva je proces u kojem svi gorivi elementi, sadržani u gorivu, potpuno izgore.

Da bi gorivi elementi u gorivu potpuno izgorjeli, trebaju biti ispunjeni slijedeći uvjeti:

- u ložištu mora vladati dovoljno visoka temperatura koja omogućuje paljenje goriva (temperatura zapaljenja);
- miješanje goriva i zraka mora biti dobro, a omjer miješanja zadovoljavajuće velik;
- gorivo mora biti na odgovarajući način pripremljeno;
- za proces izgaranja mora biti na raspolaganju dovoljno vremena.

Nepotpuno izgaranje goriva je proces u kojem gorivi elementi, sadržani u gorivu, ne izgore u potpunosti, već samo djelomično. Praktično, to znači da dimni plinovi sadrže, uz produkte izgaranja, i sastojke goriva koji nisu stigli izgorjeti iz bilo kojeg razloga. Ti sastojci, koji odlaze kroz dimnjak sa dimnim plinovima, odnose sobom dio kemijske energije goriva koja se nije pretvorila u toplinsku energiju, što za

pogon predstavlja gubitak. Znači, nepotpuno izgaranje je nepotpuna pretvorba kemijske u unutrašnju energiju.

Goriva mogu biti različitog agregatnog stanja. Razlikuju se: kruta goriva (ugljen, lignit, drvo), tekuća goriva (nafta, naftni derivati) i plinovita goriva (prirodni plin, gradski plin itd.).

U gorivu se razlikuju ovi sastavni dijelovi: goriva tvar, voda i pepeo. Pri izgaranju supstancija izgori i prijeđe u plinovito agregatno stanje, voda ispari, pepeo ostaje u krutome agregatnom stanju, a ponekad se i rastali.

Goriva supstancija u širem smislu sastavljena je od ugljika (C), vodika (H), sumpora (S), kisika (O) i dušika (N). Ti kemijski elementi nalaze se u gorivoj tvari ili u elementarnom stanju ili u spojevima.

Ako se gorivo dovede u dodir s kisikom iz okolnog zraka, i pri tome je osigurana dovoljno visoka temperatura, nastupit će brza oksidacija gorive supstancije, dakle izgaranje goriva. Posebno važan činilac je dovoljno visoka temperatura, temperatura zapaljenja.

Temperatura zapaljenja nije neko jednoznačno fizikalno svojstvo goriva. Ona ovisi o brzini kemijske reakcije pri oksidaciji i o odvođenju topline oslobođene kemijskom reakcijom. Treba, naime, znati da oksidacija teče i pri temperaturi okoline, ali tada je tako spora da se oslobođene količine topline mogu odvesti uz obične okolnosti, pa se održava konstantna temperatura. Ako se toplina, kao posljedica oksidacije, oslobađa brže nego što se odvodi, temperatura će rasti, pa će se gorivo "zapaliti". Zbog toga, kad se temperatura umjetno povisi, npr. potpaljivanjem, brzina će kemijske reakcije naglo s temperaturom porasti, pa odvođenje topline neće držati korak s proizvedenom toplinom. Brzina kemijske reakcije raste eksponencijalno s temperaturom.

Ako se odvođenje topline oteža, temperatura zapaljenja znatno će se sniziti. U velikim hrpama ugljena odvođenje topline često je tako loše da je već i vanredno spora oksidacija dovoljna da se temperatura ugljena povisi i on zapali.

Prema tome je temperatura zapaljenja nekog goriva ona granična temperatura iznad koje je oslobađanje topline oksidacijom brže, a ispod nje je sporije od odvođenja topline. Zato je temperatura iste čestice goriva ovisna o prilikama s obzirom na odvođenje topline.

2.2.1.2. Stehiometrijski odnosi izgaranja

Svi kemijski procesi u prirodi, pa tako i proces izgaranja, odvija se u skladu sa zakonom o stalnim težinskim i volumnim omjerima, koji se jednim imenom nazivaju stehiometrijski zakoni.

Prema tim zakonima elementi koji tvore neki spoj spajaju se međusobno uvijek u određenim omjerima, bilo težinskim bilo volumnim, bez obzira na količine tvari koje u tom procesu sudjeluju. Prema tome, stehiometrijski odnosi, pri izgaranju goriva, mogu se izraziti u masenim ili volumnim jedinicama.

Za proračun procesa izgaranja kao osnov služi, kod krutih i tekućih goriva elementarna analiza, a kod plinovitih goriva molekularna analiza.

Proračun količina kod izgaranja služi za određivanje potrebnih količina kisika i zraka za izgaranje nekog goriva određenog sastava, te količina i sastav plinova izgaranja i pepela.

U nastavku se navode jednadžbe za izgaranje vodika, ugljika (nepotpuno i potpuno izgaranje), ugljičnog dioksida, sumpora, sumpornog dioksida i ugljikovodika formule C_mH_n.

Izgaranje se vrši prema jednadžbama za:

a) - vodik (H_2) $2H_2+O_2=2H_2O$ (9)

b) - ugljik (nepotpuno izgaranje) (C) $C+0.5\,O_2=CO$ (10)

c) - ugljik (potpuno izgaranje)(C) $C+O_2=CO_2$ (11)

d) - ugljični monoksid (CO) $CO+0.5\,O_2=CO_2$ (12)

e) - sumpor (S) $S+O_2=SO_2$ (13)

f) - sumporni dioksid (SO_2) $2\,S+3\,O_2=2\,SO_3$ (14)

g) - ugljikovodike (C_mH_n) $C_m+H_n(m+0.25n)\,O_2=mCO_2+0.5\,nH_2O$ (15)

Prema Avogadrovu zakonu svi plinovi, pri istom tlaku, istoj temperaturi i istom volumenu, imaju jednak broj molekula, pa se gornje jednadžbe mogu pisati:

a) - (H_2) 1 kmol H_2 + 0.5 kmol O_2 = 1 kmol H_2O + 240.0 MJ/kmol (16)

b) - (C) 1 kmol C + 0.5 kmol O_2 = 1 kmol CO + 123.8 MJ/kmol (17)

c) - (C) 1 kmol C + 1 kmol O_2 = 1 kmol CO_2 + 407.0 MJ/kmol (18)

d) - (CO) 1 kmol CO + 0.5 kmol O_2 = 1 kmol CO_2 + 238.2 MJ/kmol (19)

e) - (S) 1 kmol S + 1 kmol O_2 = 1 kmol SO_2 + 297.0 MJ/kmol (20)

f) - (SO_2) 1 kmol S + 1.5 kmol O_2 = 1 kmol SO_3 + 398 MJ/kmol (21)

g) - (C_mH_n) 1 kmol C_mH_n + (m + 0.25 n) Kmol O_2 =
= m kmol CO_2 + 0.5 n kmol H_2O + toplina (Q) (22)

Kod procesa izgaranja oslobađa se toplina, pa u gornjim jednadžbama navedeni iznosi predstavljaju donju toplinsku vrijednost (donja ogrjevna moć).

Budući da 1 kmol svakog plina na istom tlaku i istoj temperaturi zauzima jednak volumen od 22.4 m^3, to se gornje jednadžbe mogu pisati i u slijedećem obliku:

a) - (H_2) 1 m^3H_2 + 0.5 m^3O_2 = 1 m^3H_2O + 10.7 MJ/m^3 (23)

b) - (C) 1 m^3C + 0.5 m^3O_2 = 1 m^3CO + 5.5 MJ/m^3 (24)

c) - (C) 1 m^3C + 1 m^3O_2 = 1 m^3CO_2 + 18.2 MJ/m^3 (25)

d) - (CO) 1 m^3CO + 0.5 m^3O_2 = 1 m^3CO_2 + 12.6 MJ/m^3 (26)

e) - (S) 1 m^3S + 1 m^3O_2 = 1 m^3SO_2 + 13.3 MJ/m^3 (27)

f) - (SO_2) 1 m^3S + 1.5 m^3O_2 = 1 m^3SO_2 = 17.5 MJ/m^3 (28)

g) - (C_mH_n) 1 $m^3C_mH_n$ + (m + 0.25) m^3O_2 = m m^3 CO_2 + n m^3H_2O + toplina (Q) (29)

Uvedu li se mase za 1 kmol promatranih tvari koje izgaraju, mogu se dobiti potrebne količine kisika u kg za izgaranje 1 kg tvari koja izgara, pa slijedi:

a) - (H_2) 1 kg H_2 + 8 kg O_2 = 9 kg H_2O + 120.0 MJ/kg (30)

b) - (C) 1 kg C + 1.33 kg O_2 = 2.33 kg CO + 10.3 MJ/kg (31)

c) - (C) 1 kg C + 2.66 kg O_2 = 3.66 kg CO_2 + 34.0 MJ/kg (32)

d) - (CO) 1 kg CO + 0.57 kg O_2 = 1.57 kg CO_2 + 10.1 MJ/kg (33)

e) - (S) 1 kg S + 1 kg O_2 = 2 kg SO_2 + 9.3 MJ/kg (34)

f) - (SO_2) 1 kg S + 1.5 kg O_2 = 2.5 kg SO_3 + 12.5 MJ/kg (35)

g) - (C_mH_n) 1 kg C_mH_n + 4 kg O_2 = 2.75 kg CO_2 + 2.25 kg H_2O + toplina (Q_2) (36)

Donja toplinska vrijednost za neke najpoznatije ugljikovodike iznosi:

Ugljikovodik	Formula $C_m H_n$	MJ/kmol (Q)	MJ/m^3 (Q_1)	MJ/Kg (Q_2)	Gustoća kg/m^3
Metan	CH_4	804.2	35.9	50.1	0.7168
Eten	C_2H_4	1332.8	59.5	47.2	1.2604
Etan	C_2H_6	1444.8	64.5	47.5	1.3560
Propen	C_3H_6	1966.7	87.8	45.8	1.9170
Propan	C_3H_8	2083.2	93.0	46.4	2.0043
Buten	C_4H_8	2589.4	115.6	45.2	2.5575
Butan	C_4H_{10}	2773.1	123.8	45.8	2.7030
Izo-butan	C_4H_{10}	2728.3	121.8	45.7	2.6652

Budući da se znaju odnosi između kmol i m^3, te između m^3 i kg neke tvari moguće je naći odnose toplina koje nastaju izgaranjem 1 kmol, 1 kg i 1 m^3, a ti odnosi su:

$$Q_1 = Q/22.4 \tag{37}$$

$$Q_2 = \frac{\frac{Q}{1}}{\rho_o} = \frac{Q}{22.4 \times \rho_o} \tag{38}$$

gdje je ρ_o gustoća tvari (kg/m^3).

U procesima izgaranja za dobivanje topline dolaze u obzir mnogo više plinske smjese nego pojedini plinovi. Najčešća i najvažnija plinska smjesa je zrak, zatim se pojavljuju smjese zraka i gorivih plinova, te smjese gorivih plinova nastalih prilikom izgaranja. Sam zrak je smjesa od više plinova, a najveći udio u toj smjesi čine dušik i kisik. Sastavi gorivih plinskih smjesa i plinskih smjesa nastalih pri izgaranju mogu biti vrlo različiti. Sastavi smjesa ovisni su u prvom redu o sastavu goriva, a zatim o uvjetima pod kojima dotično gorivo izgara (potpuno ili nepotpuno izgaranje).

Kao što se pojedini plinovi pod izvjesnim uvjetima mogu smatrati idealnim plinovima, tako se mogu smatrati i smjese tih plinova, pa se i na njih mogu primijeniti isti zakoni kao za plinove.

Maseni i volumni udjeli mogu se izraziti omjerom između mase odnosno volumena pojedinog plina i ukupne mase odnosno ukupnog volumena plinske smjese.

Pri istoj temperaturi parcijalni tlak pojedinog plina u plinskoj smjesi jednak je umnošku volumenskog udjela promatranog plina i ukupnog tlaka plinske smjese. Iz navedenog proizlazi da je zbroj parcijalnih tlakova pojedinih plinova smjese jednak ukupnom tlaku smjese (Deltonov zakon).

Plinska konstanta smjese plinova glasi:

$$R_s = \Sigma g_n R_n \tag{39}$$

gdje je: g - maseni udio plina n
R - plinska konstanta plina n.

Kod proračuna izgaranja krutih i tekućih goriva potrebno je poznavati sastav goriva na temelju elementarne analize, dakle sastav goriva po kemijskim elementima

ne vodeći računa o njihovim kemijskim spojevima. Za kruta i tekuća goriva obično se daju podaci o masenom udjelu pojedinog elementa u gorivu, a označavaju se malim slovima: c - maseni udio ugljika, h vodika, s sumpora, o kisika, n dušika, w vode (vlage) i a pepela, pa mora biti:

$$c+h+s+o+n+w+a = 1. \tag{40}$$

2.2.1.3. Određivanje potrebnih količina kisika i zraka kod izgaranja

Kisik, neophodan za izgaranje goriva, u normalnim uvjetima dobiva se iz zraka. Zrak je uglavnom smjesa dušika i kisika, te u znatno manjim količinama drugih plinova. Smatra se i u proračunima se uzima da je volumni udio kisika u zraku 21%.

Znajući masene udjele pojedinih sastojaka goriva, moguće je za svaki sastojak odrediti količinu u kmol-ima po kg goriva. Koristeći jednadžbe izgaranja za pojedine sastojke, mogu se odrediti minimalno potrebne količine kisika potrebnog za potpuno izgaranje. Međutim, kad u gorivu ima kisika, potrebno je za njegov iznos umanjiti potrebnu količinu kisika.

Poznavajući količinu elementa kmol po kg goriva ($C_m = c/12$, $h_m = h/4$ itd.) moguće je odrediti potrebnu količinu kisika u kmol-ima po kg goriva za svaki sastojak. Formula za izračunavanje minimalno potrebne količine kisika glasi:

$$o_{min} = c/12 + h/4 + s/32 - o/32 \text{ kmol } O_2/\text{kg goriva} \tag{41}$$

dok formula za izračunavanje teoretske minimalno potrebne količine zraka glasi

$$l_{min} = o_{min}/0.21 \text{ kmol zraka/kg goriva} \tag{42}$$

jer je 0.21 molni udio kisika u zraku.

Jednadžba za izračunavanje minimalno potrebne količine kisika za izgaranje krutih i tekućih goriva glasi:

$$o_{min} = 1.867\,c + 5.6\,h + 0.7\,s - 0.7\,o \text{ m}^3/\text{kg goriva} \tag{43}$$

a za izgaranje plinskih goriva

$$o_{min} = 0.5\,(co+h_2) + 1.5\,h_2s + \Sigma\,(m+n/4)\,c_m h_n - o_2 \text{ m}^3/\text{m}^3 \text{ goriva.} \tag{44}$$

U jednadžbi za izgaranje krutih i tekućih goriva c, h, s i o imaju masene vrijednosti, a u jednadžbi za izgaranje plinovitih goriva co, h_2, h_2s, $c_m h_n$ i o_2 imaju volumne vrijednosti.

Teoretska količina zraka potrebna za izgaranje goriva dobiva se tako da se potrebne količine kisika pomnože faktorom 4.762 (1/0.21).

Iz navedenih jednadžbi je vidljivo da je stehiometrijska (teoretska) količina zraka (l_{min}) neophodna za izgaranje, jednaka zbroju potrebnih količina zraka za izgaranje pojedinih gorivih komponenata u gorivu.

Stvarna pak potrebna količina zraka za izgaranje goriva, veća je od teoretske, i potrebna je zbog toga da bi se proces izgaranja mogao pravilno odvijati u realnim uvjetima pogona. Uzimajući u obzir nužnost da svaka čestica goriva dođe u dodir sa slobodnom česticom kisika iz zraka, mora se osigurati odgovarajući višak (pretičak) zraka. Potrebna količina zraka određuje se izrazom:

$$l = \lambda l_{min} \quad (45)$$

gdje su:
- l - stvarno potrebna količina zraka
- l_{min} - teoretski potrebna količina zraka
- λ - koeficijent pretička zraka

Najvažniji faktori koji utječu na vrijednost koeficijenta pretička zraka ($\lambda > 1$) su vrsta goriva i njegova priprema, udio hlapljivih dijelova i pepela, osobine sagorivih tvari, temperatura paljenja i izgaranja, temperatura zraka na ulazu u ložište i tip ložišta i tlak u ložištu, recirkulacija dimnih plinova, te broj i tip gorionika.

Stvarni koeficijent pretička (viška) zraka se u pogonu određuje analizom dimnih plinova, te se može izračunati na temelju formula

$$\lambda = \frac{CO_{2\ max}}{CO_2} \quad ili \quad \lambda = \frac{0.21}{0.21-O_2} \quad (46)$$

Vrijednost $CO_{2\ max}$ predstavlja maksimalnu količinu ugljičnog dioksida koja se razvija kod potpunog izgaranja nekog goriva, te je prema tome, karakteristična veličina za pojedinu vrstu goriva. Vrijednosti za CO_2 i O_2 odnose se na volumne vrijednosti u suhim dimnim plinovima, a određuju se analizom dimnih plinova.

Količina kisika koja se pojavljuje u plinovima izgaranja u stvari je višak kisika doveden sa zrakom u ložište.

Veličine pojedinih koeficijenata pretička zraka ovisne su o vrsti goriva, o načinu loženja i o količini goriva u ložištu.

2.2.1.4. Sastav i količina dimnih plinova izgaranja

U procesu izgaranja goriva razvija se toplina te se pri tome, u ovisnosti od kemijskog sastava goriva i uvjeta izgaranja, razvijaju dimni plinovi kao produkti izgaranja.

Dimni plinovi su smjesa produkata izgaranja, odnosno:

- ugljičnog dioksida (CO_2) koji nastaje potpunim izgaranjem ugljika (C),
- ugljičnog monoksida (CO) koji nastaje nepotpunim izgaranjem ugljika (C),
- sumpornog dioksida (SO_2) koji nastaje izgaranjem sumpora,
- sumpornog trioksida (SO_3) koji nastaje oksidacijom sumpornog dioksida,
- dušika (N_2) iz goriva i zraka koji se dovodi u ložište, dušik ne sudjeluje u procesu izgaranja, ali povećava ukupnu količinu dimnih plinova,
- kisika (O_2) preostalog u dimnim plinovima uslijed dovoda zraka u ložište iznad stehiometrijskih odnosa izgaranja,
- vodene pare (H_2O) koja nastaje isparavanjem vode sadržane u gorivu te izgaranjem vodika iz goriva.

Minimalna ili teoretska količina dimnih plinova je ona koja se dobije izgaranjem goriva pri stehiometrijskim odnosima izgaranja uz dovođenje minimalne količine zraka (l_{min}), odnosno pri pretičku zraka $\lambda = 1$.

Stvarna količina dimnih plinova je ona količina koja se dobije pri izgaranju goriva uz dovođenje stvarno potrebne količine zraka u realnim uvjetima, pri čemu je pretičak zraka $\lambda > 1$.

Zbrajanjem količine produkata izgaranja i iz stehiometrijskih odnosa, dobiva se jednadžba za izračunavanje minimalne količine dimnih plinova kod izgaranja krutih i tekućih goriva, a koja glasi:

$$v_{pl\ min} = 1.87C + 0.7\,s + 0.8\,n + 0.79\,l_{min} + 1.24\,(9\,h + w)\ m^3/kg \qquad (47)$$

Veličine c, s, n, h, w predstavljaju masene udjele pojedinih sudionika u krutom ili tekućem gorivu.

Prvi član u formuli predstavlja volumen CO_2, drugi SO_2, treći volumen dušika (koji ne izgara) iz goriva, dok četvrti član predstavlja volumen dušika iz zraka. Peti član u jednadžbi predstavlja ukupni volumen vodene pare nastale izgaranjem vodika i isparavanjem vlage iz goriva.

Dušik doveden zrakom ne sudjeluje u kemijskim reakcijama za vrijeme izgaranja, a budući da je volumni udio dušika u zraku 79% to je radi toga u četvrtom članu konstanta 0.79.

Kod izgaranja plinskog goriva obično se govori o količini dimnih plinova kod izgaranja m^3 goriva. Analognim postupkom može se odrediti minimalna količina dimnih plinova koji nastaju izgaranjem plinovitih goriva. Jednadžba glasi:

$$v_{pl\ min} = co + h_2 + h_2s + (m + n/2)\,c_m h_n + co_2 + n_2 + 0.79\,l_{min}\ m^3/m^3 \text{ goriva}. \qquad (48)$$

Veličine co, h_2, h_2s, $c_m h_n$, co_2 i n_2 predstavljaju volumne udjele pojedinih sastojaka u plinovitom gorivu.

Stvarna količina dimnih plinova v_{pl} veća je od minimalne količine $v_{pl\ min}$ za količinu pretička zraka koji se u realnim uvjetima dovodi gorivu pri procesu izgaranja, pa glasi:

$$v_{pl} = v_{pl\ min} + (\lambda - 1)l_{min}\ . \qquad (49)$$

U nastavku se navode prosječne minimalne količine zraka, minimalne količine dimnih plinova i maksimalne vrijednosti ugljičnog dioksida za neke vrste goriva.

Goriva kruta i tekuća	l_{min} m^3/kg	$v_{pl\ min}$ m^3/kg	$CO_{2\ max}$ %
Drvo	1.9-4.5	2.9-5.2	20.5
Lignit	2.4-4.1	2.3-4.8	19.5-18.6
Mrki ugljen	3.5-4.1	4.3-4.8	19.2-18.2
Kameni ugljen	5.6-8.6	6.1-8.8	18.6-18.0
Koks	7.2-7.8	7.0-8.1	20.5-20.7
Lož ulja	10.1-10.5	10.6-10.9	15.5-15.9
Plinovita	m^3/m^3	m^3/m^3	%
Zemni plin (suhi)	9.0	9.4	12.5
Gradski plin	3.9	4.6	12.1
Metan	9.5	10.5	-
Etan	16.7	18.2	-
Propan	23.8	25.8	13.8
Butan	30.9	33.4	14.1

2.2.1.5. Ložišta i temperature izgaranja, prvi i drugi glavni stavak termodinamike

U ložištu se može govoriti o dvije temperature i to: teoretskoj i stvarnoj temperaturi. Razlike između teoretske i stvarne temperature ovise uglavnom o konstrukciji ložišta i ložišnog prostora.

Ako bi se izgaranje odvijalo u sistemu toplinski izoliranom od okoline, u tom slučaju bi plinovi izgaranja dostigli vrlo visoku temperaturu koja se naziva teoretska temperatura izgaranja (T_t). Prema tome, teoretska temperatura izgaranja je temperatura koja bi se dobila kada bi se cjelokupna toplina, oslobođena kod izgaranja, iskoristila za zagrijavanje dimnih plinova.

Stvarna temperatura u ložištu niža je od teoretske temperature zbog toga što se jedan dio oslobođene topline iz goriva predaje okolnom mediju uslijed postojanja razlika temperature.

Da bi se mogle razumjeti pojave koje nastaju u ložištu vezane za promjene temperatura potrebno je nešto više kazati o primjeni već citiranog prvog glavnog stavka, te drugog glavnog stavka termodinamike.

Prvi glavni stavak termodinamike kaže da se toplina i mehanički rad mogu pretvarati jedan u drugi. Ali koliki se dio topline može pretvoriti u rad, o tome prvi glavni stavak termodinamike ništa ne kaže.

Carnot je prvi spoznao da je za pretvaranje topline u mehanički rad potreban pad temperature, i da se toplina može pretvoriti u rad samo ako postoji prijelaz topline, a za to su potrebna dva spremnika topline različitih temperatura. U prirodi spremnika više temperature nema, jer okolina ima podjednaku temperaturu s medijem, a on bi se mogao načiniti umjetnim putem za što je potrebno utrošiti mehanički rad.

Drugi glavni stavak termodinamike može se karakterizirati slijedećim postavkama:

- Toplina sama od sebe prelazi samo s tijela više temperature na tijelo niže temperature,
- Toplina prelazi s tijela niže temperature na tijelo više temperature samo uz naročito djelovanje izvana, tj. samo uz trošenje vanjskog rada,
- Nije moguće trajno uzimati toplinu iz jednog spremnika i pretvarati je u mehanički rad.

Primjena i poznavanje značenja prvog i drugog glavnog stavka termodinamike traže poznavanje pojmova: mehanički rad, povratljivi i nepovratljivi procesi, unutrašnja energija i toplina, adijabatski sistem, otvoreni i zatvoreni sistem, kružni proces, entalpija, entropija, eksergija, energija i anergija. Detaljnije značenje ovih pojmova bit će obrađeno u poglavlju o pretvorbi unutrašnje termičke u mehaničku energiju. Za sada se samo navodi, da se nagomilana energija u nekom sistemu sastoji od potencijalne, kinetičke i unutrašnje energije i da one imaju svojstva veličine stanja. Međutim, energije koje za vrijeme nekog procesa prelaze granice sistema nisu veličine stanja, a dijele se na mehaničku i toplinsku energiju.

Mehanička i toplinska energija su dvije fizikalno različite pojave, kojima se energija prenosi izvan granica sistema. Energetskom bilancom u termodinamičkom sistemu obuhvaćene su promjene oblika energije i količine energije koje prelaze granicu sistema.

2.2.1.6. Fizikalni uvjeti i dinamika izgaranja

Goriva je potrebno pripremiti za izgaranje, dovesti ih do temperature zapaljenja, te uz dovođenje kisika iz zraka, izvršiti njihovo izgaranje. Kod pripreme goriva potrebno je povećati površinu goriva koja će doći u dodir sa zrakom, a što se obično postiže raspršivanjem.

Izgaranje goriva vrši se u određenom, prema vrsti goriva, konstruiranom i prilagođenom prostoru koji se naziva ložište. Ložište je dakle, prostor u kojem se, izgaranjem goriva, oslobađa kemijska energija nagomilana u gorivu i pretvara u toplinsku energiju.

Konstruktivne izvedbe ložišta mogu biti različite, a njihovu izgradnju uvjetuju:

- vrsta goriva (kruta, tekuća i plinovita),
- potrebno toplinsko opterećenje,
- način gradnje izmjenjivača topline.

Da bi rad pri loženju bio što bolji, a ekonomičnost postrojenja što veća, konstrukcija ložišnog prostora mora zadovoljiti osnovne uvjete:

- da izgaranje goriva bude potpuno i pravilno,
- da je osiguran dovod potrebne količine zraka,
- da se lako može regulirati proces izgaranja,
- da se proces izgaranja odvija sa što manjim pretičkom zraka,
- da se lako može regulirati toplinsko opterećenje ložišta,
- da se priprema i izgaranje goriva ostvare sa što manje utroška pogonske energije za pokretanje strojeva u sklopu ložišta (pogon mlinova, pogon tlačnih i usisnih ventilatora, pogon pumpi za loživo ulje, pogon dodavača ugljena, pogon rešetki itd.),
- da se izvedba ložišta ostvari sa što manjim dimenzijama, sa što manje utroška materijala,
- da je konstrukcija ložišta sigurna i trajna te da su dijelovi ložišta pristupačni za održavanje i popravak,
- da je rukovanje loženjem što lakše,
- da je omogućeno lako reguliranje propuha,
- da je u ložištu osigurana dovoljno visoka temperatura, kako bi se proces izgaranja nesmetano i kontinuirano odvijao,
- da gorivo ima dovoljno vremena za potpuno izgaranje,
- da je odvod šljake i pepela što jednostavniji,
- da gubici topline iz ložišta budu što manji.

2.2.1.7. Izgaranje krutih goriva

S obzirom na način i mjesto izgaranja, izgaranje krutih goriva može biti na rešetki ili u prostoru.

Izgaranjem krutih goriva na rešetki, naziva se i slojno izgaranje, budući da se gorivo nalazi u sloju određene visine. Rešetki ima raznih konstrukcija, ovisno od vrste goriva i načina loženja. Posluživanje ložišta pri loženju krutim gorivima u sloju, obuhvaća tri najvažnije operacije:

- dovod goriva na rešetku, odnosno u ložište,

- raspodjelu goriva po rešetki,
- uklanjanje pepela i šljake.

U ovisnosti od stupnja mehanizacije ove tri operacije razlikuju se:

- rešetke za ručno loženje (kada se sve tri operacije izvode ručno),
- polumehanizirane rešetke (kada su samo jedna ili dvije operacije mehanizirane),
- mehanizirane rešetke (kada su sve tri operacije mehanizirane).

Pored toga, rešetke mogu biti pokretne i nepokretne.

U zavisnosti od položaja ugradnje, rešetke mogu biti ravne, kose, stepenaste, lančane itd.

Na rešetki se loži ugljen do određenih dimenzija zrna kako ne bi propadalo gorivo kroz rešetku i odlazilo sa šljakom i pepelom. Kod izgaranja goriva na rešetci svako gorivo prolazi kroz četiri etape:

- sušenje
- isplinjavanje
- rasplinjavanje i izgaranje gorivih plinova
- potpuno izgaranje ugljika.

Zrak koji omogućava odvijanje procesa izgaranja i potpuno izgaranje goriva dovodi se ispod rešetaka odakle prodire u slojeve goriva.

Nakon izgaranja krutih goriva (pored dima koji izlazi iz ložišta za vrijeme izgaranja i topline koja se predaje mediju) ostaje još pepeo i šljaka.

Prema današnjem stanju tehnike normalno se ne izvode s loženjem na rešetki kotlovi većeg učina od 100 t/h.

Pri izgaranju u prostoru, kruto gorivo se prethodno usitni na određenu finoću koja ovisi o karakteristikama, odnosno vrsti ugljena te se tako pripremljeno gorivo dovodi u ložišta pomoću struje zagrijanog zraka. Mješavina samljevena goriva i zraka, koja ulazi u ložište pali se u ložištu. Vrlo često se kod ugljena s malom toplinskom vrijednošću, provodi i recirkulacija dimnih plinova na način da se iz ložišta kotla jedan dio dimnih plinova vraća u mlinove, gdje svojom toplinom vrše sušenje goriva. Na taj način se suši ugljeni prah u mlinovima i postiže potrebna temperatura gorive mješavine.

Ugljen se melje u mlinovima različitih izvedbi, što najviše ovisi o karakteristikama korištenog ugljena.

Samljeveno gorivo, tj. ugljena prašina, ubacuje se u ložište pomoću gorionika, također različitih izvedbi.

Prednosti izgaranja goriva u prostoru, u odnosu na izgaranje na rešetki mogu se sumirati u slijedeće:

- Mogu se graditi ložišta velikih učina; iznad kapaciteta proizvodnje pare od 30 kg/s grade se većinom parni kotlovi s izgaranjem krutih goriva u prostoru, jer su izvedbe s velikim i teškim rešetkama vrlo neprikladne.
- U prostoru mogu izgarati goriva širokog raspona toplinske vrijednosti i sastava, kao i različitih karakteristika pepela i šljake.
- Postiže se visok stupanj korisnosti ložišta (otpada većim dijelom gubitak zbog propadanja goriva na rešetki, a ostali gubici su znatno smanjeni). Potreban je manji pretičak zraka, uslijed boljeg miješanja s gorivom, što opet povećava stupanj iskoristivosti kotla.

- Zrak se može zagrijavati na više temperature. Kod ložišta sa rešetkama dopušteno je, ovisno o materijalu rešetke, zagrijavati zrak na cca 120 °C za kameni ugljen, a najviše do 200 °C za mrki ugljen i lignit. Granica zagrijavanja zraka kod ložišta s izgaranjem u prostoru kreće se od 300 do 500 °C, što ovisi o kvaliteti materijala zagrijača zraka i kanala za dovod zraka, a također i o temperaturi paljenja goriva, tj. ugljene prašine.

Ako temperatura mješavine ugljene prašine i zraka u dovodnim kanalima dosegne temperaturu paljenja goriva, mješavina će se zapaliti. Zato je potrebno, ovisno o količini vlage u gorivu, podesiti temperaturu zagrijavanja zraka, kako bi temperatura mješavine bila dovoljno ispod temperature paljenja goriva.

Nedostaci izgaranja goriva u prostoru proizlaze iz:

- Velikog potroška pogonske energije za mljevenje ugljena u ugljenu prašinu i energije za pogon ventilatora koji dovode svježi zrak. Dovedeni zrak mora imati dovoljno visok tlak da bi se savladali otpori strujanja u zagrijaču zraka, dovodnim kanalima zraka, mlinovima te gorionicima.
- Velikog trošenja okretnih dijelova mlinova za mljevenje ugljena. Trošenje dijelova mlinova najviše ovisi o sastavu pepela i balastnih materijala u ugljenu.
- Neophodnost ugradnje filtera za dimne plinove radi uklanjanja čestica pepela i balastnih materija.
- Teže mogućnosti rada parnog kotla sa malim opterećenjem. Najčešće, parni kotlovi s izgaranjem goriva u prostoru ne mogu raditi sa manjim opterećenjem od 30-50 posto nominalnog učina.
- Opasnosti samozapaljenja ugljene prašine.

2.1.2.8. Izgaranje tekućeg goriva

Proces izgaranja tekućeg goriva vrši se uz pomoć gorionika čiji je zadatak stvaranje mješavine goriva i zraka u cilju omogućavanja potpunog izgaranja u pogonskim uvjetima.

Raspršivanje loživog ulja je pretvorba uljnog mlaza u fine kapljice ulja. Finoća raspršivanja zavisi od mnogih faktora kao:

- načina raspršivanja (raspršivanje tlakom samog ulja, raspršivanje zrakom ili vodenom parom i raspršivanje centrifugalnom silom),
- konstruktivnog rješenja i veličine sapnice,
- viskoziteta goriva,
- površinske napetosti kapljica loživog ulja.

Raspršivanje tekućih goriva vrši se na tri, u osnovi, različita načina:

- Strujanjem loživog ulja iz sapnica zbog razlike tlaka ulja prije i poslije sapnice. Takvim se strujanjem ostvaruju međusobno različite relativne brzine kapljica ulja i razlike relativnih brzina između čestica ulja i okolnog zraka, a time se, po teoriji raspršivanja, razbija mlaz ulja na kapljice različitog promjera.
- Djelovanjem stlačenog zraka ili vodene pare kao dodatnog sredstva (medija). Raspršivanje se ostvaruje zbog različitih brzina strujanja ulja i medija kojim se provodi raspršivanje.
- Centrifugalnom silom (rotacijski gorionici), kojom se postiže turbulentno strujanje ulja i ostvaruju međusobno različite brzine kapljica ulja.

Izgaranje tekućih goriva u stvari je izgaranje mješavine para tekućih goriva i kisika iz zraka. Kad bi brzina kretanja kapljice tekućeg goriva i brzina kretanja zraka bile iste, kapljica goriva bi se ulaskom u ložišni prostor odmah zapalila. Međutim, brzina kretanja kapljice goriva je veća od brzine zraka kod ulaska u ložišni prostor i postepeno se smanjuje i tek tada počinje paljenje, a kad se izjednače brzine kapljice i zraka tek tada dolazi do potpunog izgaranja. Put kapljice od ulaska u ložišni prostor do potpunog izgaranja naziva se dužinom plamena. Da bi se ostvarilo potpuno izgaranje, dužina plamena i kut raspršivanja moraju biti tako podešeni da svaka kapljica ispari prije nego udari u suprotni zid ložišnog prostora. Da bi se to ostvarilo neophodno je potrebno posvetiti veliku pažnju izboru gorionika, jer ih na tržištu ima veoma mnogo vrsta sa svojim prednostima i nedostacima.

2.2.1.9. Izgaranje plinovitih goriva

Bitna razlika između krutog, tekućeg i plinovitog goriva je u tome što se kruta i tekuća goriva, odnosno njihovi izgorivi sastavni dijelovi, moraju prethodno zagrijavati, ispliniti i raspliniti da bi se omogućilo miješanje sa zrakom i nakon toga izgaranje. Kod plinovitih goriva potrebno je samo miješanje sa zrakom, što bitno utječe na brzinu procesa izgaranja.

Izgaranje plinovitih goriva vrši se uz pomoć plinskih gorionika ili plamenika. Budući da plinovito gorivo ne treba raspršivati, jer ono prirodno ekspandira, to pojednostavljuje njegovu upotrebu, pa su plinski gorionici jednostavnijih konstrukcija.

Na kotlovskim postrojenjima, loženim plinskim gorivima, upotrebljavaju se općenito dvije vrste plinskih gorionika:

- atmosferski
- gorionici sa ventilatorom ili puhalom.

Način stvaranja gorive smjese plina i zraka može biti ostvaren na osnovu tri principa:

- difuzni princip izgaranja,
- kinetički princip izgaranja,
- difuzno-kinetički princip izgaranja.

Ukoliko se gorivi plin i zrak, potreban za izgaranje, dovode u ložište kotla odvojeno, goriva mješavina će se stvarati u samom ložištu, difuznim miješanjem gorivog plina i zraka, pa se takvo izgaranje naziva difuzno izgaranje. Brzina izgaranja ovisi o vremenu difuzije.

Ako se gorivi plin i zrak miješaju u gorioniku prije ulaska u ložište, tada u ložište ulazi gotova goriva mješavina. Brzina izgaranja ovisna je samo o kinetici kemijske reakcije izgaranja. Takvo izgaranje naziva se kinetičko izgaranje. Ono je mnogo brže od difuznog, pošto otpada vrijeme potrebno za stvaranje gorive mješavine.

Međutim, ako se jedan dio zraka, potrebnog za izgaranje plina, miješa sa gorivim plinom u gorioniku (kao kod kinetičkog principa izgaranja), a drugi dio zraka dovodi se u ložište difuzno, onda se takav princip izgaranja naziva difuzno-kinetičko izgaranje.

2.2.1.10. Prijelaz topline

Prijelaz topline s jednog mjesta na drugo može se ostvariti na tri načina vođenjem, konvekcijom i zračenjem. Prijelaz topline vođenjem i konvekcijom vezan je na materiju, dok je prijelaz topline zračenjem posljedica elektromagnetskog zračenja.

Pri vođenju toplina prelazi od jedne čestice na drugu koja leži u njenoj neposrednoj blizini, pri čemu je smjer prijelaza topline od čestice koja ima višu temperaturu ka čestici koja ima nižu temperaturu.

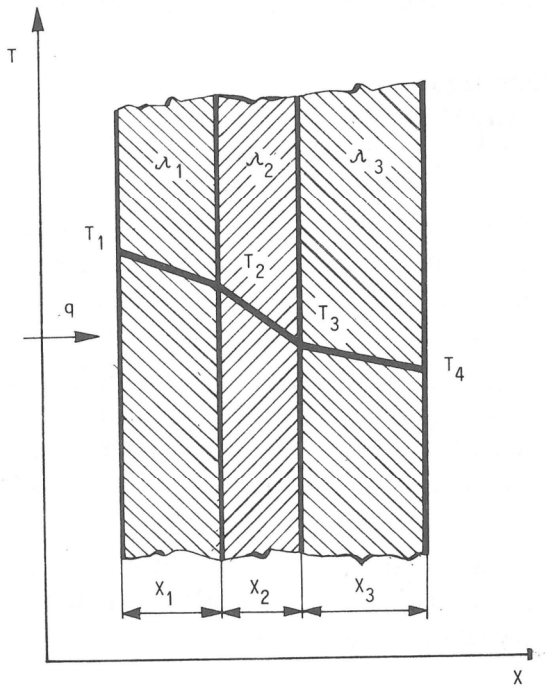
Konvekcija ili strujanje topline sastoji se u tome što tvar koja sadrži toplinu putuje s njom na drugo mjesto, gdje dio topline može predati drugom tijelu. Konvekcija topline u suštini je putovanje toplinske energije s česticama tvari na koju je toplina vezana u obliku unutrašnje energije.

Pri zračenju toplina prelazi s jednog tijela na drugo, a da kod toga ne sudjeluje tvar koja se nalazi između tih tijela. Na prvom tijelu, koje toplinu zrači, toplina se pretvara u drugi oblik energije, u elektromagnetske titraje. U tom obliku prolazi kroz prostor i pretvara se na drugom tijelu potpuno ili djelomično nanovo u toplinu.

Interesantno je pripomenuti da se rijetko kada pojedini načini prenošenja topline pojavljuju sami zasebno, gotovo redovito se sva tri načina zbivaju istovremeno.

Prolaz topline kroz ravne stijenke najlakše je prikazati analizom sl. 8. Ako se održavaju konstantne temperature T_1 do T_4, u tom slučaju kroz stjenke prolazi toplina

$$Q_1 = \lambda_1 \frac{T_1 - T_2}{x_1} At \ (J) \qquad (50)$$



Sl. 8. Provodjenje topline kroz ravnu stijenku

$$Q_2 = \lambda_2 \frac{T_2 - T_3}{x_2} \, At \quad (J) \tag{51}$$

$$Q_3 = \lambda_3 \frac{T_4 - T_3}{x_3} \, At \quad (J) \tag{52}$$

gdje su λ_1, λ_2, λ_3 koeficijenti vodljivosti u W/mK, x_1, x_2 i x_3 debljine stijenki u m, A površina stijenki u m^2 i t vrijeme u s. Pri razmatranju je pretpostavljena ista površina stijenki i da stijenke idealno dodiruju jedna drugu. Ako se sa q označi specifična toplina po jedinici površine i jedinici vremena dobiva se

$$q_1 = \lambda_1 \frac{T_1 - T_2}{x_1} \quad (W/m^2) \tag{53}$$

$$q_2 = \lambda_2 \frac{T_3 - T_2}{x_2} \quad (W/m^2) \tag{54}$$

$$q_3 = \lambda_3 \frac{T_4 - T_3}{x_3} \quad (W/m^2). \tag{55}$$

Ukupni specifični prolaz topline je:

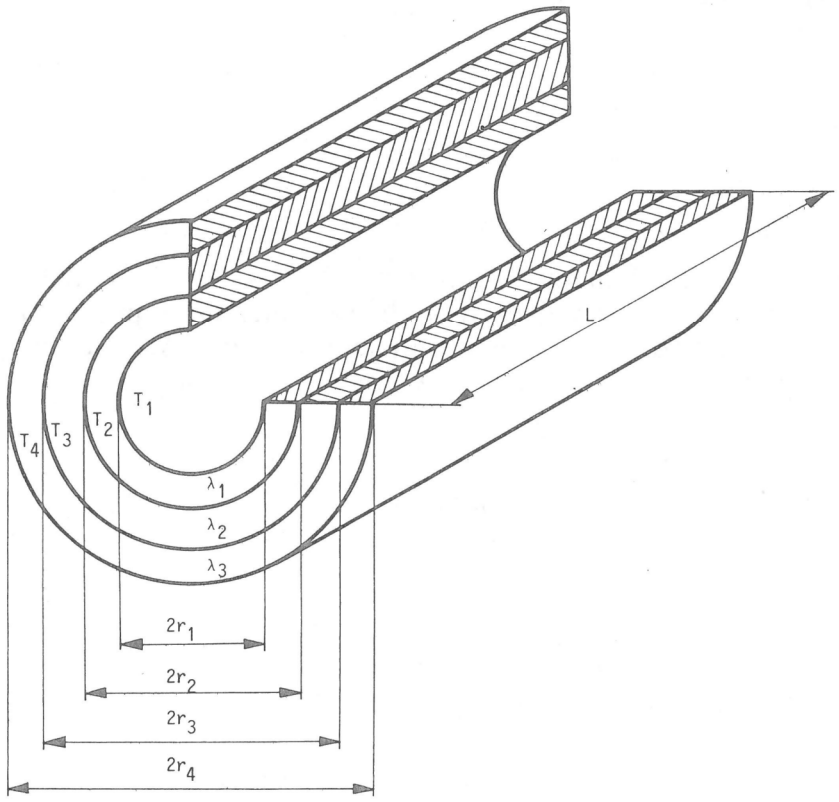
$$q = \frac{T_1 - T_4}{\frac{x_1}{\lambda_1} + \frac{x_2}{\lambda_2} + \frac{x_3}{\lambda_3}} \quad ili \quad q = \frac{T_1 - T_{n+1}}{\sum_1^n \frac{x_n}{\lambda_n}} . \tag{56}$$

Ako bi se više stijenki zamjenilo ekvivalentnom stijenkom u tom slučaju bi bilo:

$$q = \lambda_e \frac{T_1 - T_{n+1}}{x_e} . \tag{57}$$

Pretpostavi li se da je ekvivalentna stijenka zadržala debljinu više stijenki u tom slučaju je ekvivalentni koeficijent vodljivosti

$$\lambda_e = \frac{\sum_n x_n}{\sum_n \frac{x_n}{\lambda_n}} . \tag{58}$$



Sl. 9. Provodjenje topline kroz stijenku cijevi sastavljenu od više slojeva

Analognim postupkom određuje se provođenje topline kroz stijenke cijevi dužine L prema sl. 9, pa se za specifičnu toplinu po dužini cijevi ($q_L = Q/Lt$) koja prolazi kroz stijenke cijevi n slojeva dobiva

$$q_L = \frac{2\Pi(T_1 - T_{n+1})}{\sum_n \frac{1}{\lambda_n} \ln \frac{r_{n+1}}{r_n}} \qquad (59)$$

gdje su r_n polumjeri slojeva.

Prijelaz topline konvekcijom može se vršiti samo u tvarima kojih čestice mogu mijenjati mjesto, dakle kod tekućina i plinova. Prelaženje topline kod tekućina i plinova, koji nemaju u svim točkama jednaku temperaturu, vrši se ne samo vođenjem, nego i premještanjem pojedinih čestica. Kretanje čestica može ovisiti o unutrašnjim razlozima i onda je to prirodna cirkulacija, ili može biti uzrokovano vanjskim razlozima, što je prisilna cirkulacija. Ako kod tekućine ili plina u pokretu čestica promijeni svoje mjesto, ona ponese sa sobom i svoju toplinu, pa se radi o prenošenju topline. Ako sada toplija čestica dođe u doticaj s hladnom stijenkom, predaje dio topline stijenki.

Želi li se da prijelaz topline na stijenku bude besprekidan, potrebno je da nadolaze uvijek nove čestice plina ili tekućine, drugim riječima, potrebno je da tekućina ili plin stalno struji uz stijenku. Razumljivo je da prijelaz topline ovisi o količini čestica koje nadolaze na stijenku. Što je više čestica ili, a to je isto, što je veća brzina kojom struji plin ili tekućina uz stijenku i što su veća vrtloženja, to veći će biti prijelaz topline. Kod hrapavih je stijenki vrtloženje veće nego kod glatkih, pa će prijelaz topline ovisiti i o kakvoći stijenki. Osim toga prijelaz topline ovisi o fizikalnim svojstvima tekućina i plinova, te konačno o razlici temperatura između tekućine ili plina i površine stijenki. Prijelaz topline može se vršiti i u obrnutom smjeru, od vruće stijenke na hladniji plin ili tekućinu koja struji.

U tehničkim proračunima neobično je važno prenošenje topline od tekuće ili plinovite tvari na krutu tvar. Proces prenošenja topline odvija se istodobno vođenjem kroz granični sloj tekućine ili plina, te konvekcijom. Taj prijelaz topline osnova je djelovanja izmjenjivača topline, čija je suština dodir struje plinova, tekućina ili para sa stijenkama metalnih cijevi ili ploča.

Prijelaz topline konvekcijom ovisi o mnogim fizikalnim svojstvima plina, pare ili tekućine: o specifičnoj toplinskoj vodljivosti, specifičnoj toplini, gustoći, viskoznosti itd. U pravilu su ti parametri funkcija temperature, a neki od njih i tlaka.

Prijelaz topline računa se pomoću Newtonova zakona

$$q = \alpha\,(T_s - T_m) \quad (W/m^2) \tag{60}$$

gdje je α koeficijent prijelaza topline (W/m^2K), T_s temperatura stijenke, a T_m temperatura medija.

Da bi se proučila veza između koeficijenta prijelaza toplina (α) i koeficijenta vodljivosti topline (λ) potrebno je uvažiti da je prijelaz topline uz stijenku

$$q = -\lambda \cdot dT/dx \tag{61}$$

gdje je T temperatura uz stijenku, a x okomica na stijenku u mjestu promatranja.

Izjednačavanjem izraza za prijelaz specifične topline dobiva se

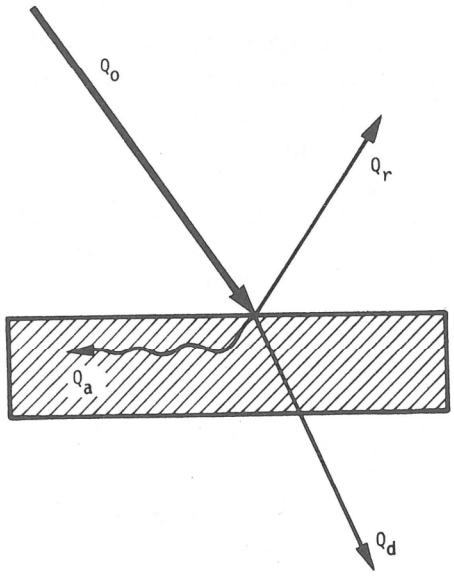
$$\alpha = -\lambda \frac{\frac{dT}{dx}}{T_s - T_m}. \tag{62}$$

Koeficijent α osim λ i o razlici temperatura T_s i T_m ovisi još i o temperaturnom gradijentu neposredno uz stijenku, koji je ovisan o obliku i rasporedu površina prijelaza topline, o dimenzijama, o brzini strujanja, o fizikalnim svojstvima tekućine ili plina, o specifičnoj toplini, o gustoći, o žilavosti itd. Zbog toga su znatne teškoće pri analitičkom određivanju već malo kompliciranijih slučajeva.

Za određivanje vrijednosti koeficijenta α postoje empiričke formule, koje vrijede za pojedine slučajeve, a te formule mogu se naći u tehničkim priručnicima.

Energija se prenosi zračenjem pomoću elektroenergetskih valova različitih valnih duljina. Zračenje je ovisno o karakteristikama tvari i o njezinoj temperaturi.

Dozračena energija na neko tijelo Q_o (sl. 10) u općem slučaju bit će djelomično apsorbirana (Q_a) djelomično reflektirana (Q_r), a dijelom propuštena (Q_d) kroz zračeno tijelo. Apsorbirani dio energije pretvara se u toplinu, dok će reflektiranu i propuštenu energiju apsorbirati tijela u okolini. Budući da se tijela nalaze u prostoru



Sl. 10. Raspodjela dozračene energije

slijedi, da svaka tvar (tijelo) kontinuirano zrači i istovremeno apsorbira energiju zračenja od tijela koja ga okružuju.

Promjena količine topline nagomilana u tijelu (tvari) ovisi o razlici emitirane i apsorbirane. Kad su temperature različite nastaju promjene u termičkoj ravnoteži u kojima tijela s višom temperaturom više zrače energiju.

Za dozračenu energiju Q_o može se postaviti

$$Q_o = Q_a + Q_r + Q_d \tag{63}$$

a dijeljenjem sa Q_o dobiva se

$$1 = a + r + d \tag{64}$$

gdje su: a koeficijent apsorpcije, r koeficijent refleksije, a d je koeficijent propusnosti.

Ako neko tijelo potpuno apsorbira dozračenu energiju (a=1), u tom slučaju govori se o potpuno crnom tijelu, a ako se sva dozračena energija reflektira (r=1) od nekog tijela, za takvo tijelo se kaže da je bijelo. Potpuno propusno tijelo bit će ono koje svu dozračenu energiju propušta (d=1). Potrebno je pripomenuti da u prirodi nema ni potpunog crnog, ni potpuno bijelog, a ni potpuno propusnog tijela.

Vrijednosti koeficijenata apsorpcije (s), refleksije (r) i propusnosti (α) ovise o svojstvima tvari, o njezinoj temperaturi i o duljini valova zračenja.

Tok zračenja po jedinici površine definiran je kao količina energije u sekundi u području duljine valova od 0-∞. Tok zračenja crnog tijela određen je Stefan-Boltzmannovim zakonom, koji se za praktičnu upotrebu može pisati u obliku

$$E_o = C_o(T/100)^4 \tag{65}$$

gdje je C_o = 5.667 W/m^2K^4 "konstanta zračenja apsolutno crnog tijela", a T temperatura u K.

Za bilo koje tijelo po analogiji bit će:

$$E_o = C(T/100)^4 \quad (66)$$

pri čemu je $C < C_o$ konstanta ovisna o svojstvima tijela.

Koeficijent emisije e određuje se kao omjer konstanti:

$$e = C/C_o \leq 1. \quad (67)$$

Za vrijednost toka zračenja za bilo koje tijelo može se pisati:

$$E = eC_o(I/100)^4. \quad (68)$$

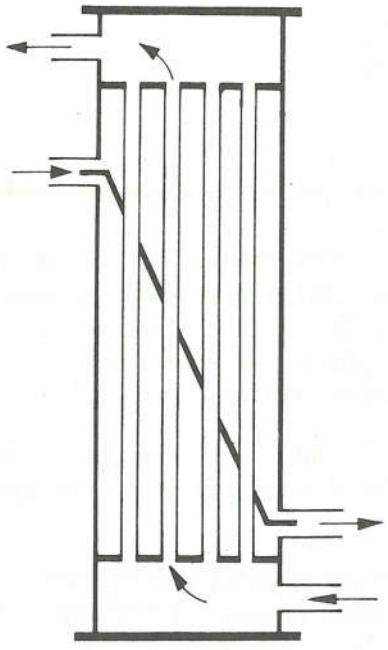
Vrijednost za koeficijent emisije (e) za pojedine tvari, ovisno o stanju površine i temperaturi, mogu se naći u tehničkim priručnicima i u literaturi koja obrađuje termodinamičke pojave.

2.2.1.11. Izmjenjivači topline

Izmjenjivači topline su aparati u kojima toplina prelazi s jednog medija na drugi. S obzirom na način rada razlikuju se: rekuperativni, regenerativni i izmjenjivači s miješanjem medija.

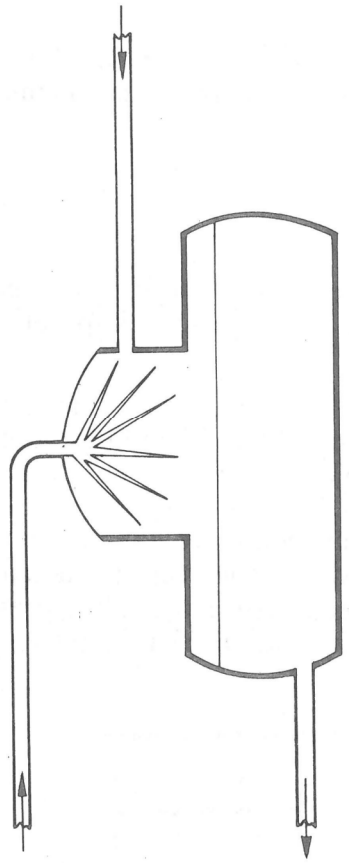
Kod rekuperativnih izmjenjivača topline (parni kotlovi, kondenzatori, radijatori, zagrijači i dr.) i topli i hladni medij istodobno struje kroz izmjenjivač, a toplina prolazi kroz stijenku koja dijeli medije (sl. 11).

U regenerativnim izmjenjivačima topline ista ogrjevna površina alternativno se grije i hladi. Naime, topli medij dovodi toplinu u izmjenjivač i predaje tu toplinu stijenkama u kojima se ta toplina nagomilava, a kad prestane dovod medija s toplinom počinje strujati hladni medij koji iz stijenki izmjenjivača preuzima nagomilanu toplinu.



11 Izmjenjivač topline s posrednim dodirom

U izmjenjivačima topline neposrednim dodirom izmjena topline između toplijeg i hladnijeg medija događa se neposrednim dodirom i miješanjem. Takvi izmjenjivači služe za hlađenje ili grijanje plinova pomoću vode ili za hlađenje vode pomoću zraka, a upotrebljavaju se u proizvodnji plinova, u instalacijama za klimatizaciju, kao rashladni tornjevi u termoelektranama za hlađenje kondenzatorske rashladne vode, kao uređaji za kondenziranje pare miješanjem itd. (Sl. 12).



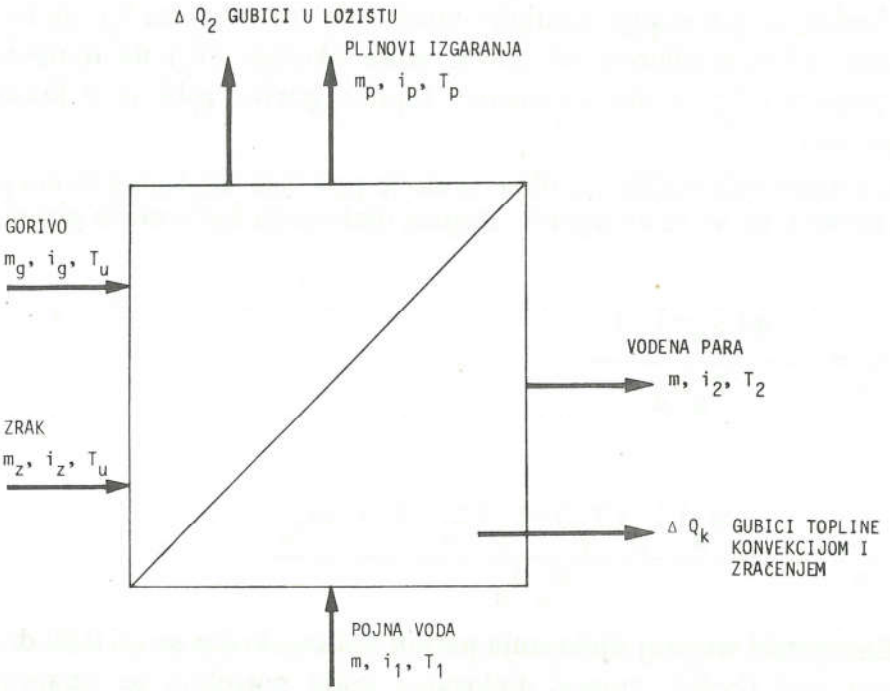
Sl. 12 Izmjenjivač topline s neposrednim dodirom

Povećanje kontaktne površine medija odlučujuće utječe na izmjenu topline. Zbog toga je potrebno vodu raspršiti u što sitnije kapljice i ostvariti što dulji njihov dodir s plinovima ili zrakom. Da bi se osigurao što bolji dodir s kapljicama, upotrebljavaju se u uređajima s plinovima slojevi od rastresitog i poroznog materijala npr. koks), a u rashladnim se tornjevima voda raspršuje pomoću niza zapreka.

Za energetske pretvorbe najčešće upotrebljavani izmjenjivač topline je parni kotao, pa će se u nastavku ukratko iznijeti temeljne karakteristike i princip rada parnog kotla.

Zadatak je parnog kotla da toplinu oslobođenu izgaranjem goriva dovede i preda vodi koja dovođenjem topline isparava u vodenu paru, a vodena para na izlazu iz kotla treba imati određeni tlak i temperaturu. Pored tlaka i temperature bitna karakteristika kotla je "učin kotla". Pod učinom kotla podrazumijeva se mogućnost proizvodnje vodene pare u kilogramima ili tonama na sat. Kotlovi učina do 500 t/h smatraju se malim i srednjim kotlovima, dok se kotlovi s više od 500 t/h vodene pare smatraju kotlovima velikog učina.

Da bi se mogla načiniti energetska bilanca kotla potrebno je poznavati energetske količine na ulazu i izlazu iz kotla sa svim karakterističnim parametrima (sl. 13).



Sl. 13. Shema za odredjivanje bilance parnog kotla

Osnovni mediji i njihove karakteristike koji ulaze u kotao su:

- gorivo (mase m_g u kg/s, sadržaja topline i_g MJ/kg i temperature T_u u K)
- zrak (količine m_2 u kg/s ili m^3/s, sadržaja topline i_2 u MJ/kg ili MJ/m^3 i temperature okoline T_u u K)
- pojna voda (količine m u kg/s, sadržaja topline i_1 u MJ/kg i ulazne temperature T_1 u K).

Izlazni mediji iz kotla i energetske veličine su slijedeće:

- plinovi izgaranja (količine m_p u kg/s ili m^3/s, sadržaja topline i_p u MJ/kg ili MJ/m^3, te temperature izlaznih plinova T_p u K)
- vodena para (količine m u kg/s, sadržaja topline i_2 MJ/kg i temperature T_2 u K)
- količina topline koja se gubi u kotlu za vrijeme procesa izgaranja, ΔQ_K u MJ/s.

Ako se pretpostavi, da je ulazna količina energije jednaka izlaznoj količini energije dobiva se:

$$m_g i_g(T_n) + m_2 i_2(T_u) + m i_1(T_1) = m_p i_p(T_p) + m i_2(T_2) + \Delta Q_K. \quad (69)$$

Energija dovedena u gorivu može se izraziti s donjom ogrjevnom moći, dakle:

$$m_g h_d = m_g i_g(T_u) + m_2 i_2(T_u) - m_p i_p(T_p). \quad (70)$$

Uvrštavajući dobiveni izraz (70) u prethodnu jednadžbu (69) dobiva se:

$$m_g h_d = m (i_2 - i_1) + m_p [i_p(T_p) - i_p (T_u)] + \Delta Q_K. \quad (71)$$

Iz navedene jednadžbe (71) može se zaključiti da se dio gorivom dovedene topline koristi za povećanje entalpija masi vode m (od i_1 na i_2), da se dio koristi za zagrijavanje dimnih plinova od temperature okoline (T_u) na temperaturu izlaznih dimnih plinova (T_p), a dio dovedene topline goriva gubi se u kotlu kod procesa izgaranja (ΔQ_k).

Od dobivenih količina topline samo je prvi član na desnoj strani jednadžbe (71) korisna toplina, pa se za energetski stupanj djelovanja kotla može pisati.

$$\eta_k = \frac{m(i_2 - i_1)}{m_g h_d} \quad (72)$$

ili

$$\eta_k = 1 - \frac{m_p (i_p(T_p) - i_p(T_u)) + \Delta Q_k}{m_g h_d} \quad (73)$$

Energetski stupanj djelovanja parnih kotlova kreće se od 0.80 do 0.92. Da bi se dobio čim veći (bolji) stupanj djelovanja kotla potrebno je smanjiti temperaturu plinova izgaranja (T_p) na izlazu iz kotla, te ostale gubutke koji nastaju prilikom procesa izgaranja (ΔQ).

Gubitak energije u izlaznim dimnim plinovima (plinovima izgaranja) po veličini je najznačajniji kotlovski gubitak, a nastaje uslijed fizičke topline izlaznih dimnih plinova. On je neizbježan kod svih kotlova zbog toga, što bi se znatnijim smanjenjem temperature izlaznih plinova pojavio problem kondenziranja vode u izlaznim plinovima. Kondenzirana voda bi sa sumpornim dioksidom tvorila kiselinu koja bi uništavala dijelove kotla, pa je radi toga potrebno ispuštati dimne plinove iznad 373 K.

Ostali gubici topline u kotlu kod procesa izgaranja (ΔQ_K) posljedica su:
- fizičkog gubitka goriva (propadanje goriva kroz rešetku, nesagorivog goriva u pepelu, šljaci i ložištu), ΔQ_f
- nepotpunog izgaranja goriva, ΔQ_n
- gubitka topline u šljaci i pepelu, ΔQ_o
- gubitka topline koji nastaje konvekcijom i zračenjem, ΔQ_v

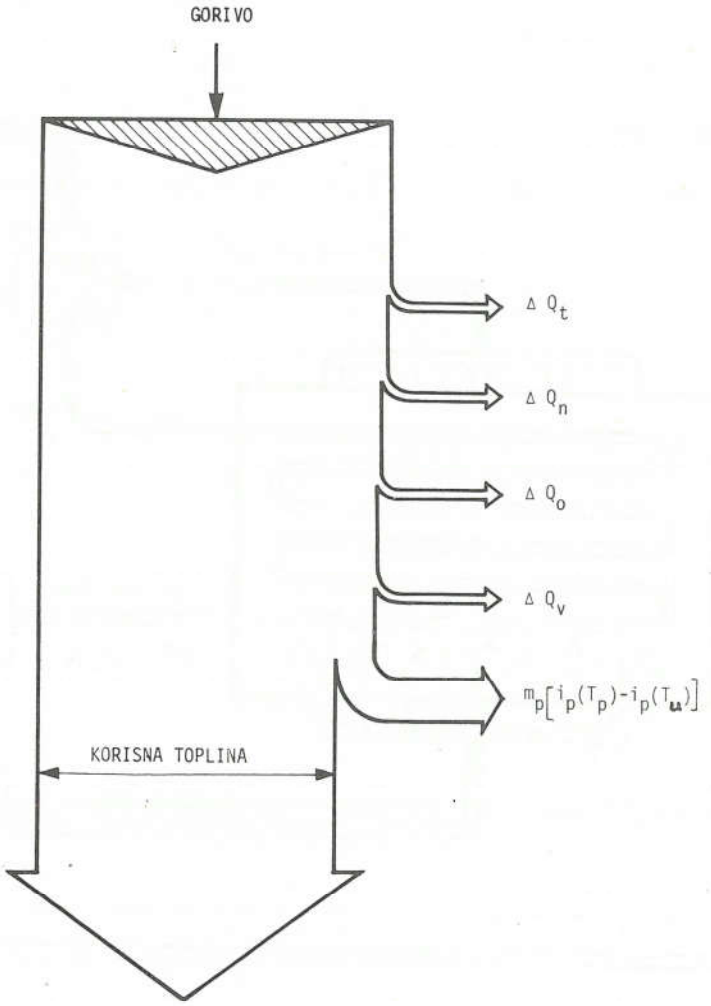
dakle:

$$\Delta Q_k = \Delta Q_f + \Delta Q_n + \Delta Q_o + \Delta Q_v \cdot \quad (74)$$

Na slici 14. prikazan je tok energije u parnom kotlu.

Na smanjenje gubitka među ostalim može se utjecati na slijedeće načine:

- dobrom konstrukcijom i izvedbom kotlova
- vrstom i pripremom goriva
- dobrim izgaranjem goriva (pravilan pretičak zraka, dobar izbor gorionika)
- kvalitetnom izolacijom



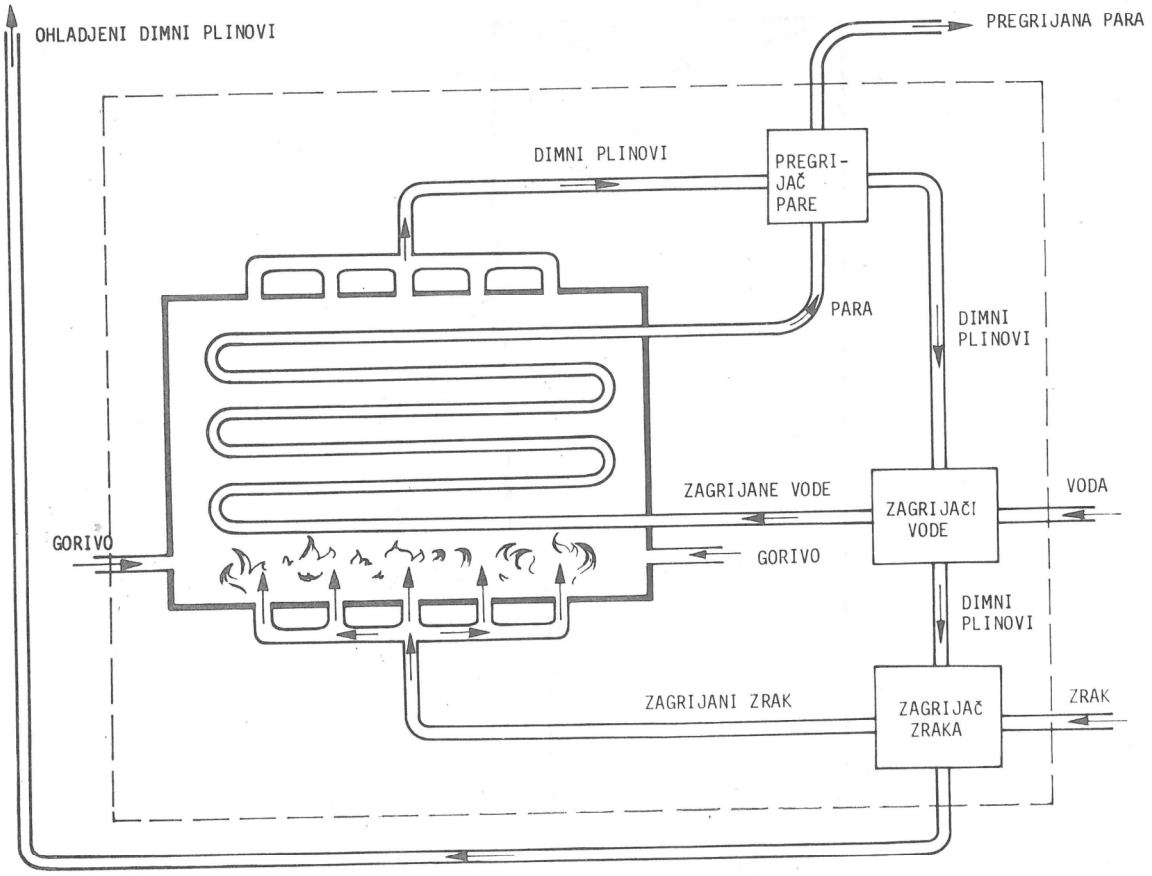
Sl. 14. Tok energije u parnom kotlu

- kvalitetom vode
- kvalitetnim rukovanjem i održavanjem postrojenja.

Kod konstrukcije kotlova porast stupnja djelovanja goriva ogleda se uglavnom kroz usavršavanje uređaja za loženje, te uvođenjem i povećanjem dodatnih ogrijevnih površina.

Primjer povećanja ogrijevnih površina, odnosno primjer boljeg korištenja topline plinova izgaranja prikazan je na sl. 15. Plinovi izgaranja iz područja najviših temperatura vode se u pregrijač pare gdje predajući toplinu povećavaju temperaturu vodenoj pari. Nakon toga plinovi izgaranja (djelomično ohlađeni) vode se u zagrijač vode u kome se voda zagrijava na višu temperaturu prije ulaska u prostor za isparavanje. Konačno, plinovi izgaranja prolaze kroz zagrijač zraka, u kojem se zrak zagrijava na višu temperaturu prije ulaska u ložište.

Energetski stupanj djelovanja η_n (73) ništa ne kaže o potpunosti pretvorbe energije goriva u smislu drugog glavnog stavka termodinamike. Da bi se to utvrdilo, potrebno je odrediti eksergijski stupanj djelovanja kotla η_{ek}. On se utvrđuje pomoću bilance energije na potpunoma analogan način kao što je utvrđena energetska bilanca. Međutim, potrebno je napomenuti da se u ovoj bilanci (eksergija) umjesto entalpija (sadržaja topline) i temperatura računa s eksergijama, pa je:



Sl. 15. Elementarna shema rada parnog kotla

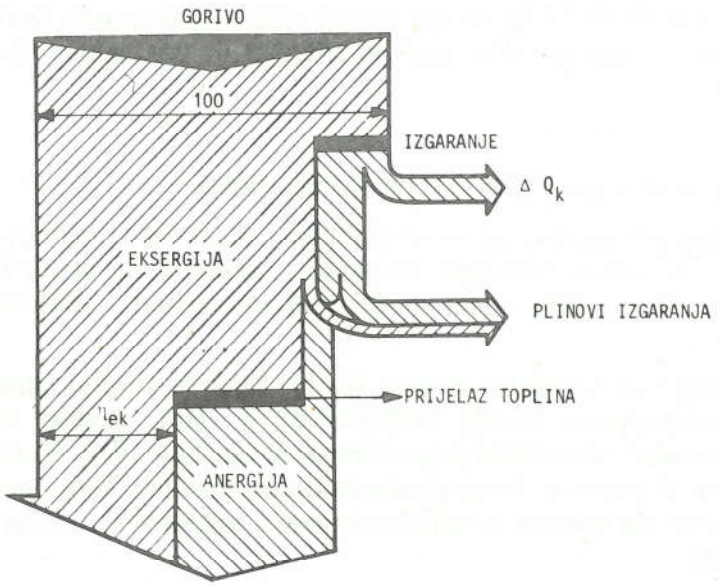
$$\eta_{ek} = \frac{h_d}{e_g}\,\eta_k\left(1 - \frac{T_u}{T_m}\right) \tag{75}$$

gdje su:

h_d - donja ogrijevna moć goriva
e_g - eksergija goriva
η_k - energetski stupanj djelovanja
T_u - temperatura okoline
T_m - srednja temperatura Carnotova procesa.

Izraz u zagradi jednadžbe (75) je upravo stupanj djelovanja Carnotova procesa između srednje temperature T_m i temperature okoline T_u.

Shematski tok određivanja eksergije u procesu izgaranja kod parnog kotla prikazan je na sl. 16. Veoma je mnogo vrsta kotlova obzirom na izvedbu i namjenu.



Sl. 16. Shematski prikaz toka eksergije i anergije u parnom kotlu

2.3. PRETVORBA NUKLEARNE ENERGIJE U UNUTRAŠNJU ENERGIJU

2.3.1. OPĆENITO O NUKLEARNOJ ENERGIJI

Stari Grci su najmanju nedjeljivu česticu materije nazivali atom. Danas je poznato da stari Grci nisu bili u pravu, jer se atom može dijeliti na manje dijelove.

Henri Becquerel (francuski fizičar 1852-1908) otkrio je 1896. postojanje radioaktivnosti na taj način što je zapazio razaranje (oštećenja) fotografske ploče (filma) u prostoriji u kojoj se nalazio uran, a da nije ploča bila izložena svjetlosti. Becquerel je vjerovao da uran proizvodi zrake koje oštećuju film. Te zrake su u stvari beta (β) zrake, za koje je Becquerel smatrao da su struja elektrona. Od tog momenta (1896) može se kazati da počinje spoznaja o "atomskoj" ili "nuklearnoj" energiji.

Britanski fizičar Sir Joseph John Thomson (1856-1940) otkrio je postojanje elektrona 1897. godine. On je pronašao da se katodne zrake proizvedene od negativne elektrode mogu pod utjecajem električnog polja skrenuti. Thomson je dokazao da se katodne zrake sastoje od sitnih čestica koje su sastavni dio svakog atoma. Te sitne čestice nazvane su elektroni.

Maria i Peirre Curie (francuski kemičari 1867-1934, 1859-1906) otkrili su postojanje radioaktivnih elemenata radija (1898) i polonija, a 1902. godine obznanili su upotrebu riječi radioaktivnost.

U 1902. godini Novozelanđanin Ernest Rutherford razjasnio je postojanje alfa (α) i beta (β) čestica te gama (γ) zraka (teorija radioaktivne dezintegracije). Isijavanjem α i β čestica te γ zraka, radioaktivni elementi se mijenjaju u nove elemente.

Paralelno s radom mnogih znanstvenika, u prvom redu fizičara i kemičara koji rade na utvrđivanju sastava atoma i na radioaktivnosti, radi glasoviti njemački fizičar

Albert Einstein (1879-1955) na svojoj teoriji relativiteta kojom je revolucionirao naše saznanje o svijetu. Tako je 1905. godine objavio da energija i masa stoje u odnosu prema jednadžbi

$$W = mc^2 \qquad (76)$$

gdje je W energija, m masa tijela, a c brzina svjetlosti.

Iz navedene jednadžbe može se zaključiti, da mala količina tvari može teoretski biti izmijenjena u veliku količinu energije. Einsteinova postavka potvrđena je s nuklearnom energijom, gdje se iz malih količina urana i plutonija dobivaju velike količine energije.

Radeći dalje na strukturi atoma Rutherford sa svojim suradnikom engleskim kemičarom Frederick-om Soddy (1887-1956) u 1911. godini objavljuje strukturu atoma, a 1912. uvode i obrazlažu pojam izotopa. Godine 1919. Rutherford-u je uspjelo promijeniti jedan element u drugi (transmutacija dušika). Dvije godine kasnije Soddy je mogao zaključiti da studije o radioaktivnosti i internoj strukturi atoma vrijede i za obične materijale.

Sir John Cockcroft (1897-1967) engleski fizičar i Ernest Walton (1903) irski fizičar, prvi su uspjeli 1932. godine izvršiti raspadanje atomske jezgre pomoću umjetno ubrzanih čestica u akceleratoru.

U 1932. godini engleski naučnik James Chadwick (1891-1974) identificirao je neutron, nuklearnu česticu bez naboja, koja će kasnije odigrati značajnu ulogu u lančanoj reakciji. Šest godina kasnije (1938) su Otto Hahn (1879-1968) njemački kemičar i fizičar i Fritz Strassmann (1902) njemački fizičar i kemičar otkrili fisiju nakon čega su poduzeti prvi koraci kontroliranog dobijanja energije iz jezgri teških atoma.

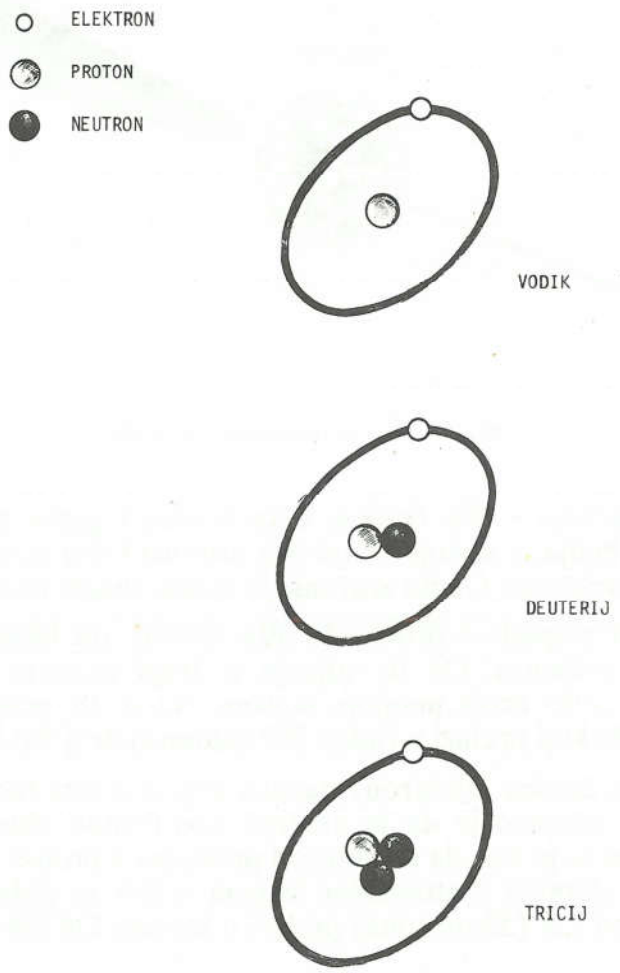
I, konačno u plejadi velikih i zaslužnih znanstvenika krajem prošlog i u prvoj polovici ovog stoljeća na području radioaktivnosti i nuklearne energije javlja se talijanski fizičar Enrico Fermi (1901-1955) koji je otkrio termalizaciju neutrona i pronašao da praktički svi elementi postaju radioaktivni kad ih se obasja neutronima. Najveća zasluga pripisuje se Enricu Fermiju za izgradnju i puštanje u pogon prvog nuklearnog reaktora 2.12.1942. godine u Chicagu.

Pored nekolicine spomenutih znanstvenika bilo bi nepravedno ne kazati da su i mnogi drugi znanstvenici pomogli i omogućili spomenutim znanstvenim radnicima da objave navedena saznanja do kojih su došli. Osim toga potrebno je pripomenuti da su mnoge stvari rađene paralelno i da su se rezultati preklapali, pa je dosta teško bilo točno pripisati pojedina otkrića dotičnom fizičaru ili kemičaru. Isto tako ne bi bilo korektno ne spomenuti da se i u SSSR dosta radilo na problemima radioaktivnosti i nuklearne energije, ali o tim rezultatima nije bilo dovoljno informacija izvan SSSR.

Nuklearna energija je energija koja se oslobađa nuklearnom reakcijom ili radioaktivnim raspadanjem. Ova energija se oslobađa tokom pregrupiranja čestica koje sačinjavaju jezgru atoma. Nuklearna energija se iskorištava kada se ova oslobođena energija pretvara prvo u toplinu a potom u električnu energiju.

Atom je najmanja čestica nekog elementa koja ima kemijska svojstva tog elementa. Jezgra atoma nije homogena nego se sastoji od dvije različite vrste čestica, pozitivno nabijenih protona i neutralnih čestica zvanih neutroni. Relativno masivna jezgra ima uvijek pozitivan naboj i okružena je negativno nabijenim elektronima koji kruže u orbiti oko nje. Ukupan električni naboj atoma je nula, tako da je u svakom atomu broj elektrona u orbiti točno jednak broju protona. Svi atomi određenog

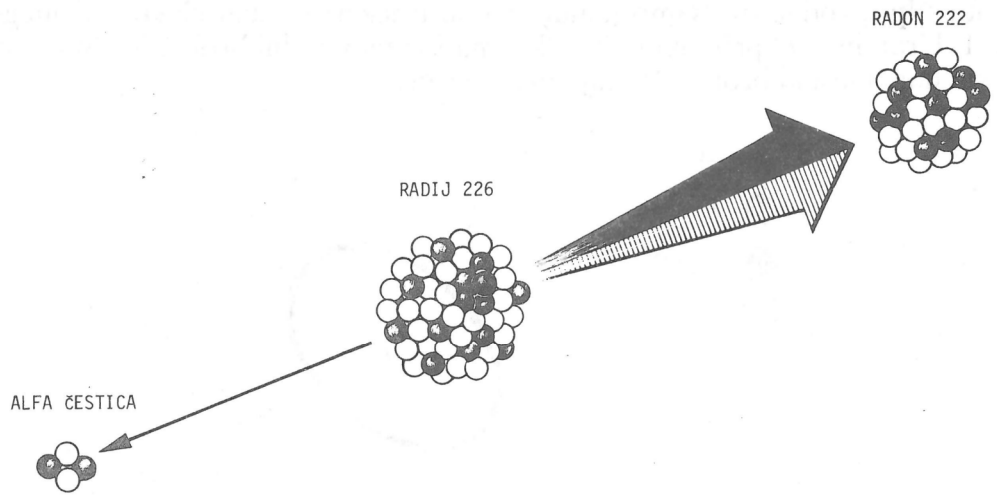
kemijskog elementa sadrže isti broj protona. Broj protona je ujedno i redni broj elementa. Npr., vodik ima samo jedan proton u jezgri i jedan elektron i njegov redni broj je 1. Uran ima 92 protona i 92 elektrona i njegov redni broj je 92. Suma neutrona i protona daje maseni broj i određuje masu jezgre.



Sl. 17. Izotopi vodika i njihov sastav

Redni broj određuje i kemijska svojstva nekog elementa. Svojstva zavise samo o broju elektrona ili protona u atomu, tako neki atomi koji su kemijski isti imaju različite mase, što ovisi o broju neutrona u jezgri. Različite vrste kemijski istih atoma sa različitim brojem neutrona, a istim brojem protona zovu se izotopi. Vodik ima dva prirodna izotopa (sl. 17), normalni vodik sa jednim protonom, maseni broj 1, deuterij sa 1 protonom i 1 neutronom, maseni broj 2. Uran ima tri prirodna izotopa. Svaki ima 92 protona, ali sa 142, 143 i 146 neutrona u jezgri što daje masene brojeve 234, 235 i 238. Elementi se nekada označuju sa njihovim masenim brojevima tj. atom ugljika sa 6 protona i 6 neutrona se zove ugljik - 12.

Vodik i elementi sa malim masenim brojem zovu se "laki" atomi, dok se uran i elementi sa masenim brojem od dvije stotine i više zovu "teški" atomi. Neki od teških izotopa, kao uran ili radij su nestabilni i jezgre njihovih atoma imaju tendenciju da se cijepaju i pretvaraju u stabilnije atome. Ove tvari su radioaktivne, a proces pretvorbe se zove radioaktivno raspadanje. Tijekom procesa raspadanja emitiraju se tri glavna



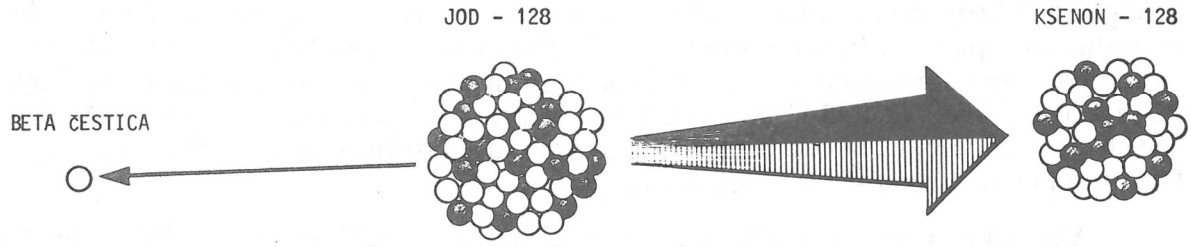
Sl. 18. Princip raspadanja radija 226

tipa nuklearnog zračenja - alfa čestice, beta čestice i gama zrake. Alfa čestice su identične jezgrama helija, a sastoje se od dva protona i dva neutrona. Beta čestice su negativno nabijeni elektroni. Gama zračenje je elektromagnetsko zračenje.

Kad se atom raspada i proizvede alfa česticu, on izbugi dva protona i dva neutrona iz svoga nukleusa. On se mijenja u drugi element s dva broja manjim atomskim brojem i četiri broja manjom masom. Na sl. 18. prikazan je raspad radija 226 (atomski broj 88) koji prelazi u radon 222 (atomski broj 86) i alfa česticu.

Ako pak beta čestica (elektron) napusti jezgru atoma tada nukleus gubi jedan elektron. Međutim, poznato je da je neutron kao proton plus elektron, pa kad se izgubi jedan elektron to je kao da se neutron promjeni u proton. Na taj način element se mijenja u drugi element s atomskim brojem većim za jedan, a masa mu se ne mijenja. Na sl. 19. jod 128 (53 protona) prelazi u ksenon 128 (54 protona) i jednu beta česticu.

Vrijeme poluraspada nekog elementa je vrijeme kroz koje dotični element radioaktivnim raspadanjem (emitiranjem α i β zraka) izgubi polovicu svoje mase i mijenja se u druge elemente. Vrijeme poluraspada nekih radioaktivnih izotopa kreće se od nekoliko djelića sekunde (npr. Polonij 212 za 3×10^{-7} sek) do nekoliko milijardi godina (npr. Uran 238 za 4.51×10^{9} god.).



Sl. 19. Princip raspadanja joda 128

Kompletni nizovi raspadanja radioaktivnih elemenata do stabilnih elemenata s vremenima poluraspada, i radijacijom α i β čestica prikazani su:

- u tabeli 3. za uran 238 u olovo 206
- u tabeli 4. za torij 232 u olovo 208
- u tabeli 5. za uran 235 u olovo 207
- u tabeli 6. za plutonij 241 u bizmut 209.

2.3.2. NUKLEARNE REAKCIJE I UDARNI PRESJECI

Jezgre atoma mogu ulaziti u nuklearne reakcije s drugim jezgrama, subatomskim česticama ili fotonima. Nuklearne se reakcije vremenski mogu razlučiti u dvije etape:

a) ulazak čestice koja izaziva nuklearnu reakciju u jezgri i nastajanje tzv. složene jezgre i
b) raspad složene jezgre na rezultirajuću jezgru i emitiranu česticu.

U nuklearnoj energetici posebno su važne nuklearne reakcije s neutronima, a među njima najvažnije su: elastični sudar, neelastični sudar, zarobljavanje neutrona i fisija.

Kod elastičnog sudara neutron i jezgra izmjenjuju količinu gibanja i kinetičku energiju, slično kao dvije elastične kuglice u klasičnoj mehanici. Kod ove reakcije neutron je ulazna i izlazna čestica.

Kad neutron dio svoje kinetičke energije pretvara u energiju polude složene jezgre, tada se nakon sudara iz složene jezgre pored neutrona emitira i foton (gama zraka) koja odnosi dio apsorbirane energije. Takva se nuklearna reakcija često javlja kao reakcija neutrona s teškim jezgrama.

Nuklearna reakcija zarobljavanja neutrona nastaje u slučaju kada neutron interakcije ostaje zarobljen u jezgri. Ekvivalent kinetičke energije neutrona i njegove energije vezivanja biva emitiran kao foton (gama zraka).

Fisija nastaje kada se složena jezgra nakon apsorpcije neutrona raspada na fragmente. Za nuklearnu je fisija ključna nuklearna reakcija jer omogućava korištenje nuklearne energije, pa će se, radi toga, njoj u nastavku posvetiti posebna pažnja.

Udarni presjek za nuklearne reakcije mjera je za vjerojatnost nastanka neke nuklearne reakcije, a jedna je od fizikalnih karakteristika materija koju je potrebno poznavati kod proračuna u nuklearnoj fizici i tehnici.

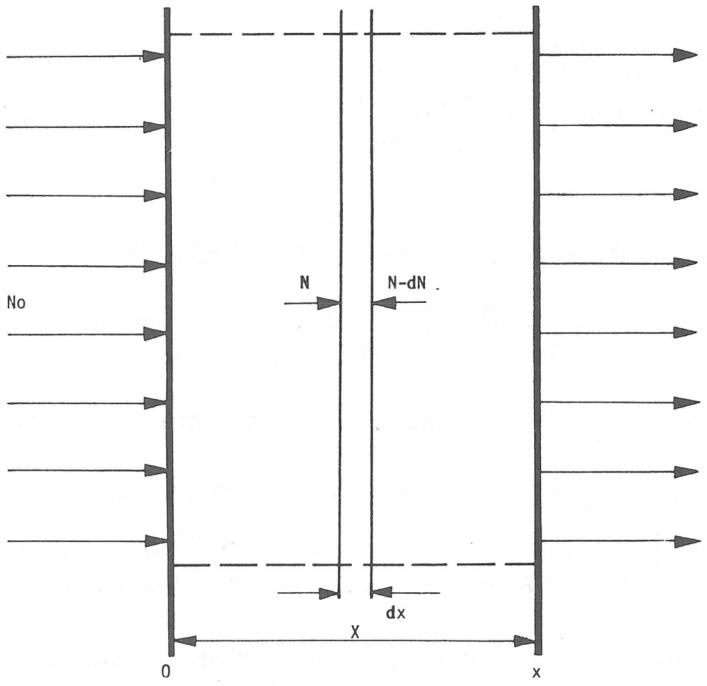
Za definiranje udarnog presjeka (σ) može poslužiti slika 20. Ako se pretpostavi da okomito na graničnu površinu, na kojoj se nalazi n jezgri po cm^2, struji N_o neutrona po cm^2 i sekundi, dogodit će se da će jedan dio neutrona u sudaru s jezgrama izazvati nuklearnu reakciju, npr. raspad jezgre.

Broj tako sudarenih jezgri B po cm^2 i sekundi ($cm^{-2}s^{-1}$) ovisit će o: udarnom presjeku σ, gustoći jezgri n u graničnom sloju (cm^{-2}) i gustoći neutrona N_o ($cm^{-2}s^{-1}$), pa se može postaviti da je

$$B = \sigma n N_o \tag{77}$$

iz čega slijedi

$$\sigma = \frac{B}{nN_o} \quad (cm^2) \tag{78}$$



Sl. 20. Skica za definiranje udarnog presjeka

Tako definirani udarni presjek naziva se mikroskopski udarni presjek.

Tako određen udarni presjek nije uzeo u obzir debljinu medija na kojega dolazi struja neutrona. Za isti broj upadnih čestica bit će više reakcija ako je materijal deblji na kojeg upada struja neutrona.

Uzme li se jedinica površine cm^2 i sloj materijala dx (sl. 20) u tom slučaju nalazi se $n_v dx$ jezgara (n_v broj jezgara u cm^3), a smanjenje gustoće neutrona pri prolasku kroz sloj dx iznosi

$$-dN = \sigma n_v N dx \tag{79}$$

pa je

$$-dN/N = \sigma n_v dx \tag{80}$$

odnosno

$$\ln N_o/N = \sigma n_v x \tag{81}$$

ili

$$\sigma = \frac{\ln \frac{N_o}{N}}{n_v x} . \tag{82}$$

Pored mikroskopskog udarnog presjeka upotrebljava se i makroskopski (Σ) udarni presjek, određen kao produkt broja jezgara u cm^3 (n_v) i mikroskopskog udarnog presjeka σ, pa je

$$\Sigma = n_{v\sigma} . \quad (83)$$

Potrebno je naglasiti da udarni presjek znatno ovisi o energiji neutrona, pa uz podatak o udarnom presjeku treba uvijek navesti i energiju neutrona za koju on vrijedi. Prema tome, udarni presjek nije neka konstanta, on ovisi o vrsti jezgre, o energiji neutrona i vrsti reakcije između neutrona i jezgre (elastični i neelastični sudar, zarobljavanje neutrona, fisija). O točnosti određivanja udarnog presjeka ovisi točnost proračuna reaktora jer o udarnim presjecima ovisi koliko će u prosjeku neutrona od jednog raspada biti sposobno da izazove raspad druge jezgre.

Za razliku od fisionih neutrona, termički neutroni su u toplinskoj ravnoteži s atomima materijala u reaktoru i njihova raspodjela u funkciji je njihove energije kod neke određene temperature.

Najvjerojatnija energija neutrona za neku određenu temperaturu proporcionalna je temperaturi prema jednadžbi:

$$W = 1/2\, k\, T \quad (84)$$

dok je prosječna energija neutrona

$$\overline{W} = 3/2\, k\, T \quad (85)$$

dakle, također je proporcionalna temperaturi i tri puta veća od najvjerojatnije energije. Konstanta k ima vrijednost $1.38\ 10^{-23}$ J ili 8.625×10^{-5} eV, a T je temperatura u Kelvinima.

Poznavajući najvjerojatniju i prosječnu energiju, lako se mogu izračunati odgovarajuće brzine koristeći jednadžbu 84.

$$W = 1/2\, mv^2 \quad (86)$$

gdje je m masa neutrona, v brzina neutrona, a W najvjerojatnija ili prosječna energija neutrona.

Udarni su presjeci za apsorpciju neutrona u području termičkih energija za mnoge nuklide (tzv. apsorberi) obrnuto proporcionalni s brzinom neutrona, a broj apsorbiranih neutrona po jedinici volumena apsorbera neovisan je o energiji neutrona odnosno o temperaturi. Obično se referentni udarni presjeci navode za termičke neutrone energije 0.0253 eV s odgovarajućom brzinom v = 2200 m/s i temperaturom T = 293 K i oni za pojedine izotope urana i plutonija iznose

	uran -233	uran -235	uran -238	plutonij -239	plutonij -241
σ_a	588.80	680.80	2.71	1011.30	1377.00×10^{-24} cm^2
σ_f	531.10	582.20	-	742.50	1009.00×10^{-24} cm^2

σ_a je apsorpcioni udarni presjek
σ_f je fisioni udarni presjek

2.3.3. NUKLEARNA FISIJA

Kod radioaktivnog zračenja nukleus atoma gubi (α i β) čestice i postaje nukleus drugog atoma. Međutim, kod cijepanja nukleusa stvaraju se dva nova manja nukleusa, nešto neutrona i toplina.

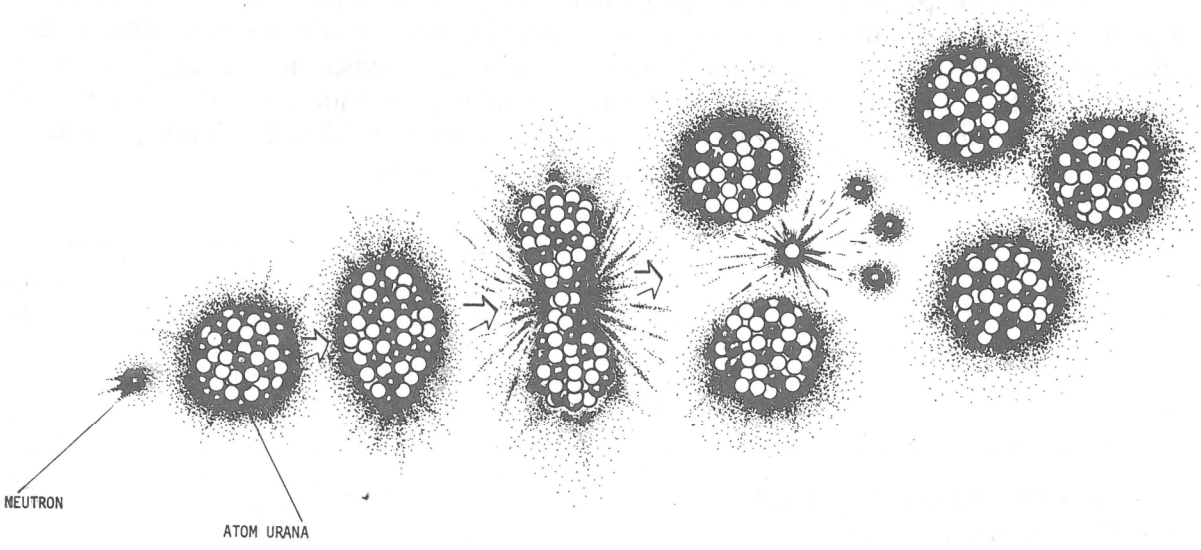
Jedino nuklearno gorivo koje se u svom prirodnom obliku može neposredno upotrijebiti za cijepanje atoma (sporim elektronima) je izotop Urana U-235. Budući da Urana 235 u prirodi ima veoma malo (oko 0.7% u prirodnom uranu), to će se za potrebne nuklearne energije u budućnosti koristiti umjetna nuklearna goriva: plutonij 239 i izotop urana 233, koji se također mogu cijepati pomoću sporih neutrona. Kako je poznato plutonij se dobiva iz Urana 238, a uran 233 iz torija 232. Sastav prirodnog urana je slijedeći:

99.282% U - 238
0.712% U - 235
0.006% U - 234.

Izotopi urana 238 i torija 232 također su podložni fisiji samo s neutronima čija je kinetička energija iznad 1 MeV. Ovo svojstvo (posebno urana 238) znatno otežava praktično korištenje nuklearne energije.

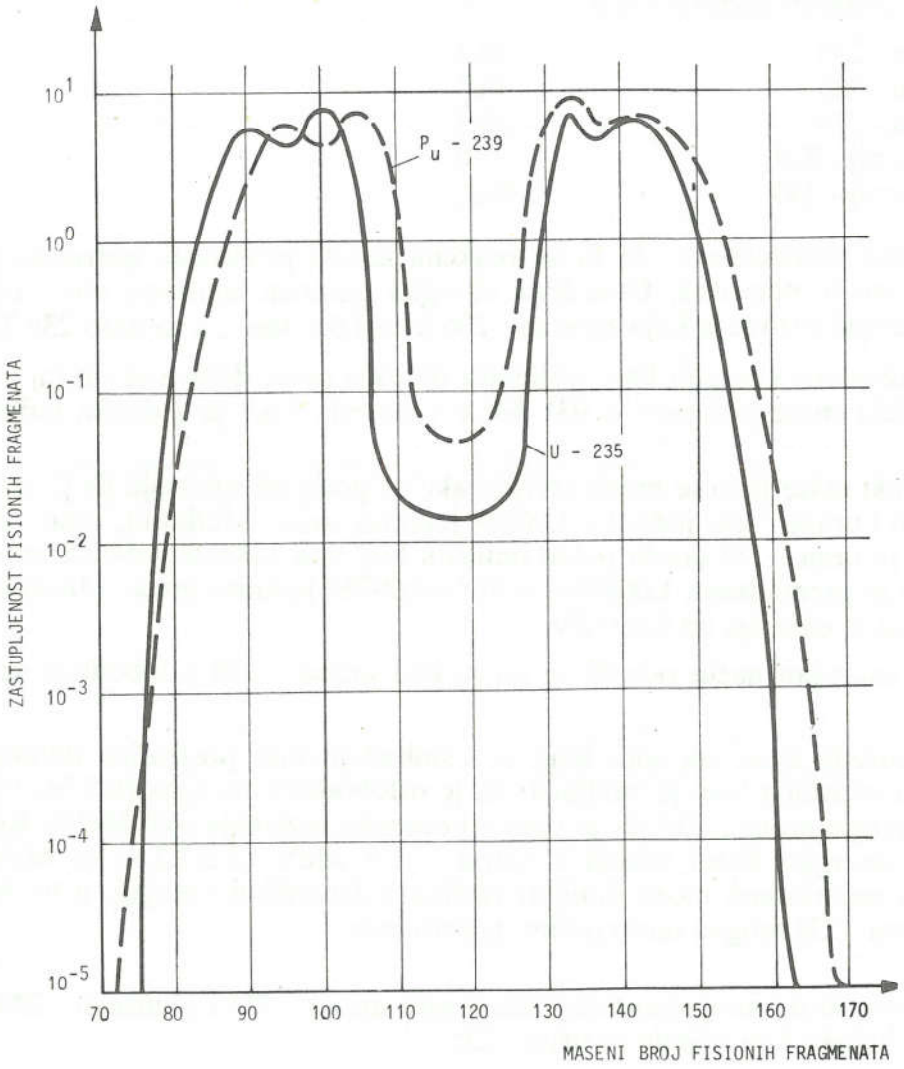
Pored izotopa urana i torija fisiji su podložni i izotopi drugih elemenata s velikom pa i srednjom atomskom masom. Za izazivanje tih fisija potrebno je, međutim, upotrijebiti neutrone mnogo viših energija nego što se dobiva fisijom. To znači da kod tih elemenata nije moguće ostvariti lančanu reakciju i zbog toga oni nisu interesantni za nuklearnu energetiku.

Nuklearna reakcija cijepanja teških nukleusa naziva se fisija, a nastaje kada jedan neutron udari na pr. u atom urana 235. Nakon toga atom urana se dijeli prema sl. 21. Masa atoma koji nastaju cijepanjem uvijek je manja od mase koju je atom imao



Sl. 21 Shematski prikaz raspada atoma urana

prije cijepanja. Veliki udio jezgri urana koje se raspadaju u dvije grupe daju "laku" grupu s masenim brojevima 85 do 104 i "tešku" grupu s masenim brojevima 130 do 149, iz čega slijedi da neutronska fisija urana 235 nije simetrična. Slično se događa i s drugim prirodnim fisionim elementom plutonijem 239. Jezgre se fisionih atoma mogu cijepati na 30 do 40 različitih načina, što znači da će se među produktima fisije naći 60 do 80 različitih fisionih fragmenata. Ako se fisioni fragmenti sortiraju prema njihovim masama može se uočiti da je zastupljenost masenih brojeva različita (sl. 22).



Sl. 22. Zastupljenost fisionih fragmenata u ovisnosti o njihovom masenom broju

Broj oslobođenih neutrona ovisi o načinu fisije. Emisija može biti jednog, dva ili više neutrona, tako da prosjek emisije neutrona ne mora biti cijeli broj. Kod fisije se u prosjeku oslobađa slijedeći broj neutrona:

uran - 235	2.47 neutrona
plutonij - 239	2.91 neutron
uran - 233	2.55 neutrona.

Oslobađanjem većeg broja neutrona nuklearna reakcija jednom započeta sama po sebi može se ne samo održavati nego se može razvijati kao lavina. Ta pojava upotrebljena je kod izrade nuklearne bombe. Za praktične svrhe upotrebljava se reakcija kod koje se kontrolira broj reakcija (broj neutrona).

Jezgre atoma raspadaju se spontano, dakle bez dovođenja energije, ako je

$$Z^2/N > 45 \qquad (87)$$

gdje je Z broj protona, a N broj nukleona (suma protona i neutrona).

Jezgre atoma urana i plutonija od važnosti za nuklearnu energetiku imaju slijedeće vrijednosti faktora Z^2/N:

uran - 233	36.3
uran - 235	36.0
uran - 238	35.5
plutonij - 239	37.0
plutonij - 240	36.8.

Prema navedenome, da bi se reakcija mogla proizvesti, potrebno je dovesti energiju pomoću neutrona. Dovedena energija pomoću neutrona mora biti veća ili jednaka energiji vezivanja koja za uran - 236 iznosi 6.6 MeV, a za uran 239 7.0 MeV.

Oslobođena energija kao posljedica defekta mase dobiva se na taj način da se ukupni defekt mase pomnoži s 931 MeV (energija koja je jednaka jednoj jedinici mase).

Defekt mase lako se može utvrditi ako se pođe od spoznaje da je razlika mase urana - 236 i urana - 235 jednaka 1.00168 jedinica mase. Međutim, uran - 236 nastao je tako da je uran - 235 dobio jedan neutron koji ima 1.00898 jedinica mase. Stvarni efekt mase je prema tome 1.00898-1.00168=0.00730 jedinica mase. Množenjem s 931 MeV dobiva se energija od 6.8 MeV.

Na analogan način odredi se da je kod urana - 238 oslobođena energija 5.3 MeV.

Usporede li se energije koje se oslobađaju kao posljedice defekta mase s energijama vezivanja lako je zaključiti da je oslobođena energija (6.8 MeV) dovoljna za raspad jezgre urana - 236 jer je veća od energije vezivanja (6.6 MeV). Kod urana - 238 ta je energija bitno manja i iznosi - 1.8 MeV (5.3-7.1=-1.8 MeV), pa se dovedenim neutronima mora donijeti razlika u kinetičkoj energiji, a to znači da je raspad urana - 238 moguć samo brzim neutronima.

S obzirom na mogućnost raspada jezgre urana - 233 i plutonija - 239 dolazi se do istih zaključaka koji vrijede za uran - 235.

Obrazloženje za navedene razlike energija potrebnih za cijepanje urana - 235 (koji ima paran broj protona i neparan broj neutrona) i uran - 238 (paran broj protona i paran broj neutrona) treba tražiti u činjenici da složene jezgre koje nastaju nakon apsorpcije neutrona (uran - 236 i uran - 239) imaju paran odnosno neparan broj neutrona. Jezgre su s parnim brojem protona i neutrona stabilnije. Zbog toga, kada apsorpcija neutrona dovodi do stvaranja složene jezgre s parnim brojem neutrona, oslobađa se, zbog stvaranja stabilnije jezgre, veća količina energije koja je raspoloživa za fisiju.

Fisijom teških jezgri oslobađa se energija vezivanja između jezgre koja se cijepa i jezgri fisionih produkata. Kako je već navedeno jezgre se cijepaju na više

načina, pa radi toga ima smisla govoriti samo o prosiječnoj energiji oslobođenoj u fisiji.

Energija vezivanja po nukleonu za izotope urana iznosi oko 7.6 MeV, a za jezgre fisionih produkata oko 8.5 MeV. Iz do sada navedenoga može se zaključiti da će fisija jezgre urana - 236 osloboditi energiju od 188 do 212 MeV. Obično se računa s prosječnom vrijednošću oko 200 MeV po raspadu jedne jezgre. Ako se računa preko defekta mase (0.216 jedinica mase) i energije koja odgovara jedinici mase (931 MeV) dobiva se približno 202 MeV po raspadu jedne jezgre.

Oslobođena se energija najvećim dijelom pojavljuje kao kinetička energija fisionih fragmenata, a manjim dijelom kao energija neutrona, beta i gama zračenja.

Najveći dio energije fisije pojavljuje se konačno u obliku toplinske energije u nuklearnom gorivu i produktima raspadanja.

S obzirom na činjenicu da se kod raspada jezgre urana - 235 ostvaruje defekt mase u iznosu 0.216 jedinica mase (uran - 235 ima 235 jedinica mase), to je energetski iskoristivo manje od 0.1% ukupne mase koja sudjeluje u nuklearnoj reakciji.

Da se ipak radi o velikim količinama energije navodi se da u jednom gramu urana - 235 ima 6.023×10^{23} jezgri, a raspadom svake od njih dobiva se 200 MeV, što odgovara energiji oko 320×10^{-13} J (jer je MeV = 1.602×10^{-13} J). Iz jednog grama urana - 235 dobiva se energija od oko 23 MWh.

Masa koja se "izgubila" za vrijeme fisije (masa nastalih atoma manja je od mase ishodnih atoma) pretvorila se u kinetičku energiju, koja se pretvorila u toplinu kada se fisioni produkti sudaraju s atomima koji ih okružuju. Neutroni nastali raspadom prve jezgre pogađaju druge jezgre oslobađajući novu energiju i nove neutrone. Ovaj stalni (kontinuirani) proces diobe (fisije) atoma naziva se lančanom reakcijom.

Lančana reakcija je proces u kojem neutroni proizvedeni fisijom izazivaju daljnje fisije a time i širenje tih nuklearnih reakcija na okolni materijal uz oslobođenje odgovarajuće količine energije. Svi neutroni koji nastaju u fisijama nisu raspoloživi za nastavak tog procesa jer se jedan dio gubi zbog bijega i na apsorpcije koje ne rezultiraju fisijom.

Na slici 23. shematski je prikazana lančana reakcija urana - 235.

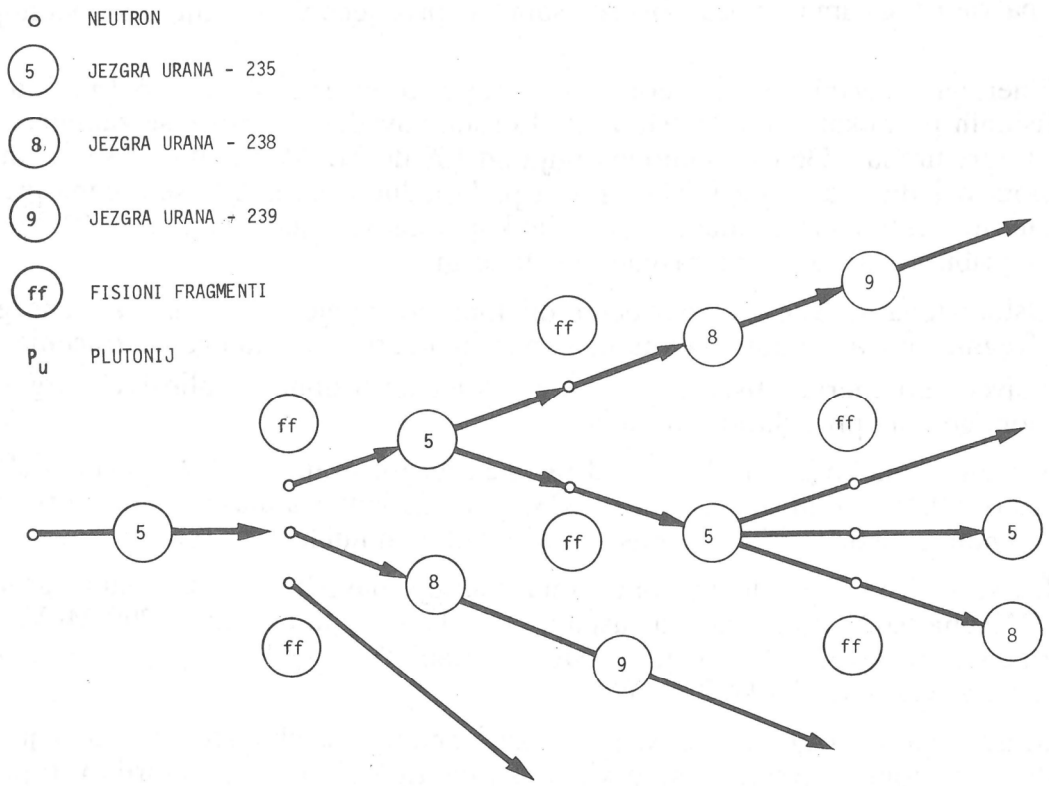
Jedno je od bitnih obilježja sistema koji sadrži fisioni materijal mogućnost ostvarenja samoodržavajuće lančane reakcije. Samoodržavajuća lančana reakcija nastaje kada se početni broj neutrona u sistemu, koji je izoliran od vanjskog izvora neutrona, ne smanjuje, tj. kad je sistem sposoban sav gubitak neutrona nadoknaditi njihovom internom proizvodnjom. Jedini takav fisioni materijal raspoloživ u prirodi je prirodni uran.

Da bi se mogla u potpunosti shvatiti lančana reakcija potrebno je nešto kazati o raspodjeli energija fisionih neutrona.

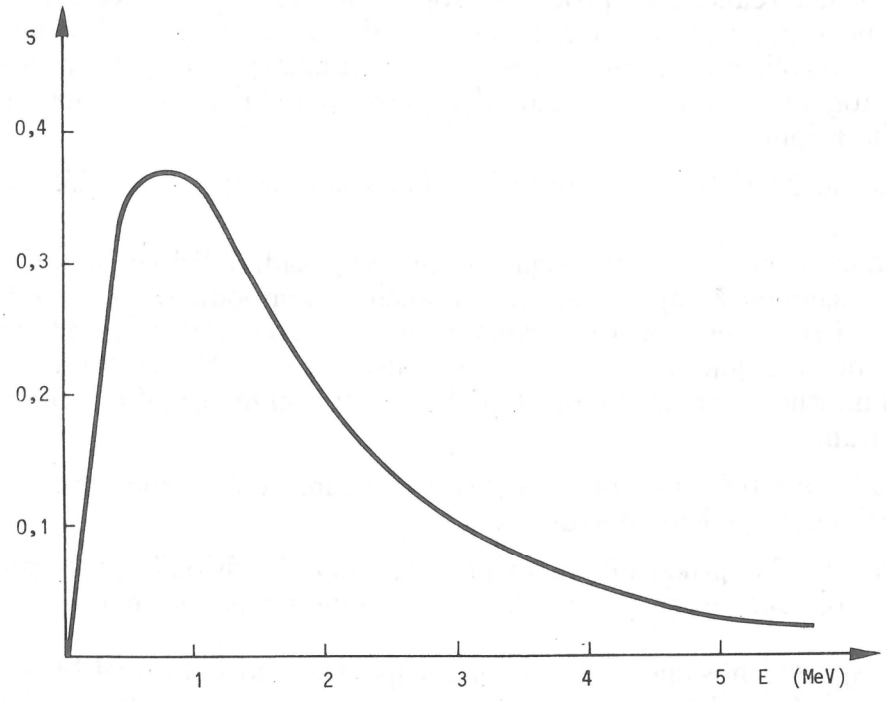
Na slici 24. prikazana je raspodjela energije fisionih neutrona, na kojoj S označava broj neutrona po jedinici energetskog intervala, a E energiju u MeV.

Prosječan iznos energije neutrona u spektru iznosi oko 1.94 MeV, dok energija najvećeg broja fisionih neutrona po jedinici energetskog intervala iznosi 0.645 MeV.

Uran - 238 podložan je fisiji kada je energija neutrona veća od 1 MeV, a prema slici 24. može se zaključiti da će oko 50% neutrona imati veću energiju od 1 MeV.



Sl. 23. Shematski prikaz lančane reakcije urana - 235



Sl. 24. Raspodjela energije fisionih neutrona

Međutim, udarni su presjeci prirodnog urana u području energija fisionih neutrona:

- za neelastični sudar $\sigma_{ne} = 2.47 \times 10^{-24}\ cm^2$
- za fisiju $\sigma_f^{ne} = 0.29 \times 10^{-24}\ cm^2$

Iz podataka za udarne presjeke može se zaključiti da će neutroni iznad praga fisije urana - 238 (1 MeV) imati oko 10 puta veću vjerojatnost da će biti neelastično raspršeni nego da će izazvati fisiju. Budući da neelastični sudar dovodi do velikog gubitka energije neutrona, pa će nakon sudara neutroni najvjerojatnije imati energiju ispod 1 MeV (prag fisije urana - 238). Neutroni se postupno usporavaju zbog sudaranja s jezgrama i mogu biti apsorbirani, a jedan njihov dio izaziva fisiju urana - 235. S obzirom da je u prirodnom uranu svega 0.7% urana - 235, to je i vjerojatnost zahvata neutrona od strane ovog izotopa malena, pa se radi toga ne može ostvariti samoodržavajuća lančana reakcija u neograničenom bloku prirodnog urana.

Iz navedenih podataka s udarnim presjecima termičkih neutrona može se zaključiti, da je udarni presjek fisije urana - 235 oko 217 puta veći od apsorpcijskog udarnog presjeka urana - 238, pa je prema tome moguće u prirodnom uranu ostvariti samoodržavajuću lančanu reakciju pod uvjetom da fisiju izazivaju termički neutroni.

Samoodržavajuću lančanu reakciju u uranu moguće je ostvariti na dva načina:

1. Kod prirodnog ili slabo obogaćenog urana uspješnim usporavanjem fisionih neutrona, ali sa što manje gubitaka neutrona u toku usporavanja. Ovim se procesom može približiti uvjetima za ostvarenje samoodržavajuće lančane reakcije kao da su fisioni neutroni termičkih energija.

2. Visokim obogaćenjem urana, tj. povećanjem sadržaja izotopa urana - 235 na preko 20%. Visoko je obogaćenje nuklearnog goriva potrebno radi kompenzacije apsorpcije neutrona od strane atoma izotopa urana - 238 s povećanom vjerojatnošću fisije atoma urana - 235.

Prvi se način koristi u temičkim reaktorima, a drugi u brzim reaktorima. Usporavanje neutrona ostvaruje se putem moderatora, a sama moderacija vrši se putem sudara jezgri moderatora s neutronima.

2.3.3.1. Nuklearni reaktori

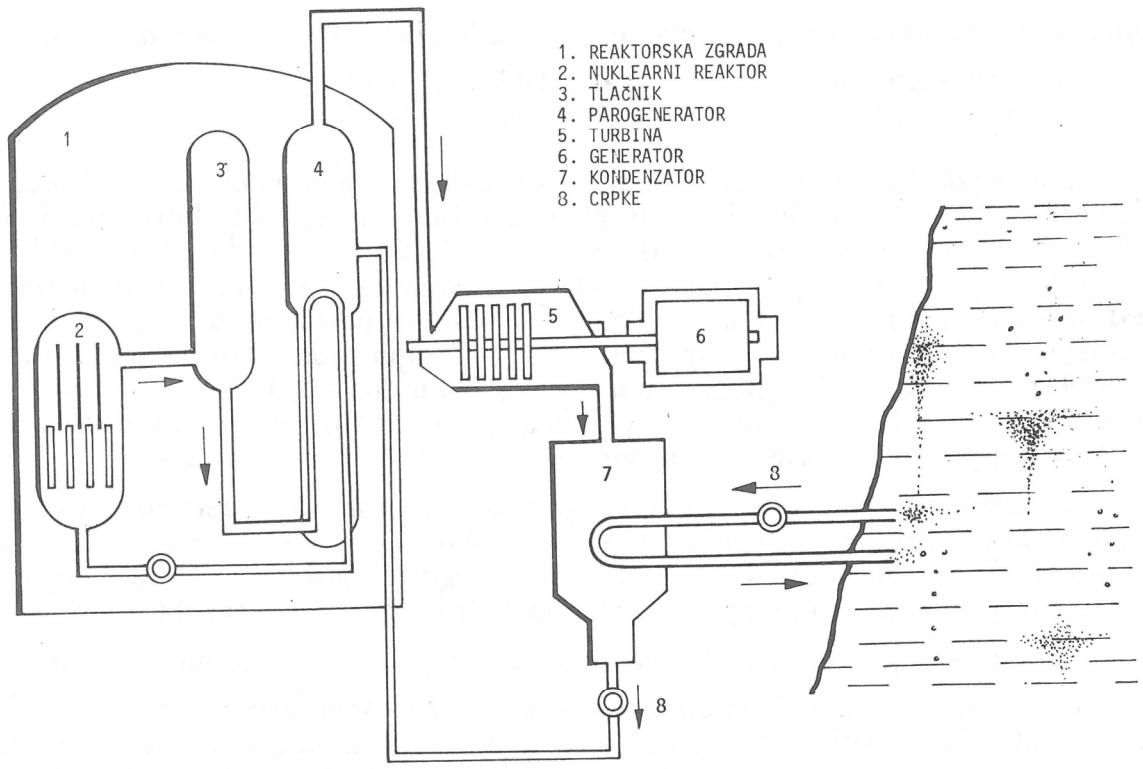
Nuklearne elektrane služe za iskorištenje toplinske energije dobivene fisijom jezgara atoma urana ili plutonija. Iskorištenje toplinske energije ostvaruje se pretvorbom u električnu energiju slično kao i u klasičnim termoelektranama.

Osnovni dijelovi nuklearne elektrane prema slici 25. su:

- nuklearni reaktor
- parogenerator
- cirkulaciona crpka rashladnog sredstva reaktora
- tlačnik
- zaštitna posuda (kontejment)
- pomoćni i klasični sistemi.

Nuklearni su reaktori uređaji u kojima se održva kontrolirana lančana reakcija, a različiti oblici energije fisije pretvaraju se u toplinu koja se odgovarajućim prijenosnim medijem izvodi iz reaktora.

Parogenerator je izmjenjivač topline u kojem rashladno sredstvo reaktora



Sl. 25. Osnovna shema nuklearne elektrane na tlačnu vodu

predaje dio svoje toplinske energije vodi odnosno pari u sekundarnom krugu nuklearne elektrane.

Cirkulaciona crpka rashladnog sredstva reaktora omogućava cirkulaciju rashladnog sredstva u primarnom krugu reaktora a moraju spriječiti svako propuštanje rashladnog sredstva reaktora i spriječiti ulaz bilo kakvog medija u rashladno sredstvo.

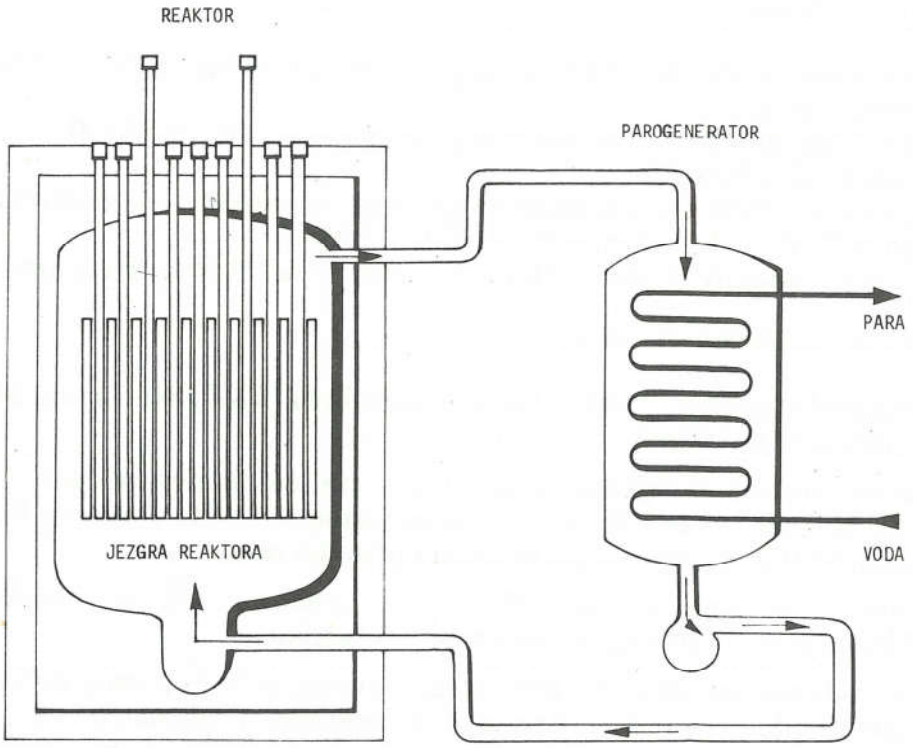
Tlačnik je dio postrojenja koji je priključen na primarni krug nuklearne elektrane sa ciljem da u njemu održava potreban tlak i da kompenzira promjene volumena rashladnog sredstva reaktora zbog promjena temperature.

U zaštitnoj posudi (kontejmentu) smještene su osnovne komponente primarnog kruga nuklearne elektrane i dio komponenata reaktorskog pomoćnog postrojenja. Ona je predviđena da sadrži vodenu paru i plinovite fisione produkte u slučaju loma neke od komponenata primarnog kruga nuklearne elektrane.

Pomoćni sistemi nuklearnog reaktora nisu u direktnoj vezi s iskorištenjem proizvedene toplinske energije, ali su bitni za sigurnost reaktora i njegovo pravilno funkcioniranje.

Klasični sistemi u nuklearnoj elektrani identični su s takvim sistemima u klasičnoj termoelektrani (turbina, generator, kondenzator, crpke itd.).

Budući da se u nuklearnom reaktoru odvija pretvorba nuklearne energije u toplinsku energiju, to će se u nastavku nešto više kazati o nuklearnim reaktorima. Osnovna shema nuklearnog reaktora prikazana je na slici 26. U jezgri reaktora smješteno je nuklearno gorivo i medij za usporavanje neutrona (moderator). Da bi se spriječio bijeg neutrona iz jezgre reaktora, ona je oklopljena reflektorom, a da bi se onemogućio prodor radioaktivnog zračenja u okolinu, oko reflektora je izrađen



Sl. 26. Osnovna shema reaktorskog dijela nuklearne elektrane

biološki štit. Za regulaciju lančane reakcije služi kontrolni sistem, za koji se upotrebljavaju štapovi od materijala velikog udarnog presjeka apsorpcije.

Bitne razlike između pojedinih tipova nuklearnih elektrana su u vrsti nuklearnih reaktora i njihovim pomoćnim sistemima. Vrsta reaktora određuje raspoloživi oblik toplinske energije za korištenje (karakteristike prenosioca topline, njegove parametre i agregatno stanje) dok je postrojenje za pretvorbu toplinske energije u mehanički rad u osnovi isto ili slično kod svih tipova elektrana.

Nuklearne elektrane je moguće razvrstati prema raznim kriterijima. Sa stanovišta iskorištenja proizvedene topline najprikladnije je to postrojenje, odnosno njihove reaktore, klasificirati prema vrstama rashladnih sredstava reaktora.

1. Reaktori hlađeni s vodom pod tlakom

- Reaktori hlađeni i moderirani običnom vodom (PWR - Pressurized Water Reactors, ili u sovjetskoj literaturi VVR - Reaktor Voda - Voda)
- Reaktori hlađeni i moderirani teškom vodom (HWR - Heavy Water Reactors)

2. Reaktori hlađeni sa kipućom vodom

- Reaktori hlađeni i moderirani kipućom vodom (BWR - Boiling Water Reactors)
- Reaktori hlađeni kipućom običnom vodom i moderirani teškom vodom (SGHWR - Steam Generating Heavy Water Reactors)
- Reaktori hlađeni kipućom vodom i moderirani grafitom (LWGR - Light Water Graphite Reactors)

3. Reaktori hlađeni plinom

- Reaktori hlađeni plinom i moderirani grafitom I generacije (GCR - Gas Cooled Reactors)
- Reaktori hlađeni plinom i moderirani grafitom II generacije (AGR - Advanced Gas Reactors)
- Reaktori hlađeni plinom i moderirani grafitom sa visokim temperaturama u jezgri (HTGR - High Temperature Gas Reactors)
- Brzi reaktori oplođivači hlađeni plinom (GBR - Gas Breeder Reactors)

4. Reaktori hlađeni sa tekućim metalima

- Brzi reaktori oplođivači hlađeni tekućim metalima (LMFBR - Liquid Metal Fast Breeder Reactors)

Svi reaktori trebaju obogaćeni uran ili plutonij kao nuklearno gorivo, osim reaktora koji su hlađeni i moderirani sa teškom vodom (HWR) i plinom hlađenih reaktora I generacije (GCR), koji mogu koristiti i prirodni uran.

Osim navedenih, ima još nekoliko tipova reaktora koji su ispitivani sa stanovišta prikladnosti za uključenje u nuklearnu energetiku.

Kriteriji za donošenje odluke o pogodnosti daljnjeg razvoja jednog reaktorskog sistema su vezani uz cijenu izgradnje, sigurnost, jednostavnost rukovanja i održavanja. Manji broj reaktorskih tipova omogućuje standardizaciju projekta i komponenata, što znatno ubrzava i pojeftinjuje izgradnju nuklearnih elektrana. Razvoj jednog reaktorskog tipa do njegove komercijalne primjene je vrlo skup i zahtijeva veliki istraživački i industrijski potencijal zemlje.

Danas su najrasprostranjeniji slijedeći tipovi nuklearnih energetskih reaktora:

Reaktori hlađeni i moderirani sa običnom vodom pod tlakom (PWR)

- Reaktori hlađeni i moderirani sa kipućom vodom (BWR)
- Reaktori hlađeni i moderirani sa teškom vodom (HWR)
- Plinom hlađeni i grafitom moderirani reaktori I generacije (GCR).

Reaktori za koje se danas smatra da imaju najveće potencijalne mogućnosti daljnjeg razvoja su:

- Visokotemperaturni plinom hlađeni reaktori (HTGR)
- Brzi reaktori oplođivači hlađeni sa tekućim metalima (LMFBR).

Vjerojatno je, međutim, da će se pored navedenih najrasprostranjenijih i perspektivnih tipova reaktora (s izuzetkom plinom hlađenih reaktora I generacije), u pojedinim zemljama i dalje graditi drugi reaktorski tipovi, koji su u tim zemljama razvijeni i čije pogonske karakteristike zadovoljavaju. Ovo se prvenstveno odnosi na plinom hlađene reaktore II generacije (AGR), grafitom moderirane lakovodne reaktore (LWGR), a eventualno i na teškovodne reaktore hlađene običnom vodom (SGHWR).

Za vrijeme stavljanja reaktora u pogon, sve dok se ne postigne potrebna snaga, ovisna o broju raspada u jedinici vremena, mora biti ispunjen uvjet, da broj neutrona koji raspadom jedne jezgre izazivaju raspade drugih jezgara bude veći od jedan. Ako se s n_2 označi broj neutrona u nekoj generaciji, a s n_1 broj neutrona u prethodnoj generaciji, za vrijeme stavljanja u pogon mora biti $n_2 > n_1$. Pomoću broja neutrona iz

dvije sukcesivne generacije određuje se faktor multiplikacije k prema slijedećem izrazu:

$$k = n_2/n_1. \qquad (88)$$

Dakle, pri stavljanju reaktora u pogon mora biti faktor multiplikacije $k > 1$. Kad je dostignut broj neutrona u jedinici vremena dovoljan za potrebnu snagu, mora se održavati konstantnost broja neutrona, pa je u tom slučaju $n_2 = n_1$. U stacionarnom pogonu, prema tome, faktor multiplikacije iznosi $k = 1$. Međutim, kad se želi obustaviti rad reaktora, potrebno je stvoriti takve uvjete da iz generacije u generaciju opada broj neutrona, dakle da bude $n_2 < n_1$ i da faktor multiplikacije bude manji od 1 ($k < 1$). Prema navedenome, o vrijednosti faktora multiplikacije ovisi tok lančane reakcije. Zahtjev je za reaktore, da trebaju omogućiti regulaciju faktora multiplikacije, koji će biti takav da će označiti stavljanje u pogon, normalan pogon i obustavljanje reaktora bez problema.

2.3.4. NUKLEARNA FUZIJA

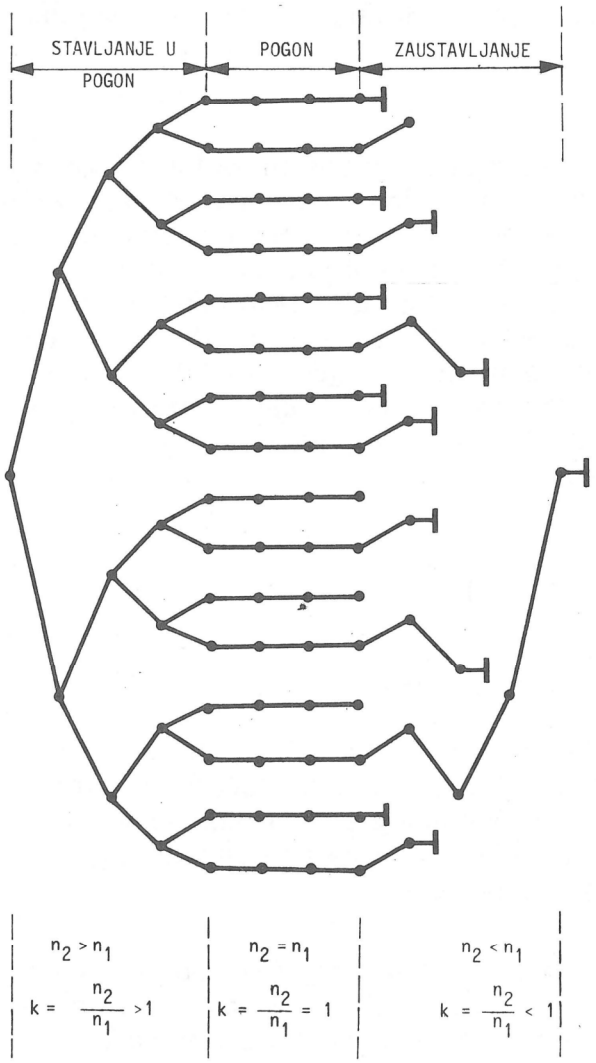
2.3.4.1. Općenito o značenju fuzije

Spajanje lakih jezgara (slika 27), tj. fuzija, vodi nastajanju jezgre s većom prosječno oslobođenom energijom, što znači da se u tom procesu oslobađa energija. Proces fuzije od fundamentalnog je značenja za naš opstanak: energija koju zrači Sunce nastaje pri fuziji lakih jezgara u dubini njegove unutrašnjosti, u uvjetima ekstremnih tlakova i temperatura.

Prije, ne tako mnogo godina, nije bilo zamislivo da bi se na zemlji mogli stvoriti uvjeti za fuziju jezgara. Međutim, pri atomskim eksplozijama od 1945. godine na dalje, ti su uvjeti ostvareni u centru atomske vatrene kugle.

Kao što je poznato, ubrzo su fisione atomske eksplozije bile upotrebljene za iniciranje fuzije, pa su razvijene tzv. hidrogenske bombe sa strahovitim razornim djelovanjem prema kojima su fisione bombe, poput onih bačenih na Hirošimu i Nagasaki, prave igračke.

Privođenje fuzije miroljubivoj upotrebi za proizvodnju energije pokazalo se kao mnogo teži problem. Privlačnost i značenje kontrolirane fuzije je takvo da se u velikom broju istraživačkih centara ulažu veliki napori i sredstva u njegovo rješenje. Dugoročno rješenje energetskih problema čovječanstva leži u kontroliranoj fuziji, u procesu koji se u našem Suncu odvija milijunima i milijunima godina. Sigurno je, da ta dugoročna perspektiva opravdava napore koji se ulažu u ovladavanje fuzijom. Treba, međutim, istaći da fuziona energija ima važnost i za razdoblje prije iscrpljenja fisionih goriva. Po prirodi procesa pri fuziji se stvara daleko manje radioaktivnog materijala i problem radioaktivnog otpada je daleko manji, ili beznačajan. Nadalje, materijali koji se koriste za fuziju ne mogu se zloupotrijebiti, kao što je to sa plutonijem iz oplodnih reaktora. Korištenje nuklearne fuzije omogućilo bi nadalje, da se neobnovljiva fosilna goriva upotrijebe na racionalniji način, kao i da se uklone veoma ozbiljni utjecaji na okoliš vezani uz njihovo sagorijevanje.



Sl. 27. Shematski prikaz nastajanja i prestanka lančane reakcije

2.3.4.2. Fizikalne osnove fuzije

Fuzija, tj. spajanje lakih u teške jezgre može se usporediti sa sagorijevanjem, tj. kemijskim spajanjem slabije vezanih atoma ili molekula u kemijski jače vezane, s razlikom što je u fuziji oslobođena energija za istu količinu materije oko milijun puta veća.

Najvažnije fuzione reakcije su:

$D + D \rightarrow He^3 + n + 3.27\ MeV$
$D + D \rightarrow T + p + 4.03\ MeV$
$D + T \rightarrow He^4 + n + 17.6\ MeV$
$D + He^3 \rightarrow He^4 + p + 18.3\ MeV.$

Teški vodik, deuterij (D) s atomskom težinom dva, koji ulazi u sve navedene reakcije nalazi se u elementu vodiku kao izotopni sastojak jednim dijelom u pet tisuća. Iz jednog kubnog metra obične vode moglo bi se izdvojiti 0.2 lit. teške vode u kojoj se teški vodik (D) nalazi na mjestu običnog vodika (H). Ako bi teški vodik iz tih 0.2 lit "sagorijeli", D + D reakcijom bi se dobila fuziona energija od oko 10^9 kcal. To znači da svaka litra obične vode ima, u tom smislu, fuzioni energetski potencijal od 10^6 kcal,

dakle 100 puta više energije nego jedna litra lož ulja. Ova usporedba treba samo da olakša predodžbu o energijama koje se oslobađaju u nuklearnim procesima, i nipošto ne znači da smo doista u mogućnosti ovaj potencijal i iskoristiti.

Perspektiva je međutim, toliko privlačna da su napori što se čine u tom smjeru sasvim razumljivi. Rezerve fisione energije ograničene su rezervama urana, dok bi fuziona energija s vodom kao izvorom teškog vodika predstavljali neiscrpan izvor. Budući da se na fuziji radi već četrdesetak godina, a nema sumnje da problem nije još riješen, teškoće moraju biti znatne. U čemu se one sastoje? Deuteroni, koje valja spajati da bi se oslobodila fuziona energija, nabijene su čestice, pa se odbijaju na udaljenostima na kojima još ne djeluju, inače znatno snažnije ali kratkog dosega nuklearne sile.

Potreban je relativno mali ulog energije radi svladavanja električne odbojne sile prije no što može doći do oslobođenja daleko veće nuklearne energije. Dovede li se ta početna energija u formi toplinske energije plinu deuteriju, fuziona reakcija će početi kada kinetička energija čestica u plinu teškog vodika postane dovoljna za svladavanje odbojnih sila. Naziv termonuklearna reakcija za fuzionu reakciju i dolazi upravo odatle što je zagrijavanje deuterija način za dovođenje početnog energetskog uloga. Time se ujedno dolazi do problema koji se javljaju u nastojanjima da se oslobodi fuziona energija. Naime, potrebne temperature iznose 100 milijuna stupnjeva ili više. Čini se u prvi mah da ovaj zahtjev pretvara fuziju u neostvarivu iluziju. To su temperature koje vladaju u unutrašnjosti Sunca i zvijezda. Iznimno, u uvjetima nuklearnih eksplozija javljaju se i na Zemlji.

Temperature od 10.000 stupnjeva u laboratoriju bile su nedostižne prije tridesetak godina. No, napredak je u tom pogledu bio izvanredan. Danas se u plinskoj plazmi, tj. neutralnoj smjesi pozitivnih i negativnih iona, vec postižu temperature od više desetaka, pa i sto milijuna stupnjeva. Međutim, visoka temperatura je samo jedan od problema.

Nije dovoljno samo postići temperaturu od 100 milijuna stupnjeva. Za razvoj termonuklearne reakcije treba temperaturu održati u plazmi dovoljne gustoće i dovoljno dugo. Naime, i kada se dva deuterona s dovoljnim energijama za nuklearnu reakciju sudare, doista će do reakcije doći tek rijetko, prema kvantno-mehaničkoj vjerojatnosti procesa, izraženoj udarnim presjekom za termonuklearnu reakciju. Vjerojatnost je dana po jednom sudaru, i potrebna je stoga što veća gustoća plazme kako bi se povećao broj sudara. Kvantitativan izraz ovih zahtijeva je tzv. Lawsonov kriterij, prema kojemu je uvjet za pozitivnu bilancu uložene i fuzijom dobivene energije da produkt gustoće plazme i vremena τ u kojem se ona drži na fuzijskoj temperaturi, ima određenu vrijednost.

Izrazi li se gustoća plazme s brojem čestica u cm^3, n, onda produkt $n \times \tau$ treba biti jednak ili veći od 10^{14} $cm^{-3}s$ za D - T reakciju. Za D - T reakciju produkt mora biti i veći.

Zbog toga, kada se govori o fuziji misli se sasvim određeno na D - T reakciju. Time se ujedno dolazi do novog problema. Gorivo je smjesa deuterija i tricija. No, tricij je nestabilna jezgra i u prirodi se ne nalazi, to je isključeno njegovim poluvremenom raspada 12 godina. On može nastati samo u nuklearnim pretvorbama. Prema tome tricij za fuzijske reaktore treba proizvoditi. Po današnjim predodžbama o fuzijskom reaktoru tricij će se proizvoditi iz litija reakcijama.

$$Li^6 + n \rightarrow T + He^4 + 4.8\ MeV$$
$$Li^7 + n \rightarrow T + He^4 + n - 2.8\ MeV$$

Prostor u kojem se odvija termo-nuklearna reakcija bit će okružen debelim slojem tekućeg litija u kojem se brzi neutroni iz D - T reakcije moderiraju i tako predaju svoju energiju litiju ali i izazivaju nuklearne reakcije u kojima se litij cijepa i proizvodi tricij. Cirkulacijom tekućeg litija odvodit će se termo-nuklearna energija i produkti koji nastaju reakcijom, tj. helij i tricij.

Budući da je litij materijal iz kojeg se stvara tricij rezerve litija odlučene su za dugoročnu perspektivu fuzione energije D - T reakcijom. Rezerve litija u slanim močvarama i moru su praktički neiscrpne jer je litij petnaesti element po koncentraciji u morskoj vodi, u kojoj ga ima 0.13 dijelova na milijun (urana samo 0.003 dijelova na milijun).

2.3.4.3. Ostvarenje fuzijskih uvjeta

Problem održavanja plazme dovoljno dugo na potrebnoj temperaturi je problem njene termičke izolacije od stijenki posude u kojoj se nalazi. Naravno da nikakvi materijali za to ne doalze u obzir. Postoje dva načina za uspostavljanje uvjeta za fuzionu reakciju.

Prvi koristi magnetske sile. Sa prikladnim konfiguracijama magnetskih polja može se plazma prisiliti da se drži osi cilindrične ili toroidalne posude. Ovo, tzv. magnetsko ograničenje plazme nije stabilno i to je nestabilnije što je veća gustoća plazme.

Druga metoda počiva na principu veoma brzog zagrijavanja plazme, tako da se termo-nuklearna reakcija razvije prije nego što zagrijana plazma ekspandira ispod gustoće tražene Lawsonovim kriterijem. Ovakvo ograničenje plazme naziva se inercionim, ekspanzija plazme ograničena je samo inercijom sastojaka.

U odnosu na drugu, prva se metoda može danas nazvati konvencionalnom. Razvija se u mnogo laboratorija, a ispituje se niz različitih konfiguracija magnetskih polja. Druga je metoda relativno nova. Zagrijavanje plazme obavlja se laserima i njen je uspon vezan za razvoj lasera sposobnih za davanje vrlo velikih snaga u veoma kratkim vremenskim razmacima.

S obzirom na stanje istraživanja status ove metode je neodređeniji, pa je danas teško objektivno ocijeniti perspektivu i relativnu važnost ovog načina ograničenja plazme.

U svakom slučaju najveći dio istraživanja ide na prvu metodu, i predodžbe o fuzijskom reaktoru razvijaju se na pretpostavci magnetskog ograničenja. Tehnološki su problemi budućeg fuzijskog reaktora te koncepcije mnogo bolje definirani.

Osnovni preduvjet koji se mora ispuniti želi li se razviti termonuklearnu reakciju je zagrijavanje plazme na 100 milijuna stupnjeva ili više. To nije jedini problem, a niti najteži u fuziji, ali svakako jedan od problema. Metode zagrijavanja plazme su različite, počevši od omske, džulovom toplinom, koja je međutim, ograničena na relativno niske temperature, jer omski otpor plazme na visokim temperaturama naglo pada. Vrlo uspješna metoda zagrijavanja je magnetska kompresija plazme. Postignute su temperature od preko 100 milijuna stupnjeva.

Magnetska kompresija plazme izvodi se naglo rastućim magnetskim poljem paralelnim s osi cilindra ili torusa u kome se nalazi plazma. Postupak je poznat pod nazivom "Theta pinch". Osnovni problem pri komprimiranju plazme je nestabilnost

koja dovodi do toga da se mala nesimetrija magnetskih sila koja sa svih strana djeluje na plazmu pojačava i vrlo brzo plazmu izbacuje iz centralnog položaja u dodir sa stijenkom cilindra ili torusa.

Cilindrični uređaji karakterizirani su i problemom bježanja plazme na krajevima cilindra prilikom kompresije. Toroidalni uređaji nemaju takav problem, ali zato radijalno opadanje magnetskog polja s udaljenošću od centra torusa zahtijeva dodatno magnetsko polje, da bi se torus plazme mogao držati odvojen od zida torusa. Silnice dodatnog polja moraju obilaziti prsten plazme i mogu se proizvesti strujom kroz plazmu vanjskim strujnim namotajima. Budući da osnovno kompresiono polje usmjereno duž prstena plazme s dodatnim poljem formira ukupno polje čije silnice poput navoja na vijku obilaze prsten plazme, govori se o tzv. "screw pinch" konfiguraciji, o "vijčanoj" kompresiji plazme. Uređaji u kojima se "screw pinch" postiže s dodatnim poljem struje kroz plazmu poznati su pod imenom tokamak uređaja, po uređaju izgrađenom u Institutu Kurčatova u Moskvi. Uređaji sa zavojnicama za dodatno polje nazivaju se stellaratorima po ovakvom uređaju sagrađenom u Princetonu, SAD. Svaka konfiguracija za ograničenje i grijanje plazme ima svojih specifičnosti. Dok stellaratori rade u stacionarnom režimu, uređaji tipa tokamak rade pulsno, a struja pokrenuta indukcijom u plazmi služi istovremeno za zagrijavanje plazme i za stvaranje dodatnog stabilizacionog polja.

Izvjesna predodžba o tome koliko su se postojeći uređaji približili uvjetima nužnim za fuziju može se dobiti iz postignutih temperatura, te usporedbom postignutih vrijednosti produkata gustoće i vremena ograničenja s Lawsonovim kriterijem. Za ocjenu vrijednosti rezultata valja uvažiti to, da se u današnjoj fazi pojedini tipovi uređaja usmjeravaju na ostvarenje samo jednog dijela uvjeta, npr. temperature ili gustoće plazme. Tek će se u kasnijoj fazi moći izabrati najpovoljnija konfiguracija za ostvarenje svih potrebnih uvjeta istovremeno. Velike nade u dostignuće fuzionih uvjeta pobudili su rezultati dobiveni oko 1970. na uređaju tipa tokamak u institutu Kurčatova. Postignuta je vrijednost produkta n oko 10^{12} cm^{-3} s, iako pri razmjerno niskoj temperaturi. Iza toga u nizu zemalja intenzivirano je istraživanje na ovom tipu uređaja i usljedila su daljnja poboljšanja. Sa sovjetskim tokamakom T-10, te američkim PLT (Princeton Large Thorus) i ALCATOR postignuto je do 1976. povećanje produkta u n za još jedan red veličine, do 10^{13} cm^{-3} s. Još jedno takvo povećanje dovodi do fuzionih uvjeta. S tim ciljem gradi se nekoliko velikih uređaja tipa tokamak.

Prvi će ući u pogon američki uređaj Doublet III. Na temelju iskustva na ranijim uređajima očekuje se dostignuće temperature od 50 milijuna stupnjeva i n = 10^{14} cm^{-3} s. Slijedit će američki TTFR (Tokamak Test Fusion Reactor), japanski JF-60, sovjetski tokamak T-10 M, te zajednički evropski pothvat JET (Joint European Tours). S ovim posljednjim očekuje se vrijednost n = 5×10^{14} cm^{-3} s, tj. premašenje fuzionih uvjeta.

"Theta pinch" uređaji uspijevaju postići visoke temperature magnetskom kompresijom plazme. U takvim linearnim uređajima slobodnih krajeva postiže se temperatura od više desetaka milijuna stupnjeva, a u uređaju s krajevima zatvorenim s tzv. zrcalima koja sprečavaju izlaz plazmi pri kompresiji postignuta je fantastična temperatura od 200 milijuna stupnjeva (Phoenix II, Culham, Velika Britanija).

Jedna od linija istraživanja ide upravo za tim da se povoljne karakteristike linearnih "Theta pinch" sistema sačuvaju i u toroidalnoj konfiguraciji bitnoj za produženje vremena stabilnosti plazme.

Paralelno s razvojem uspostavljanja uvjeta za fuzijsku reakciju ocrtavaju se i tehnološki problemi budućeg fuzijskog reaktora. Jedan od njih bit će radijaciono oštećenje materijala. Energija proizvedena u D - T reakciji prenosi se iz plazme najvećim dijelom brzim neutronima, što znači da će kroz stijenke posude u kojoj se nalazi plazma prolaziti neobično intenzivan neutronski tok koji će svoju energiju predati zaustavljajući se na debelom vanjskom omotaču od litija. Radijaciono opterećenje prvog zida posude bit će veoma veliko, a dozvoljeno opterećenje od odlučnog efekta na ekonomiku fuzijskog reaktora.

Kod metode inercionog ograničenja plazme magnetsko se polje ne koristi za stabilizaciju, pa prema tome čitava jedna grupa problema otpada. Fizikalni, a dobrim dijelom i tehnološki problemi su sasvim drugi u ovoj metodi ekstremno brzog zagrijavanja pomoću lasera. Problem specifičan za ovaj prilaz fuziji je razvoj lasera sposobnih da emitiraju ogromnu snagu kroz vrlo kratko i točno kontrolirano vrijeme. Vremenski i prostorno koncentriran laserski puls isparava kruti deuterij i pretvara ga u vruću plazmu velike gustoće u kojoj se reakcija može odvijati sve dok ekspanzijom njena gustoća ne padne ispod vrijednosti nužne po Lawsonovom kriteriju. Da bi se i ovdje dobila predodžba o problemima što ih valja riješiti bit će potrebno navesti tipične procjene zahtijeva na potreban laserski puls.

Za isparavanje i zagrijavanje do temperature od 10^7 stupnjeva sitne kuglice deuterija dimenzija oko 10^{-2} cm potrebna je energija od 10 J.

No, zagrijavanje treba izvršiti u vremenu oko 10^{-9} sekunde, što znači trenutnu snagu od 10 000 MW.

Da bi se dobila pozitivna bilanca energije nužan bi bio laserski puls još mnogo veće energije, iznad 10^6 J, u trajanju od 10^{-9} sekunde. Iako se u procesu zagrijavanja plazme kriju još mnoge nepoznanice, pa su procjene potrebne energije ovisne o mnogim pretpostavkama, sigurno je da su rezultati svih procjena daleko iznad mogućnosti današnjih lasera.

Laseri s neodimijem kao aktivnim materijalom sposobni su za energije do oko 10^4 J, ali nije vjerojatno da bi se mogli razviti do potrebnih vrijednosti. Smatra se da veću perspektivu imaju laseri s CO_2 kao aktivnim materijalom.

Veoma je interesantan razvoj po kojem bi se zahtijevi na lasersku energiju reducirali za dva ili tri reda veličine i time se sasvim približili mogućnostima i današnjih lasera.

Do ove znatno povoljnije situacije došlo bi se novim principom komprimiranja plazme daleko iznad gustoće krutog tijela, obasjavanjem kuglice deuterija sa svih strana. Pri tom se isparavaju vanjski slojevi kuglice, a rezultirajuća reakcija komprimira ostatak. Pri tome se postavljaju vrlo određeni zahtjevi na vremenski tok porasta laserskog pulsa. Eksperimenti su u toku i mnogi smatraju da će se laserskom fuzijom doći do pozitivne energetske bilance prije nego u magnetski ograničenoj plazmi. U svakom slučaju, laseri su područje vrlo dinamičnog razvoja i nove ideje i rezultati mogu sasvim izmijeniti današnja predviđanja.

Tabela 2. ELEMENTI - njihovi atomski brojevi i simboli

Atomski broj	Ime	Simbol	Atomski broj	Ime	Simbol
1	Vodik	H	54	Ksenon	Xe
2	Helij	He	55	Cezij	Cs
3	Litij	Li	56	Barij	Ba
4	Berilij	Be	57	Lantan	La
5	Bor	B	58	Cer	Ce
6	Ugljik	C	59	Praseodimij	Pr
7	Dušik	N	60	Neodimij	Nd
8	Kisik	O	61	Prometij	Pm
9	Fluor	F	62	Samarij	Sm
10	Neon	Ne	63	Europij	Eu
11	Natrij	Na	64	Gadolinij	Gd
12	Magnezij	Mg	65	Terbij	Tb
13	Aluminij	Al	66	Disprozij	Dy
14	Silicij	Si	67	Holmij	Ho
15	Fosfor	P	68	Erbij	Er
16	Sumpor	S	69	Tulij	Tm
17	Klor	Cl	70	Iterbij	Yb
18	Argon	Ar	71	Lutecij	Lu
19	Kalij	K	72	Hafnij	Hf
20	Kalcij	Ca	73	Tantal	Ta
21	Skancij	Sc	74	Volfram	W
22	Titan	Ti	75	Renij	Re
23	Vanadij	V	76	Osmij	Os
24	Crom	Cr	77	Iridij	Ir
25	Mangan	Mn	78	Platina	Pt
26	Željezo	Fe	79	Zlato	Au
27	Cobalt	Co	80	Živa	Hg
28	Nikl	Ni	81	Talij	Ti
29	Bakar	Cu	82	Olovo	Pb
30	Cink	Zn	83	Bizmut	Bi
31	Galij	Ga	84	Polonij	Po
32	Germanij	Ge	85	Astatin	At
33	Arsen	As	86	Radon	Rn
34	Selen	Se	87	Francij	Fr
35	Brom	Br	88	Radij	Ra
36	Kripton	Kr	89	Aktinij	Ac
37	Rubinij	Rb	90	Torij	Th
38	Stroncij	Sr	91	Protaktinij	Pa
39	Itrij	Y	92	Uran	U
40	Cirkonij	Zr	93	Neptunij	Np
41	Niobij	Nb	94	Plutonij	Pu
42	Molibden	Mo	95	Americij	Am
43	Tehnecij	Tc	96	Kurij	Cm
44	Rutenij	Ru	97	Berkelij	Bk
45	Rodij	Rh	98	Kalifornij	Cf
46	Paladij	Pd	99	Einsteinij	Es
47	Srebro	Ag	100	Fermij	Fm
48	Kadmijum	Cd	101	Mendelevij	Mv
49	Indij	In	102	Nobelij	No
50	Kositar	Sn	103	Lavrencij	Lw
51	Antimon	Sb	104	Rutherfordij	Rf
52	Telur	Te	105	Hahnij	Ha
53	Jod	J			

Tabela 3.

Radioaktivni element	Simbol	Radijacija čestica	Vrijeme poluraspada
Uran	U-238	α	4.51×10^{9} godina
Torij	Th-234	β	24.10 dana
Protaktinij	Pa-234	β	1.18 minuta
Uran	U-234	α	2.48×10^{5} godina
Torij	Th-230	α	8.00×10^{4} godina
Radij	Ra-226	α	1.62×10^{3} godina
Radon	Rn-222	α	3.82 dana
Polonij	Po-218	α i β	3.05 minuta
Olovo (99.98%)	Pb-214	β	26.80 minuta
Astatij(0.02%)	At-218	α	2.00 sekundi
Bizmut	Bi-214	α i β	19.70 minuta
Polonij (99.96%)	Po-214	α	1.60×10^{-4} sekundi
Talij (0.04%)	Tl-210	β	1.32 minute
Olovo	Pb-210	β	19.40 godina
Bizmut	Bi-210	α i β	5.00 dana
Polonij (~100%)	Po-210	α	138.40 dana
Talij (2×10^{-4}%)	Tl-206	β	4.20 minuta
Olovo	Pb-206	Stabilno	

Tabela 4.

Radioaktivni element	Simbol	Radijacija čestica	Vrijeme poluraspada
Torij	Th-232	α	1.39×10^{10} godina
Radij	Ra-228	β	6.70 godina
Aktinij	Ac-228	β	6.13 sati
Torij	Th-228	α	1.91 godina
Radij	Ra-224	α	3.64 dana
Radon	Rn-220	α	52.00 sekundi
Polonij	Po-216	α	0.16 sekundi
Olovo	Pb-212	β	10.60 sati
Bizmut	Bi-212	α i β	60.50 minuta
Polonij (66.3%)	Po-212	α	3×10^{-7} sekundi
Talij (33.7%)	Tl-208	β	3.10 minuta
Olovo	Pb-208	Stabilno	

Tabela 5.

Radioaktivni element	Simbol	Radijacija čestica	Vrijeme poluraspada
Uran	U-235	α	7.13×10^{8} godina
Torij	Th-231	β	25.60 sati
Protaktinij	Pa-231	α	3.43×10^{4} godina
Aktinij	Ac-227	α i β	21.80 godina
Torij (98.8%)	Th-227	α	18.40 dana
Francij (1.2%)	Fr-223	β	21.00 minuta
Radij	Ra-223	α	11.70 dana
Radon	Rn-219	α	3.92 sekunde
Polonij	Po-215	α i β	1.83×10^{-3} sekundi
Olovo (~ 100%)	Pb-211	β	36.10 minuta
Astatij (5×10^{-4}%)	At-215	α	1.00×10^{-4} sekundi
Bizmut	Bi-211	α i β	2.16 minuta
Polonij (99.7%)	Po-211	α	0.52 sekunde
Talij (0.3 %)	Tl-207	β	4.78 minuta
Olovo	Pb-207	Stabilno	

Tabela 6.

Radioaktivni element	Simbol	Radijacija čestica	Vrijeme poluraspada
Plutonij	Pn-241	β	13.20 godina
Amercij	Am-241	α	462.00 godine
Neptunij	Np-237	α	2.20×10^{6} godina
Protaktinij	Pa-233	β	27.40 dana
Uran	U-233	α	1.62×10^{5} godina
Torij	Th-229	α	7.36×10^{3} godina
Radij	Ra-225	β	14.80 dana
Aktinij	Ac-225	α	10.00 dana
Francij	Fr-221	α	4.80 minuta
Astabij	At-217	α	1.80×10^{-2} sekundi
Bizmut	Bi-213	α i β	47.00 minuta
Polonij (98%)	Po-213	α	4.20×10^{-6} sekundi
Talij (2%)	Tl-209	β	2.20 sekundi
Olovo	Pb-209	β	3.32 sata
Bizmut	Bi-209	Stabilan	

2.4. PRETVORBA UNUTRAŠNJE TERMIČKE U MEHANIČKU ENERGIJU

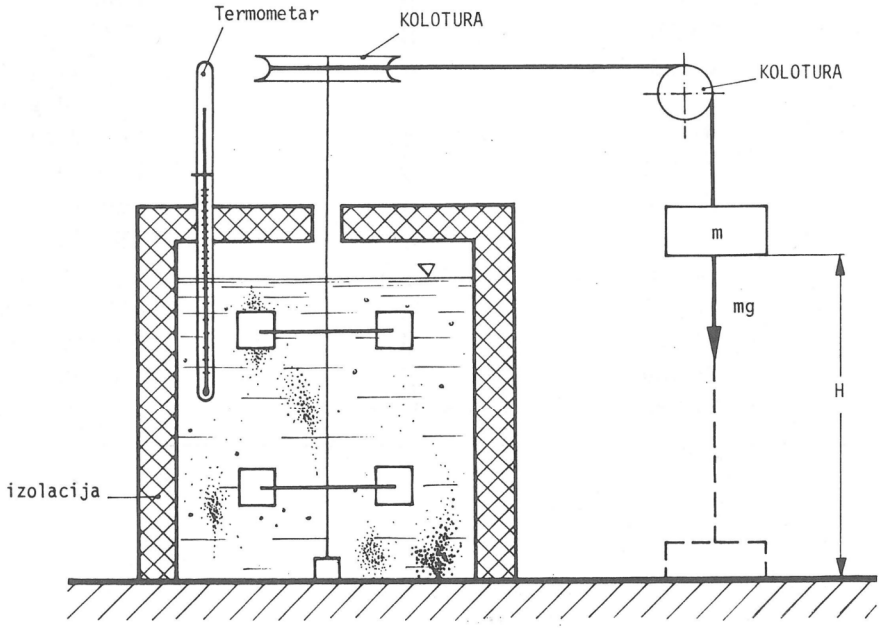
2.4.1. OPĆENITO O PRETVORBI UNUTRAŠNJE TERMIČKE ENERGIJE

U poglavlju 2.2, u kome je opisan proces izgaranja, navedeno je da je za pretvorbu unutrašnje termičke energije u mehaničku energiju potreban kružni proces. Kružni proces se ostvaruje u toplinskim strojevima pomoću medija koji uz snižavanje temperature ekspandira od višeg na niži tlak. Takvom ekspanzijom proizvodi se rad koji se s medija prenosi na pokretne dijelove toplinskog stroja, a stroj daje na raspolaganje mehaničku energiju.

Načini dobivanja topline opisani su u drugim poglavljima, pa će se u ovom dijelu opisane pretvorbe energije dati samo kroz opis karakterističnih kružnih procesa i temeljnih značajki ukupnog djelovanja svakog od njih.

Kod svih ovih pretvorbi ukupni stupanj djelovanja neće (u najboljem slučaju) doseći 0.5. Obrnuti proces tj. pretvaranje potencijalne odnosno kinetičke (mehaničke) energije u toplinu teče jednostavno i bez gubitaka (uz zanemarenje mehaničkih gubitaka trenja). Za ilustraciju navodi se Jouleov pokus (sl. 28). Potencijalna energija mase (m) pomakom (prostim padom) za visinu H pretvara se u kinetičku energiju. Preko prenosnih kolotura ova energija pokreće (vrti) lopatice koje su uronjene u vodu. Lopatice trenjem stvaraju toplinu koja se prenosi na masu vode (m_v) kojoj će temperatura porasti za neki ΔT. Mehanička energija mase m (utega), ako se zanemare gubici trenja, cijelim se iznosom pretvara u toplinsku energiju (unutarnja energija vode). Slična se pojava događa na kočnicama vozila, gdje se mehanička (kinetička) energija vozila pretvara u toplinsku energiju koja grije dijelove kočnica i dalje se prenosi na okolinu.

Dakle, pretvorba mehaničke energije u toplinsku energiju je spontana i



Sl. 28 Prikaz Jouleov-a pokusa

jednostavna i bez gubitaka. Obrnuti proces (pretvorbe unutrašnje energije u mehaničku energiju) je opterećen gubicima i o tome govori drugi glavni stavak termodinamike.

Mediji koji služe za prenošenje unutrašnje termičke energije u mehaničku energiju su plinovi i pare. S obzirom na način korištenja pogonskog medija toplinski strojevi dijele se na stapne strojeve i turbostrojeve. Kod stapnih strojeva stap je dio stroja na koji se prenosi rad medija, a kod turbostrojeva su to rotorske lopatice.

Da bi se mogli razumijeti kružni procesi i rad strojeva koji unutrašnju energiju pretvaraju u mehaničku, potrebno je nešto više reći o mehaničkom radu.

Mehanički rad je umnožak vektora sile i puta, pa se može postaviti da je

$$W_{AB} = {}_A\int^B \vec{F} \cdot \vec{ds} \qquad (89)$$

gdje su A i B točke između kojih se vrši rad, $\vec{F}$ vektora sile i $\vec{ds}$ vektor puta. Ako se hvatište sile kreće u smjeru sile u tom slučaju mehanički se energija dovodi sistemu i obratno. Prema tome mehanički rad se pojavljuje samo uz međusobno djelovanje sistema i okoline.

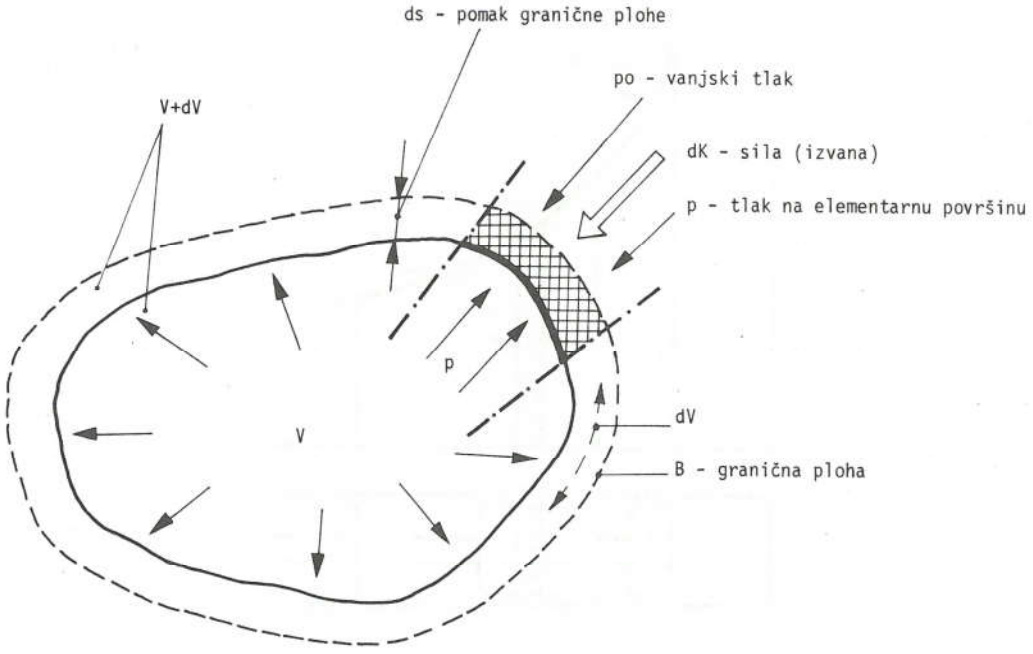
Ako se definicija mehaničkog rada primjeni na sistem u prostoru s koordinatama x, y i z, te brzinama v_A i v_B, izraz za izvršeni mehanički rad između točaka A i B glasi:

$$- W_{AB} = mg\,(z_B - z_A) + m/2\,(v_B^{\,2} - v_A^{\,2}) \qquad (90)$$

gdje je m masa promatranog sistema.

Ako pak na sistem koji miruje u prostoru (sl. 29) djeluju sile okomito na njegove granice, pojavit će se pomak granica sistema, a s tim i promjena volumena. Prirast volumena je:

$$dV = \int_A ds \times dA. \qquad (91)$$



Sl. 29 Shema uz definiciju sile i pomaka

Za mali pomak ds površine dA ostvaruje se mali prirast volumena dV, pa je elementarni rad

$$dW = {}_A\int p \times dA \times ds = p\ {}_A\int dA \times ds = p \times dV. \qquad (92)$$

Za konačno velike promjene stanja, kad se mijenja osim volumena i tlak, rad je:

$$W = \int_{V_A}^{V_B} \frac{dV}{P} F = \int_{V_A}^{V_B} p\ dV \qquad (93)$$

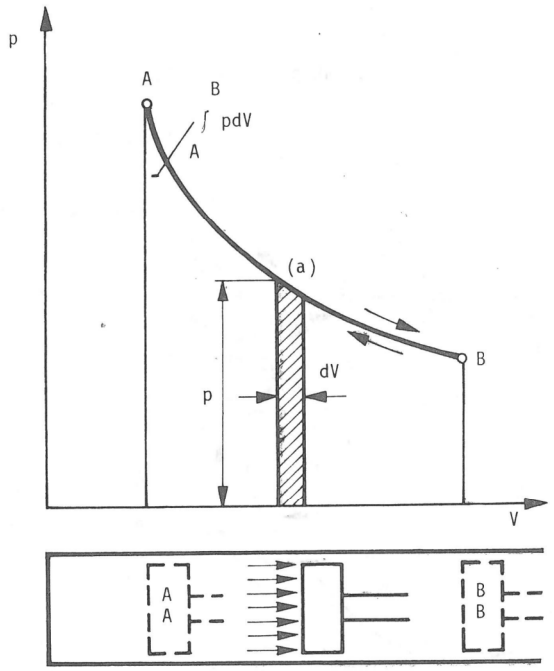
gdje je p tlak jednak kvocjentu sile F i površine P.

Ako nema promjene volumena (dV = o), medij ne vrši nikakav rad bez obzira na porast tlaka p.

Navedeni izraz vrijedi samo kad je promatrani sistem u stanju ravnoteže, a pod pojmom ravnoteže podrazumijeva se stanje u kome je brzina malena prema brzini zvuka u promatranom plinu koja se kreće od 300 do 1000 m/s ovisno o vrsti plina i njegovoj temperaturi.

Ako se povećava volumen plina govori se o ekspanziji plina, a ako se volumen smanjuje govori se o kompresiji plina. Kod ekspanzije plina sistem predaje mehaničku energiju, a kod kompresije plina sistemu se dovodi mehanička energija. Količina dobivene ili dovedena mehanička energija ovisi ne samo o početnom i konačnom stanju (točka A i B) nego i o promjenama između tih krajnih vrijednosti (sl. 30).

U slučaju da pored promjene volumena postoji i trenje između plina (tekućine) i tijela koje se kreće ili rotira, mehanički rad jednak je



Sl. 30. Odredjivanje mehaničkog rada promjenom volumena

$$W_{AB} = {}_A\int^B p \times dV + W_{TAB} \qquad (94)$$

gdje je W_{TAB} energija potrebna za savladavanje trenja od stanja A do stanja B.

Pri promatranju radnje trenja važno je znati da je ona uvijek dovedena u sistem ili je u graničnom slučaju jednaka nuli.

Povratljivim procesom naziva se proces kod kojega su gubici energije jednaki nuli, a ako postoje gubici energije u tom slučaju se govori o nepovratljivom procesu.

Unutrašnja energija je svojstvo termodinamičkog sistema, a sastoji se od kinetičke energije molekula koje se kreću i potencijalne energije koja je posljedica privlačnih i odbojnih sila među molekulama. Ona ne prelazi granice sistema za razliku od mehaničke energije i topline.

Toplina je oblik energije koji prelazi granice sistema samo zbog postojanja razlike temperatura među sistemima i ako pri tome granica među sistemima propušta toplinu. Mehanička energija i toplinska energija (prelazni oblici energije) kada pređu granice sistema postaju unutrašnja energija sistema u koji su prešle.

Da bi se odredio adiabatski proces potrebno je uvažiti zakon o održanju energije i, prvi glavni stavak termodinamike, te sagledati odnose mehaničke energije, topline i unutrašnje energije.

Dovođenjem topline nekom sistemu (ΔQ) povećava se unutrašnja energija (ΔW_u) i mogućnost obavljanja mehaničkog rada (ΔW), prema tome je:

$$\Delta Q = \Delta W_u + \Delta W. \qquad (95)$$

Svaki od navedenih članova prethodne jednadžbe može imati pozitivnu ili negativnu vrijednost, a u nekim slučajevima može biti jednak nuli.

Ako je $\Delta Q = 0$, što znači da se sistemu (tijelu) ne dovodi niti odvodi toplina, u tom slučaju je

$$\Delta W = - \Delta W_u \qquad (96)$$

a što znači da se može dobiti rad isključivo na račun unutrašnje energije. Promjena stanja sistema ili tijela pri $\Delta Q = 0$ naziva se adijabatski proces.

Karakteristika zatvorenog sistema je da se u njemu ekspanzija medija može samo jednom iskoristiti za dobivanje mehaničkog rada, pa je kao takav neinteresantan za upotrebu. Da bi stroj bio upotrebljiv njemu treba dovoditi (prije kompresije) i odvoditi (nakon ekspanzije) pogonski medij. Sistem u kome se dovodi i odvodi pogonski medij naziva se otvoreni termodinamički sistem.

Mehanička energija predana iz otvorenog termodinamičkog sistema naziva se mehanički rad ili energija na osovini stroja.

Entalpija ili sadržaj topline pri konstantnom tlaku iznosi

$$I = W_u + pV. \qquad (97)$$

Navedeni izraz dobiva se iz spoznaje da dovedena toplina (sl. 31) nekom mediju mijenja unutarnju energiju i volumen medija uz zadržavanje konstantnog tlaka

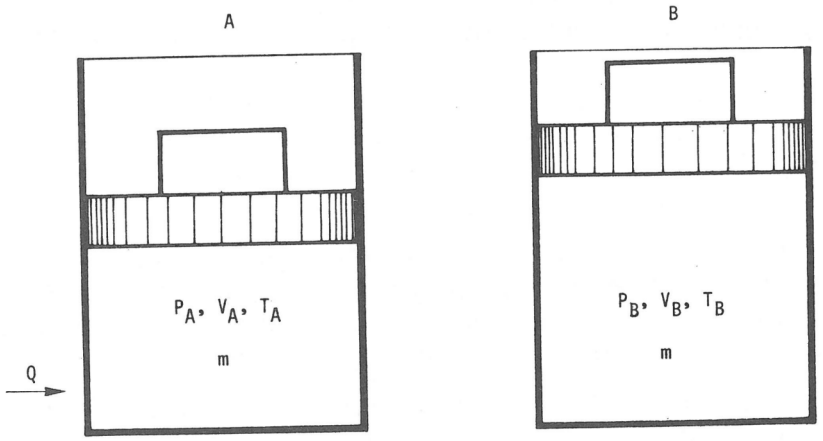
$$Q = W_{uB} - W_{uA} + p(V_B - V_A) \qquad (98)$$

ili

$$Q = (W_{uB} + pV_B) - (W_{uA} + pV_A). \tag{99}$$

Po definiciji za entalpiju u točki B i točki A može se pisati

$$Q = I_B - I_A . \tag{100}$$



Sl. 31. Prikaz promjene dovedene topline

Specifična entalpija je mnogo češće u upotrebi, a odnosi se na jedinicu mase medija

$$i = I/m \tag{101}$$

dok je specifična toplina po jedinici mase

$$q = Q/m \tag{102}$$

pa se može pisati

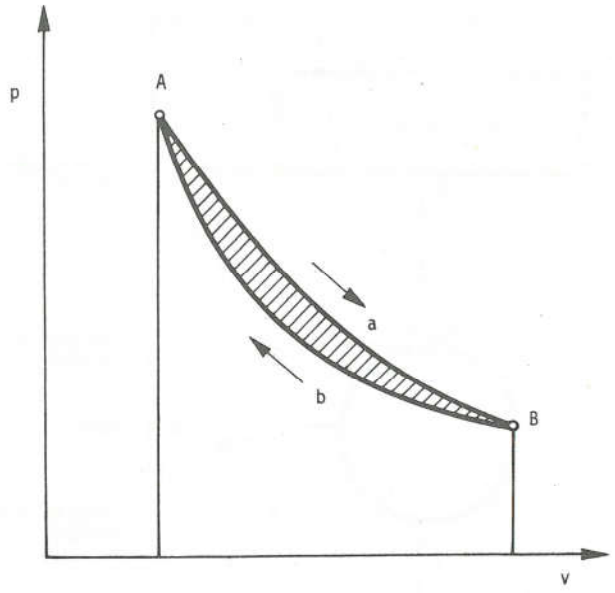
$$q = i_B - i_A. \tag{103}$$

Kružnim procesom (sl. 32) naziva se svaki proces koji termodinamički sistem ponovo dovodi u početno stanje, što znači da postoji kompresija i ekspanzija pogonskog medija. Kad bi kompresija (b) tekla po istoj krivulji po kojoj je izvršena ekspanzija (a), za kompresiju bi se utrošilo upravo onolika radnja kolika je dobivena pri ekspanziji. Stroj koji bi tako radio ne bi mogao obavljati nikakvu radnju, pa je radi toga potrebno da se za kompresiju utroši manje rada nego što se dobiva ekspanzijom. Razlika radnje ekspanzije i radnje kompresije je korisna energija koju stroj može dati.

Budući da se toplinskom stroju rad oduzima, procesi u toplinskom stroju moraju biti desnokratni (+), tj. promjena stanja koje čini medij u kružnom procesu moraju teći u smjeru kazaljke na satu (sl. 32).

Osim toplinskog stroja u procesu pretvorbe energije sudjeluje i okolina. Prema slici 33 sistem se sastoji od toplinskog stroja i okoline.

S obzirom na to da je u točki A (sl. 32) početno i konačno stanje kružnog procesa isto, to je i unutrašnja energija na početku i na kraju procesa ista. Prema



Sl. 32. Prikaz kružnog procesa u p-v dijagramu

tome radnja se mora obavljati ne na račun unutrašnje energije nego na račun topline dovedene izvana, pa je

$$W = Q_A - Q_B . \qquad (104)$$

Iz blok dijagrama na sl. 33. vidi se da toplinski stroj uzima toplinu Q_{dov} iz izvora topline (toplinskog spremnika, okoline), jednim dijelom je pretvara u rad, a ostatak vraća okolini, tj. rashladnom spremniku (ponoru topline). Odvedena toplina je onaj dio ukupne dovedene topline, koju toplinski stroj nikada neće moći pretvoriti u rad. Razlog tome je što svaka toplina ima svoju temperaturnu razinu. Toplinski stroj može dovedenu toplinu pretvarati u rad samo do vrijednosti temperaturne razine koja je približno jednaka temperaturnoj razini okoline. Približno jednaka razina zbog toga jer mora postojati neki temperaturni gradijent da toplina može prijeći na okolinu. Prema navedenome kod kružnog procesa gubi se veliki dio energije odnosno dovedene topline, koja se često naziva energija.

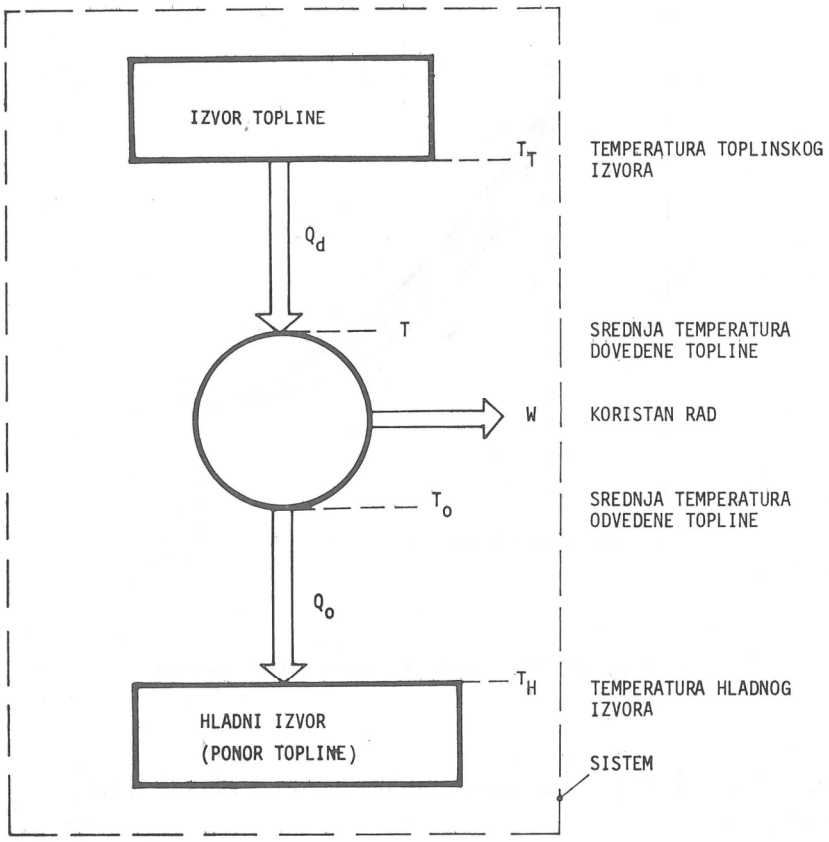
Jedan od najpoznatijih i sa stanovišta energije najboljih kružnih procesa je Carnot-ov proces i on se obično prikazuje u T-s dijagramu (temperatura - entropija).

Entropija je veličina stanja koja daje temelj za matematičku formulaciju drugog glavnog stavka termodinamike, s obzirom na to da je u svim procesima (otvorenim, zatvorenim, povrativim, nepovratljivim, mogućim i nemogućim) određeno početno i konačno stanje iz kojega se ne može zaključiti o kojoj se vrsti procesa radi, pa je bilo potrebno naći veličinu stanja koja će omogućiti prepoznavanje procesa - entropiju.

Temeljna obilježja entropije u adiabatskom sistemu su:

- da ostane konstantna kad se radi o povratljivom procesu
- da raste kad se radi o nepovratljivom procesu
- da opada kada se radi o procesu koji je nemoguć.

Iz navedenoga slijedi da se za zatvorene sisteme u koordinatnom sistemu (w_u -



Sl. 33 Blok dijagram rada toplinskog stroja i

specifična unutrašnja energija, i v - specifični volumen) može pisati za diferencijalne promjene (w_u i v) slijedeće jednadžbe:

$$d w_u + p \times dv > 0 \text{ za nepovratljiv proces} \quad (105)$$
$$d w_u + p \times dv = 0 \text{ za povratljiv proces} \quad (106)$$
$$d w_u + p \times dv < 0 \text{ za nemoguć proces} \quad (107)$$

dok se za otvoreni adiabatski sistem u koordinatnom sistemu (i-specifična entalpija i p- tlak) može pisati

$$di - v\,dp > 0 \text{ za nepovratljiv proces} \quad (108)$$
$$di - v\,dp = 0 \text{ za povratljiv proces} \quad (109)$$
$$di - v\,dp < \text{ za nemoguć proces.} \quad (110)$$

Budući da je iz mehanike poznato da je radnja jednaka umnošku sile i puta, to se analogno u toplinskim procesima može uzeti da je radnja (toplina) jednaka umnošku temperature T i neke veličine koja je definirana kao entropija (S), dakle

$$\Delta Q = T\,\Delta S \quad (111)$$

ili

$$\Delta S = \Delta Q/T. \quad (112)$$

Specifična entropija je

$$s = S/m \text{ (J/kg K)}, \quad (113)$$

U koordinatnom sustavu T - s (temperatura - entropija) entropija se određuje

na način prikazan na sl. 34. što znači da je entropija veličina stanja jednaka dovedenoj toplini.

U T-s dijagram (sl. 34) količina topline jednaka je površini ispod krivulje T = f(s) od stanja A do stanja B, dakle:

$$Q_{AB} = {}_A\int^B T\,ds.$$

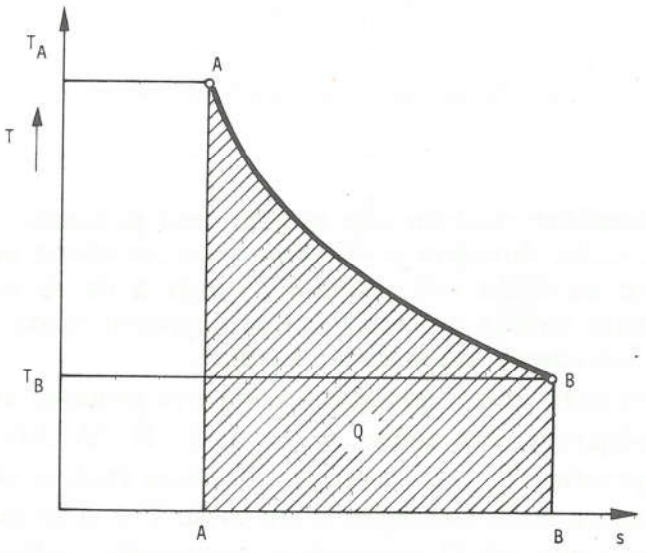
Dakle, površina ispod krivulje u p-v dijagramu predstavlja rad, a površina ispod krivulje u T-s dijagramu predstavlja toplinu.

S obzirom na mogućnosti promjene stanja promjenom volumena, tlaka i temperature, te promjenom stanja bez izmjene topline kao i promjene stanja uvjetovanih promjenama navedenih veličina, razlikuju se slijedeće promjene stanja

- izohorna promjena (V = konst.)
- izobarna promjena (p = konst.)
- izotermna promjena (T = konst.)
- adijabatska promjena (Q = 0)
- politropska promjena (V ≠ konst., p ≠ konst., T ≠ konst. i Q ≠ 0).

Kod svih promjena stanja pretpostavka je da se masa medija za vrijeme promjena ne mijenja, što znači, da za vrijeme promjene stanja medij niti dolazi niti odlazi.

Izotermičke i adijabatske promjene stanja su idealne promjene koje se mogu ostvariti samo ako su ispunjeni izvjesni uvjeti. Tako je pri izotermičkoj promjeni potrebno da se kod ekspanzije dovodi upravo toliko topline koliko se topline pretvara u mehaničku radnju. Samo pod tim uvjetom vršit će se ekspanzija na stalnoj temperaturi. Odstupa li dovođenje topline od toga, krivulja ekspanzije neće biti izoterma, već neka krivulja koja se više ili manje od nje razlikuje. Odstupanje od izoterme ovisi o tome koliko se dovođenje topline razlikuje od učinjene radnje. Isto vrijedi i za izotermičku kompresiju, jedino što kod kompresije treba odvoditi onoliko topline, kolika je učinjena vanjska radnja. Adijabatska promjena stanja vrši se naprotiv samo onda, ako se promjena stanja obavlja bez izmjene topline. Cilindar

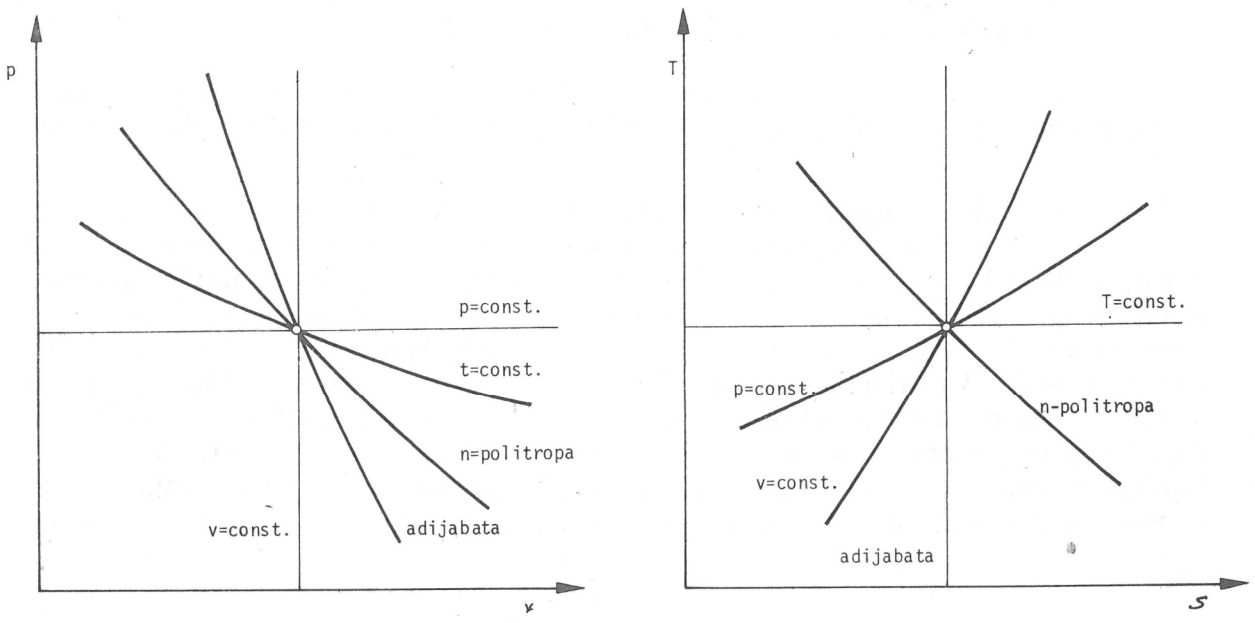


Sl. 34. Odredjivanje entropije u T-s dijagramu

mora pri toj promjeni stanja biti savršeno nepropusan za toplinu. Praktički se ti uvjeti ne mogu postići. Redovito ne uspijeva da se kod izotermičke promjene dovede, odnosno odvede, onolika količina topline, koja odgovara izvršenoj radnji, niti se može kod adijabatske promjene cilindar tako savršeno izolirati, da ne propušta toplinu. Stoga stvarne promjene stanja kod izvedenih strojeva odstupaju više ili manje od idealnih pretpostavljenih promjena.

Sve promjene stanja u p-v dijagramu mogu se preslikati u T-s dijagramu prema sl. 35. Politropska promjena stanja nalazi se između adijabatske i izoterme promjene stanja. Ne dovođenjem dovoljno količine topline za vrijeme ekspanzije ili njenim odvođenjem politropska krivulja promjene stanja ići će prema adiabatskoj krivulji i obratno.

Entropija se ne može zamijeniti niti mjeriti, pa je ona karakteristična veličina stanja tijela. Svakom stanju tijela odgovara neka druga vrijednost entropije.



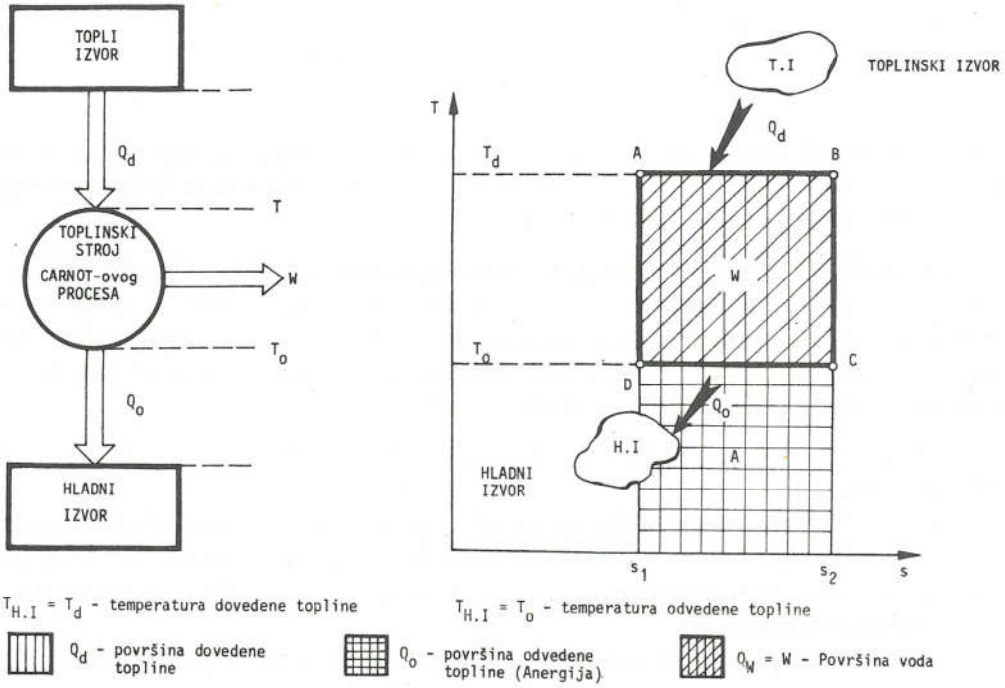
Sl. 35. Promjene stanja n p-v i T-s dijagramu

Za termodinamičke procese nije ni potrebno poznavati apsolutnu vrijednost entropije pojedinih tijela, dovoljno je odrediti samo promjenu entropije. Bitno je još naglasiti, da ako se na tijelu vrši promjena stanja a da se ne mijenja toplina,uz pretpostavku održanja medija entropija ostaje nepromijenjena. Promjena entropije ovisi o početnom i konačnom stanju tijela (medija).

Na sl. 36. prikazan je tok energije Carnot-ova procesa, koji se sastoji iz dvije izoterme i dvije adijabate. Od točke A do točke B (sl. 36) vrši se izotermička ekspanzija na temperaturi T_d i pri tome je dovedena toplina Q_d, koja je prikazana površinom ispod pravca A-B. Od točke B do točke C vrši se adijabatska ekspanzija bez izmjene topline, a od C do D izotermička kompresija s odvođenjem topline Q_o, a koja je jednaka površini ispod pravca C-D. Konačno se kružni proces zatvara adijabatskom kompresijom od točke D do A i medij se dovodi u početno stanje.

Razlika između ukupno dovedene topline i korisnog rada je odvedena toplina (anergija).

Mjerilo za iskorištenje topline u Carnotovu kružnom procesu daje omjer topline pretvorene u radnju prema ukupno dovedenoj toplini mediju



Sl. 36 Prikaz Anergije kod Carnot-ovog procesa u T-s dijagramu

$$\eta_t = \frac{Q_d - Q_o}{Q_d} = 1 - \frac{Q_o}{Q_d} \qquad (114)$$

Dovedena i odvedena toplina mogu se izraziti pomoću mase, temperature i razlike entropija, dakle:

$$Q_d = m\, T_d\, (s_2 - s_1) \qquad (115)$$

$$Q_o = m\, T_d\, (s_2 - s_1) \qquad (115a)$$

pa je toplinska korisnost

$$\eta_t = 1 - T_o/T_d \qquad (116)$$

ovisna samo o omjeru najviše i najniže temperature kružnog procesa. Ovo je teoretski (maksimalni) stupanj djelovanja koji bi se mogao postići kad bi Carnotov proces bio ostvarljiv. Iako je Carnotov proces neostvarljiv u praksi se on upotrebljava kao mjera za uspoređivanje sa svim ostalim procesima.

Termodinamički stupanj djelovanja nekog procesa određuje se iz jednadžbe:

$$\eta_T = \frac{\text{Iskoristiva energija}}{\text{Uložena energija}} = \frac{\text{Rad}}{\text{Dovedena toplina}} = \frac{W}{Q_d} \qquad (117)$$

što je ustvari odnos iskorištenog rada i uložene (dovedene) topline, ili jednostavnije rečeno udio dobivenog rada od ukupno dovedene topline toplinskom stroju.

Kod ostalih kružnih procesa toplina se ne dovodi niti odvodi pri konstantnim temperaturama, pa se stupanj djelovanja određuje pomoću srednje dovedene (T_{srd}) i srednje odvedene temperature

$$\eta_T = 1 - \frac{T_{sr_o}}{T_{sr_d}} \qquad (118)$$

Realni termički stupanj djelovanja u ovisnosti o temperaturama i o vrsti kružnog procesa kreće se od 0.2 ~ 0.5. To znači da se kod termokonverzije u prosjeku izgubi oko 65% dovedene topline toplinskom stroju.

Toplinski stroj preko nekog odabranog kružnog proces "proizvodi" iz dovedene topline rad. Svejedno je da li je to stapni stroj ili turbina. Naime, dovedenom toplinom povećava se unutrašnja energija pogonskom mediju (plinu ili pari), odnosno povećava mu se tlak i temperatura. Posljedica toga je pokretanje stapa u stapnom stroju ili rotacija turbinskog kola, a time se dobiva rad.

S obzirom na mogućnosti pretvorbi oblika energije može se zaključiti da postoje tri grupe i to:

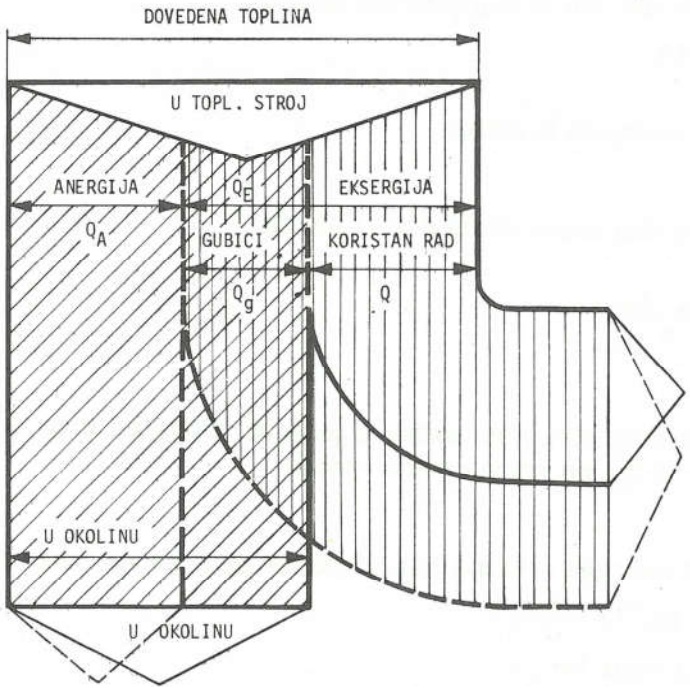
- Energija koja se može neograničeno pretvarati u druge oblike energije - eksergija. Međutim, potpune pretvorbe moguće su samo pomoću povratljivih porocesa. Ovoj grupi pripadaju: potencijalna, kinetička, mehanička i električna energija.
- Energija koja se može samo ograničeno pretvarati u druge oblike energije. U ovu grupu ubrajaju se unutrašnja energija i toplina. Ograničenje pretvorbi je posljedica drugog glavnog stavka termodinamike, te njihove ovisnosti o stanju sistema i stanju okoline.
- Energija koja se ne može pretvarati u druge oblike energije - anergija. U ovu grupu ulazi energija nagomilana u okolini i energija svih sistema koji se nalaze u stanju okoline.

Na slici 37. prikazani su odnosi koji pobliže predstavljaju naznačene definicije. Od ukupno dovedene topline (Q_d) jedan njen dio prelazi u okolinu i naziva se anergija (Q_A) i on se neće moći iskoristiti. Ostatak od dovedene topline naziva se eksergija ($Q_E = Q_d - Q_A$) i on se u kružnom procesu pretvara u rad. Eksergija se većim dijelom pretvara u koristan rad (Q_e), a manjim dijelom u gubitke (Q_g) koji zajedno s anergijom odlaze u okolinu. Ova pojava se u praksi ne može izbjeći i što je toplinski stroj, odnosno njegov kružni proces, više opterećen nepovrativostima (trenje i dr.) sve će manji iznos eksergije biti na raspolaganju za pretvorbu u koristan rad. To je i osnovni razlog što je stupanj djelovanja realnih procesa manji od "idealnog" Carnotovog procesa.

Iz jednadžbe (118) vidi se da je termički stupanj djelovanja jako ovisan o srednjoj temperaturi dovođenja topline i što je ova temperatura viša, to je i stupanj djelovanja veći. Gornja granica ovoj temperaturi su tehnološka svojstva toplinskog stroja tj. otpornost na tlak i temperaturu materijala odnosno cijele konstrukcije.

Iz navedenih formulacija može se zaključiti da se svaka energija sastoji iz eksergije i anergije, da se u nepovratljivim procesima eksergija pretvara u anergiju, u povratljivim procesima eksergija ostaje konstantna, te da je anergiju nemoguće pretvoriti u eksergiju.

Budući da su svi prirodni procesi nepovratljivi, pretvorbe oblika energije uzrok su smanjenja zaliha eksergije, jer se jedan njezin dio pretvara u anergiju.



Sl. 37. Energijski dijagram kod Carnot-ovog procesa i (crtkana linija) realnog procesa

Prema prvom glavnom stavku termodinamike da se energija ne može i potrošiti niti izgubiti, evidentno je da su u nas uobičajeni pojmovi "potrošnja energij i "gubitak energije" suprotni tom stavku, pa je pod tim uobičajenim pojmovim potrebno podrazumjevati potrošnju i gubitak eksergije što nije u suprotnosti s glavni stavcima termodinamike.

Kad se radi o korištenju unutrašnje energije za dobivanje mehaničke energi preko turbostrojeva, za razliku od kruznih procesa, pogonski medij struji.

Pogonski medij (plin ili para) koji prenosi unutrašnju termičku energiju obič struji (prolazi) kroz cjevovode i sapnice, pa je radi toga neophodno potrebno ne kazati o strujanju plinova i para.

Kad je riječ o strujanju uvijek je potrebno podrazumjevati da se strujan odvija u prostoru omeđenom stijenkama i da taj prostor može biti različita oblika.

Strujanje kroz cijevi može biti sređeno (svaka čestica struji po strujnici koje međusobno ne mješaju) i nesređeno (strujnice se međusobno prepleću). Kod sredn strujanja smjer brzine čestica okomit je na presjek cijevi, dok takva situacija nije l nesređenog (turbulentnog) strujanja.

U praktičnoj primjeni većina strujanja je nesređena što znatno otežava to proračune brzina u pojedinim presjecima. Međutim, na temelju iskustva za ana termodinamičkih pojava za strujanje u cijevi dovoljno je točno računati sa sredn brzinom u pojedinim presjecima. Ta srednja brzina (c) zamišljena je kao jednak cijelom presjeku i tolika da kroz promatrani presjek struji upravo toliko medija ko odgovara okomitim komponentama stvarnih brzina u tom presjeku. Prema t mora biti:

$$dm = \rho c_n \, dA \tag{119}$$

gdje su m količina medija, ρ specifična gustoća, c_n komponenta brzine okomita na diferencijal površine dA. Na cijeloj površini će biti:

$$m = \rho \int_A c_n \, dA \tag{120}$$

ili sa zamišljenom srednjom brzinom

$$m = \rho \, cA \, . \tag{121}$$

Dakle, srednja se brzina može izračunati iz izraza:

$$c = \frac{\int_A c_n \, dA}{A}. \tag{122}$$

Kod stacionarnog strujanja mora u jedinici vremena kroz svaki presjek cijevi proći ista količina medija pa prema tome vrijedi

$$m = \text{konst.} \tag{123}$$

Nagomilana energija sistema koji se ne nalazi u stanju mirovanja je:

$$W_{na} = U + mc^2/2 + mg\,z \tag{124}$$

odnosno po jedinici mase bit će

$$w_{na} = u + c^2/2 + g.z. \tag{125}$$

Promjenom stanja sistema mijenja se nagomilana energija, a njezina razlika pojavljuje se, na prelasku granice sistema, kao toplina i kao mehanička energija, pa slijedi da je:

$$w_{na_2} - w_{na_1} = \left(u_2 + \frac{c_2^2}{2} + gz_2\right) - \left(u_1 + \frac{c_1^2}{2} + gz_1\right). \tag{126}$$

Pored nagomilane energije pojavljuje se i energija kao posljedica promjene volumena, a prikazuje se izrazom

$$\Delta m \, (p_2 v_2 - p_1 v_1). \tag{127}$$

Ukupni mehanički rad sastoji se od tehničkog rada koji prelazi granice sistema i rada kao posljedice promjene volumena pa se može pisati za

$$W_{12} = W_{12t} + \Delta m \, (p_2 v_2 - p_1 v_1). \tag{128}$$

Koristeći prvi glavni stavak termodinamike mora važiti

$$Q_{12} - W_{12} = \Delta m\left(u_2 + \frac{c_2^2}{2} + gz_2\right) - \Delta m\left(u_1 + \frac{c_1^2}{2} + gz_1\right). \tag{129}$$

Ako se iz jednadžbe (128) izrazi vijednost za tehnički rad i uvrsti u jednadžbu (129), te sređivanjem jednadžbe i korištenjem izraza za specifičnu entalpiju

$$i = u + pv \tag{130}$$

dobiva se:

$$q_{12} - w_{12t} = i_2 - i_1 + \frac{1}{2}(c_2^2 - c_1^2) + g(z_2 - z_1). \qquad (131)$$

Prema navedenoj jednadžbi, razlika između dovedene topline i dobivenog tehničkog rada jednaka je zbroju promjena entalpije, kinetičke energije i potencijalne energije djelatne tvari koja struji kroz otvoreni sistem. Međutim, ovdje je potrebno naglasiti da se mogu pojaviti situacije kada nema mehaničkog rada (strujanje u kanalu bez postrojenja za pretvorbe), zatim kada se ne koristi razlika potencijalne energije (ona se javlja samo u posebnim slučajevima), te kada se u procesu ne dovodi i ne odvodi toplina. Za praktičku upotrebu (primjena kod parne i plinske turbine) pretpostavlja se da se za vrijeme ekspanzije pare u turbini ne dovodi toplina, te da su razlike visina na ulazu i izlazu iz turbina zanemarive. Prema navedenome najčešće će se primjenjivati slijedeća jednadžba

$$w_{12t} = i_1 - i_2 + \frac{1}{2}(c_1^2 - c_2^2). \qquad (132)$$

Mehanička energija dobivena na osovini turbine ovisit će o razlici entalpija i o razlici kvadrata brzina na ulazu i na izlazu.

2.4.2. PRETVORBA UNUTRAŠNJE TERMIČKE ENERGIJE U MEHANIČKU PREKO KLIPNIH STROJEVA

Pretvorba unutrašnje termičke energije u mehaničku kod stapnih strojeva vrši se u cilindru i dalje preko stapa (klipa) rad se prenosi na osovinu stroja. Energija za ovu pretvorbu dovodi se cilindru iz okolice (vodena para, vrući plinovi) ili gorivom (unutarnje izgaranje). Toplinski stapni strojevi koji koriste vodenu paru zovu se parni stapni strojevi, a oni koji koriste gorivo za izgaranje unutar cilindra zovu se motori s unutrašnjim izgaranjem (npr. Otto motori, dizel motori i dr.).

Parni stapni strojevi danas se praktički ne upotrebljavaju za proizvodnju električne energije i još se malo upotrebljavaju u saobraćaju (lokomotive) te kod specijalnih strojeva. Para kao pogonski medij danas se uveliko koristi kod parnih turbina, o čemu će kasnije biti više opisano u posebnom poglavlju.

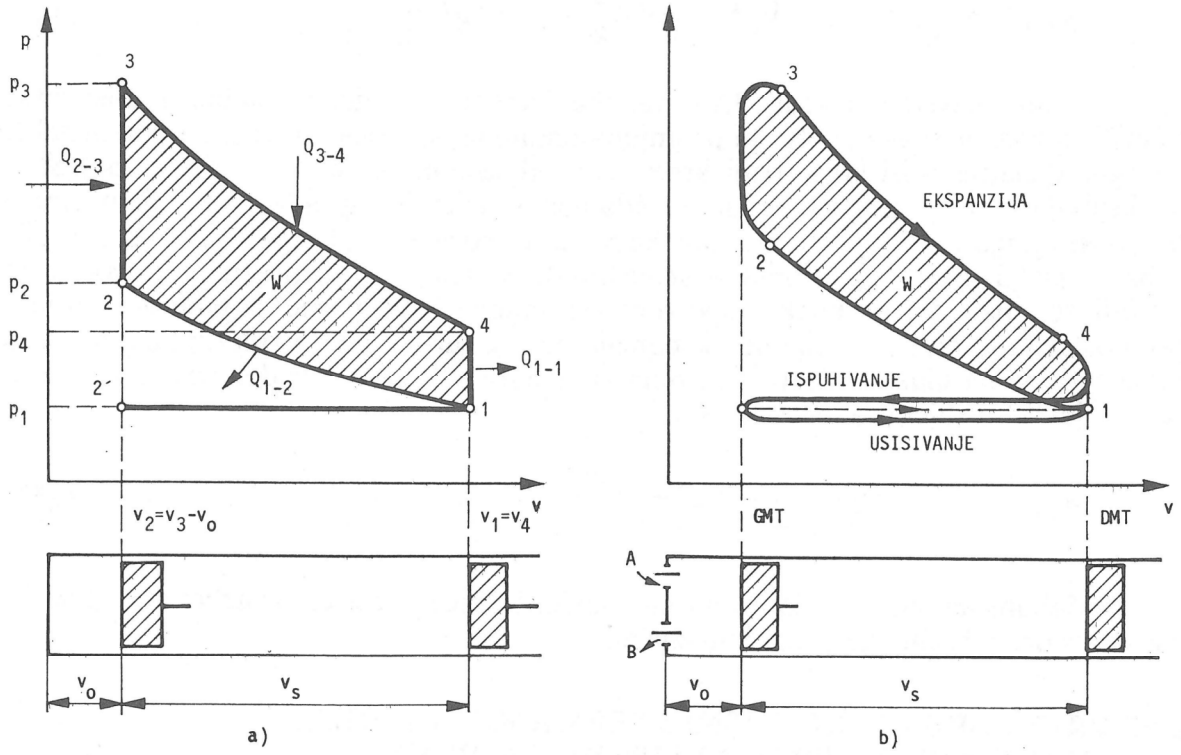
Postoji više vrsta toplinskih strojeva s unutarnjim izgaranjem, ali uglavnom u tehničkoj primjeni za pretvorbu toplinske energije u mehaničku energiju, koriste se:

- Otto - proces
- Sabathe - kombinirani dizel proces

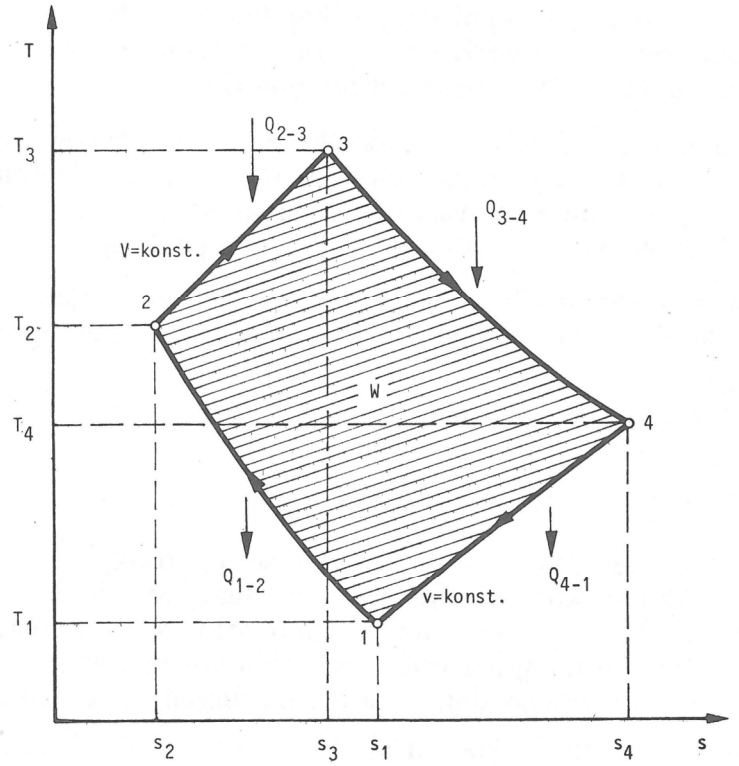
2.4.2.1. Klipni motori na temelju Otto-procesa

Motori na temelju Otto-procesa rijetko se upotrebljavaju za proizvodnju električne energije. Ako se koristi, onda je to u situacijama kada se radi o malim agregatima (prenosnim) do 10 kW, ali se zato vrlo često koristi za dobivanje mehaničke energije (pogon manjih i većih motornih vozila i dr.) i s ovog stajališta motori na temelju Otto-procesa spadaju u najčešće primjenjivane strojeve.

Općenito u ovom (Otto) procesu sl. 38. (a - teoretski dijagram, b - stvarni dijagram) izgaranje se goriva vrši naglo pri konstantnom volumenu V_2 (stanje 2-3 na sl. 38) ali dovođenje topline procesu osim pri izohori (2-3) i pri nekoj politropi (3-4).



Sl. 38. p-v dijagram OTTO-procesa (teoretski i stvarni)



Sl. 39. T-s dijagram OTTO-procesa

Slično vrijedi i za odvođenje topline iz procesa. Toplina se odvodi za vrijeme promjene stanja 4-1 (izohora) i 2-3 (politropa).

Da bi se pojednostavila teoretska razmatranja Otto-proces se katkada u literaturi prikazuje kao proces između dvije izohore i dvije adijabate (promjene stanja pri kojoj se ne izmjenjuje toplina). Na slici 39. prikazan je Otto-proces u T-s dijagramu.

Motori koji rade na principu Otto-procesa mogu biti četverotaktni i dvotaktni. Princip rada u oba režima je isti, a dijagrami su približno isti.

Četverotaktni režim rada Otto-procesa sastoji se od četiri hoda klipa (dva puna okretaja osovine) odnosno četiri takta kako slijedi:

I takt: usisavanje smijese zraka i goriva (različite vrste benzina) pri hodu klipa (sl. 38) od GMT (gornje mrtve točke) do DMT (donje mrtve točke). Ove točke se još zovu i obratišta klipa, a volumen koji se zatvara između ova dva obratišta naziva se stapnim volumenom (V_s). U p-v dijagramu (sl. 38) linija 2'-1' odgovara konstantnom tlaku (nešto manjem od atmosferskog) zbog otpora koji se pojavljuje pri usisivanju. U ovom dijelu procesa rad se troši ventil A je otvoren, a ventil B zatvoren.

II takt: **Kompresija gorive smjese. Oba ventila su zatvorena. Klip dolazi u gornju mrtvu točku (GMT) i zatvara kompresioni volumen (V_o). Promjena stanja do 1-2 je u p-v dijagramu politropa za koju se troši radnja kompresije. Ovdje se misli na tehničku politropu tj. promjenu stanja između izoterme (n=1) i adijabate (n=k), iz čega slijedi da je**

$$1 < n < k . \qquad (133)$$

Linije promjene stanja u p-v dijagramu (ekspanzije i kompresije) mogu se predočiti općim hiperbolama prema jednadžbi:

$$pv^n = konst \qquad (134)$$

gdje je n politropski eksponent ekspanzije odnosno kompresije, a vrijednost mu se kreće od 0 do ∞. Zavisno od ovog eksponenta dobiva se (sl. 40):

$n = 0$	izobara .... p = konst
$n = 1$	izoterma ... t = konst
$1 < n < k$	tehnička politropa
$n = k$	adijabata q = 0
$n = \infty$	izohora v = konst.

Kad klip dođe u GMT goriva smjesa je komprimirana i u tom času iskra iz svjećice pali smjesu koja trenutno izgara pri konstantnom volumenu, pa naglo rastu tlak i temepratura smjese plinova izgaranja.

III takt: **Ekspanzija izgorjelih plinova. Plinovi izgaranja u točki 3. (sl. 38) imaju veliku potencijalnu energiju (visoki tlak i temperaturu) i ekspandiraju politropski (u_1) do točke (stanja) 4. Za to vrijeme klip se vraća udesno do donje mrtve točke (DMT) pri čemu se dobiva rad ekspanzije. Pri ekspanziji oba ventila (A i B) su zatvoreni.**

IV takt: **Ispuh izgorjelih plinova. Kad je klip u donjoj mrtvoj točki otvara se ispušni ventil (B na sl. 38) i plinovi izgaranja odlaze u okolinu. Stap mali dio vremena u DMT (promjena stanja pri v = konst). Dimni plinovi će izlaziti u okolinu sve dok se njihov tlak ne izjednači s tlakom okoline. Promjena stanja u p-v dijagram je od 4-1. Izlazni ventil je i nadalje otvoren i klip pri kretanju nalijevo istiskuje ostatak izgorijelih plinova kroz izlazni ventil u atmosferu. Zbog otpora u cilindru tlak je kod istiskivanja**

(1-2) nešto veći od atmosferskog. Kada klip dođe u gornju mrtvu točku (GMT) proces istiskivanja je završen.

Od svih taktova jedino je ekspanzija (III takt) radni takt koji daje korisnu energiju, svi ostali taktovi troše energiju. Dakle, ukupna korisna energija jednaka je razlici dovedene i odvedene topline:

$$W = Q_d - Q_o . \tag{135}$$

S obzirom na to da se toplina dovodi pri izobarnoj promjeni stanja $Q_{v=konst} = Q_{2-3}$ i politropskoj promjeni stanja $Q_{n1} = Q_{3-4}$, a da se toplina odvodi pri izohornoj promjeni stanja $Q_{v=konst} = Q_{4-1}$, navedena jednadžba može se pisati:

$$W = (Q_{2-3} + Q_{3-4}) - (Q_{4-1} + Q_{1-2}) . \tag{136}$$

Ako se toplina izrazi preko mase, specifične topline i temperatura u karakterističnim točkama procesa (1, 2, 3 i 4), u tom slučaju jednadžba (136) poprima slijedeći oblik:

$$W = mc_v (T_3-T_2) + mc_{n1} (T_4-T_3) - [mc_v(T_4-T_1) + mc_{n2} (T_1-T_2)] . \tag{137}$$

U jednadžbi c_v specifična toplina pri konstantnom volumenu, a to je ona količina topline koju je potrebno dovesti masi od 1 kg medija da bi joj temperatura porasla za 1 K. Specifična toplina može se odrediti i iz izraza za toplinu, pa glasi:

$$c_v = \frac{Q}{m(T_2-T_1)} . \tag{138}$$

Kod plinova postoji specifična toplina pri konstantnom tlaku c_p koja je po iznosu nešto veća od specifične topline pri konstantnom volumenu c_v, a jednadžba za njihov odnos glasi:

$$k = c_p/c_v . \tag{139}$$

U navedenoj jednadžbi adijabatski eksponent k = 1.66 za jednoatomne, a k = 1.40 za dvoatomne plinova i svojstvo je dotičnog plina. Za tekućine i krute tvari vrijedi:

$$c_p = c_v = c . \tag{140}$$

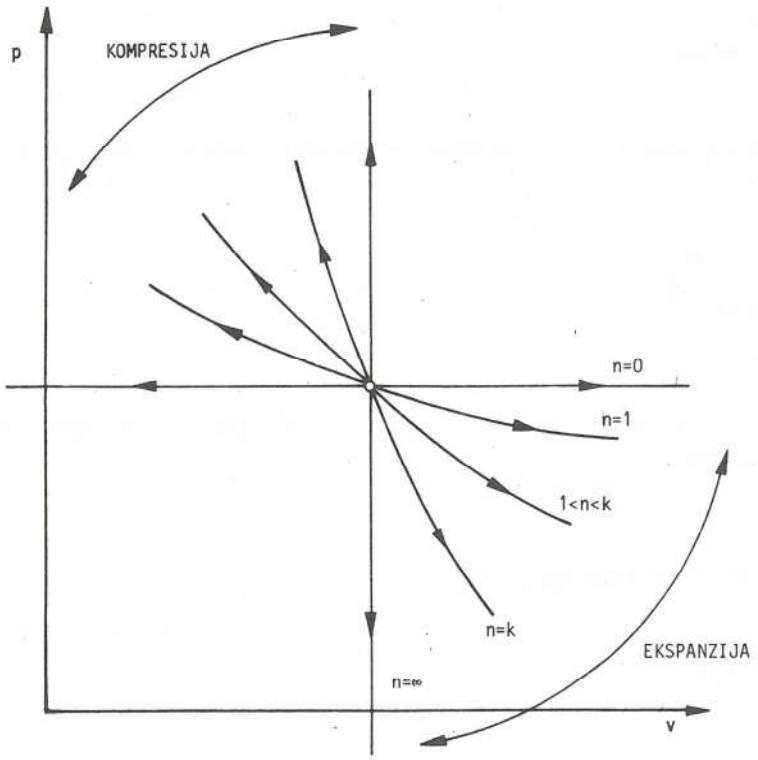
Kod praktičkih proračuna vrijednost specifične topline uzima se iz tablica ovisno o mediju i njegovoj temperaturi.

Specifična toplina politrope računa se prema izrazima

$$c_{n1} = \frac{n_1 - k}{n_1 - k} \quad ; \quad c_{n2} = \frac{n_2 - k}{n_2 - 1} . \tag{141}$$

Termički stupanj djelovanja prema (114) sada je:

$$\eta_T = 1 - \frac{c_v(T_4-T_1) + cn_2(T_1-T_2)}{c_v(T_3-T_2) + cn_1(T_4-T_3)} . \tag{142}$$



Sl. 40. Shematski prikaz svih promjena stanja u p-v dijagramu

Za praktične proračune vrlo često se zanemaruje dovođenje i odvođenje topline po politropi, pa u tom slučaju termički stupanj djelovanja iznosi

$$\eta_T = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{T_4}{T_3} \cdot \frac{1 - \frac{T_1}{T_4}}{1 - \frac{T_2}{T_3}} . \qquad (143)$$

Za adijabatske promjene stanja Poisson je utvrdio da je:

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{v_1^k}{v_2^k}, \quad \text{ili} \quad p_1 V_1^k = p_2 V_2^k, \quad \text{ili} \quad p_1 V^k = \text{konst}. \qquad (144)$$

Navedena jednadžba može se pisati u obliku:

$$p \cdot v \cdot v^{k-1} = \text{konst}. \qquad (145)$$

Budući da se mjesto tlaka i specifičnog volumena može pisati umnožak plinske konstante R (39) i odgovarajuće temperature, a koristeći jednadžbu (144) i (145) dobiva se:

$$RT_1 v_1^{k-1} = RT_2 v_2^{k-1} \qquad (146)$$

iz čega slijedi da je:

$$T_1/T_2 = (v_2/v_1)^{k-1}. \tag{147}$$

Koristeći jednadžbe (144) i (147) dobiva se ovisnost omjera temperatura o omjeru tlakova:

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{k-1}{k}}. \tag{148}$$

Prema slici 38. je $V_2 = V_3 = V_o$, a $V_4 = V_1$, pa se analogno može pisati za adijabatsku kompresiju:

$$T_1/T_2 = (v_2/v_1)^{k-1} \tag{149}$$

odnosno za adijabatsku ekspanziju:

$$T_4/T_3 = (v_2/v_1)^{k-1} \tag{150}$$

Slijedi da je:

$$T_1/T_4 = T_2/T_3. \tag{151}$$

Uvođenjem dobivenih vrijednosti u jednadžbu (143) dobiva se izraz za termički stupanj djelovanja

$$\eta_t = 1 - (v_2/v_1)^{k-1}. \tag{152}$$

Prema tome, osim o svojstvima djelatne tvari (eksponent k), termički stupanj djelovanja ovisi samo o omjeru volumena. Kompresijski omjer volumena (ε) je omjer između ukupnog volumena cilindra V_c (V_1) i kompresijskog volumena V_k(V_2), znači

$$\varepsilon = V_c/V_k = V_1/V_2 = v_1/v_2 \tag{153}$$

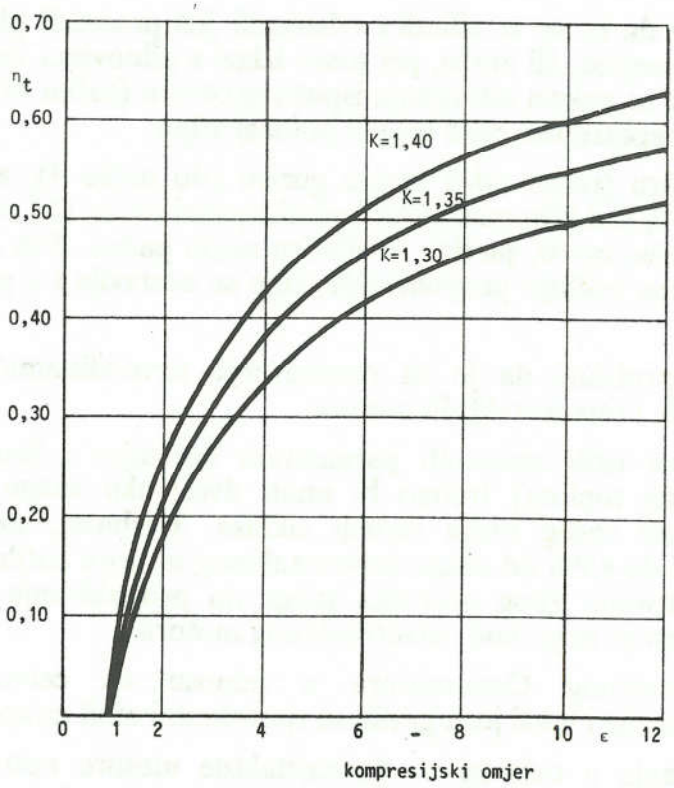
pa je termički stupanj djelovanja

$$\eta_T = 1 - 1/\varepsilon^{k-1}. \tag{154}$$

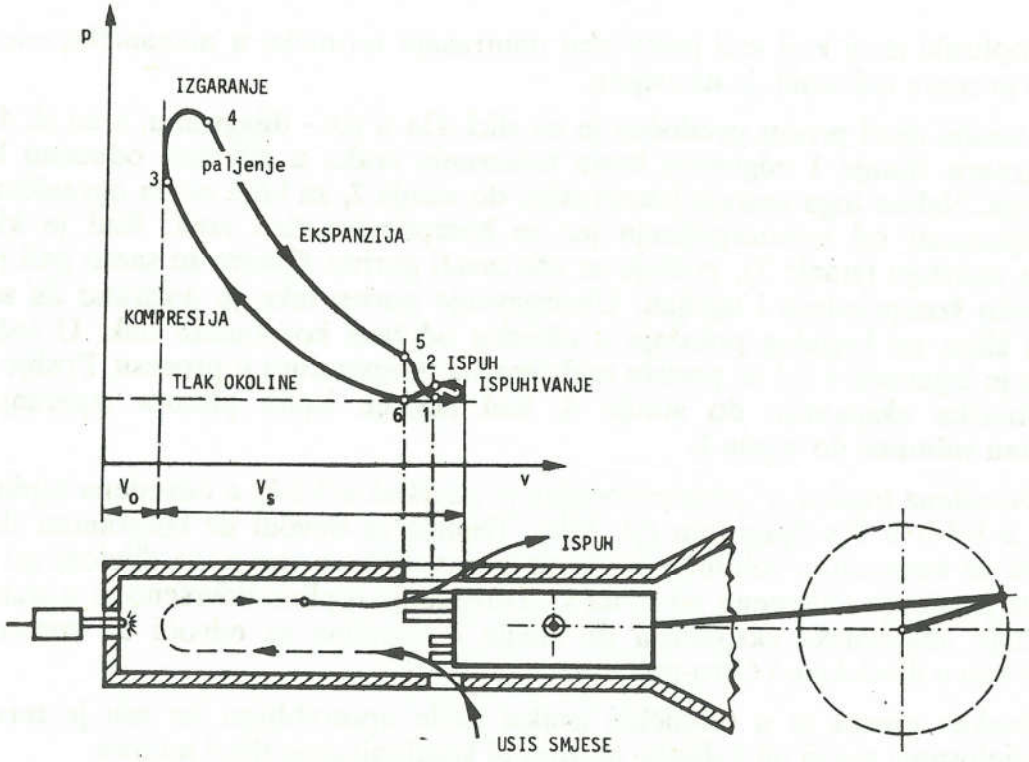
Na slici 41. prikazana je ovisnost termičkog stupnja djelovanja o kompresijskom omjeru za tri različite vrijednosti eksponenta k. Iz slike se može zaključiti da s porastom kompresijskog omjera (ε) raste termički stupanj djelovanja, ali se s omjerom kompresije ne smije ići previsoko da ne bi došlo do samozapaljenja. Za optimalne uvjete konstrukcije i rada termički stupanj djelovanja Otto-motora je do 0.55.

Za proces u dvotaktnom motoru potrebna su dva hoda klipa ili dva takta, odnosno jedan okretaj koljenčaste osovine (sl. 42). Za ulazak gorive smjese, ili zraka, i za izlaz plinova izgaranja služe otvori (raspori), koji su na plaštu cilindra, a otvara ih i zatvara sam klip. Umjesto usisavanja goriva se smjesa, ili zrak, utiskuje u cilindar s malim pretlakom uz istodobno istiskivanje plinova izgaranja. Taj se dio procesa naziva propuhivanje jer su otvoreni i ispušni i upusni otvor.

I takt: U početku prvog takta, koji se može nazvati i kompresijski takt, kad klip krene iz krajnjeg položaja desnog (sl. 42) otvorena su oba raspora pa je cilindar u fazi propuhivanja. Pomičući se, klip postepeno zatvara upusni otvor, kojeg u točki 2. on potpuno prekriva. Tad prestaje ispuhivanje, ali još ostaje kratko vrijeme otvoren (do



Sl. 41 Ovisnost termičkog stupnja djelovanja η_t Otto procesa o kompresijskom omjeru ε za tri vrijednosti eksponenta k



Sl. 42. p-v dijagram dvotaktnog OTTO-motora

točke 6) ispušni otvor da bi se iz cilindra odstranili još preostali plinovi izgaranja. Jedan mali dio gorive smjese, ili zraka, pri tome izlazi s plinovima izgaranja, ali veći dio ostaje u cilindru pa se nakon zatvaranja ispušnog otvora (točka 6) komprimira. U točki 3. pali se gorivo neposredno pred krajnji položaj klipa.

II takt: U drugom taktu (radni takt) izgara gorivo (do točke 4), a nastali plinovi ekspandiraju do točke 5, kad klip počne oslobađati ispušni otvor. Od stanja 5 do stanja 1 otvoren je samo ispušni otvor, pa tlak u cilindru naglo padne. Tek se tad (točka 1) otvara i upusni otvor, pa počinje propuhivanje, koje se nastavlja i u početku idućega, prvog takta.

Iz navedenog proizlazi da je za razmatranje termodinamičkih pojava isti princip i kod dvotaktnih i četverotaktnih motora.

Dvotaktni motor istih osnovnih parametara (promjer i broj cilindra, broj okretaja, ista dovedena toplina) trebao bi imati dvostruku snagu četverotaktnog motora zbog dvostruko većeg broja radnih ciklusa. Međutim, snaga dvotaktnog motora može biti veća do 85% od snage četverotaktnog motora (istih karakteristika). To je uglavnom uvjetovano zbog potroška snage na propuhivanje i zbog slabijeg punjenja gorivom smjesom nego kod četverotaktnog motora.

Prednosti dvotaktnog Otto-motora u odnosu na četverotaktni su u jednostavnosti konstrukcije i lakši je, a grade se sporohodni mali motori.

Stupanj djelovanja u odnosu na četverotaktne motore nešto je niži jer je površina kružnog procesa u p-v dijagramu nešto manja za iste termodinamičke parametre, a što ima za posljedicu i nešto veću specifičnu potrošnju goriva.

2.4.2.2. Sabathe ili kombinirani dizel proces

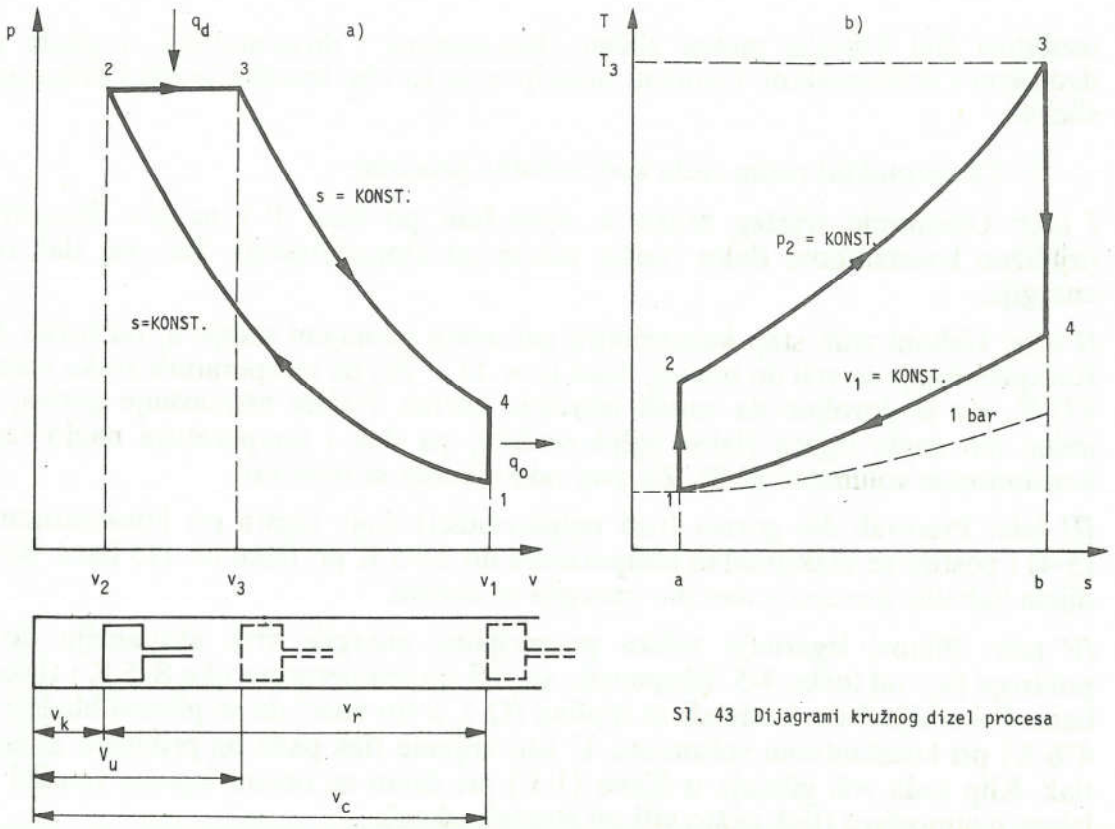
Toplinski stroj koji vrši pretvorbu unutrašnje termičke u mehaničku energiju po ovom procesu najvažniji je na svijetu.

Klasični dizel proces predočen je na slici 43a u p,v - dijagramu, a na sl. 43b u T,s-dijagramu. Stanje 1 odgovara kraju usisavanja zraka u cilindar, odnosno kraju ispuhivanja. Nakon toga nastaje kompresija, do stanja 2, za koju nema ograničenja u vezi s opasnosti od samozapaljenja jer se komprimira čisti zrak. Kad je klip u krajnjem položaju (stanje 2), počinje se uštrcavati gorivo. Gorivo se samo pali jer je zrak visoko komprimiran i ugrijan. Ubrizgavanje goriva tako je dozirano da se pri kretanju klipa od krajnjeg položaja u cilindru održava konstantan tlak. U točki 3. završeno je izgaranje i tad se postiže maksimalna temperatura u procesu. Poslije toga je adijabatska ekspanzija do stanja 4, kad počinje ispuh plinova izgaranja uz konstantan volumen do stanja 1.

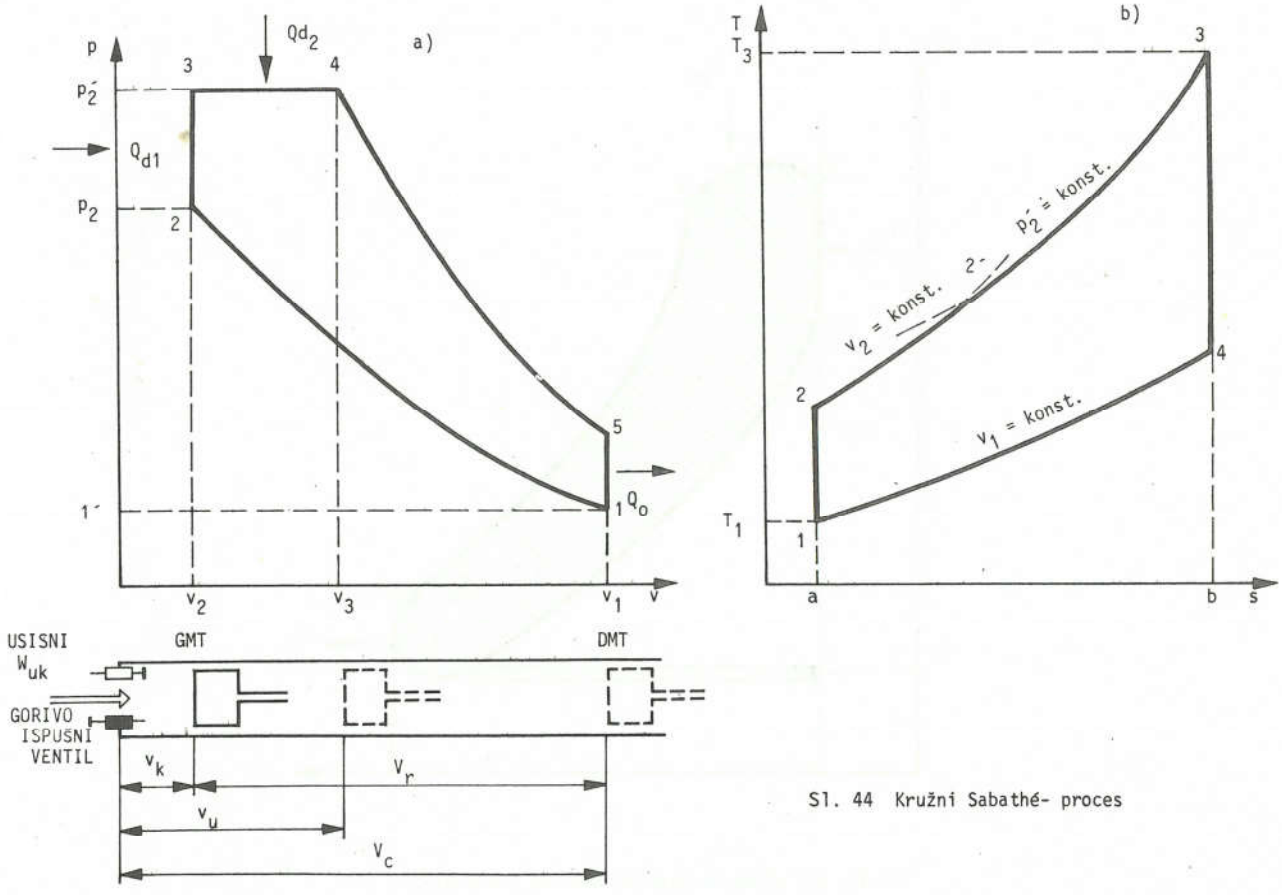
Dovedena toplina q_d proporcionalna je površini a-2-3-b, a odvedena toplina q_o površini a-1-4-b u T,s-dijagramu (sl. 43b). Toplina se dovodi uz konstantan tlak, a odvodi se uz konstantan volumen, pa je uz porast tlaka p_2 na p_2', a dijelom pri p = konst., uz povišenje volumena od v_2 na v_3. Dovođenje topline dovršeno je u stanju 3, kad počinje adijabatska ekspanzija do stanja 4. Toplina se odvodi uz konstantan volumen kao u dizelskom i Otto-procesu.

Ovakav proces se u tehničkoj praksi rjeđe upotrebljava jer mu je termički stupanj djelovanja manji od Sabathe motora ili kombiniranog dizel motora.

Za razliku od dizel motora kod Sabathe motora toplina se dovodi dijelom kod konstantnog volumena, a dijelom kod konstantnog tlaka (slika 44a i 44b). Ova



Sl. 43 Dijagrami kružnog dizel procesa



Sl. 44 Kružni Sabathé- proces

osobitost čini Sabathe motor sličan Otto-motoru i dizel-motoru, a grade se kao dvotaktni i četverotaktni. Osnovni princip rada za obe izvedbe je isti i prikazan je na slici 44.

Četverotaktni režim rada kod Sabathe procesa:

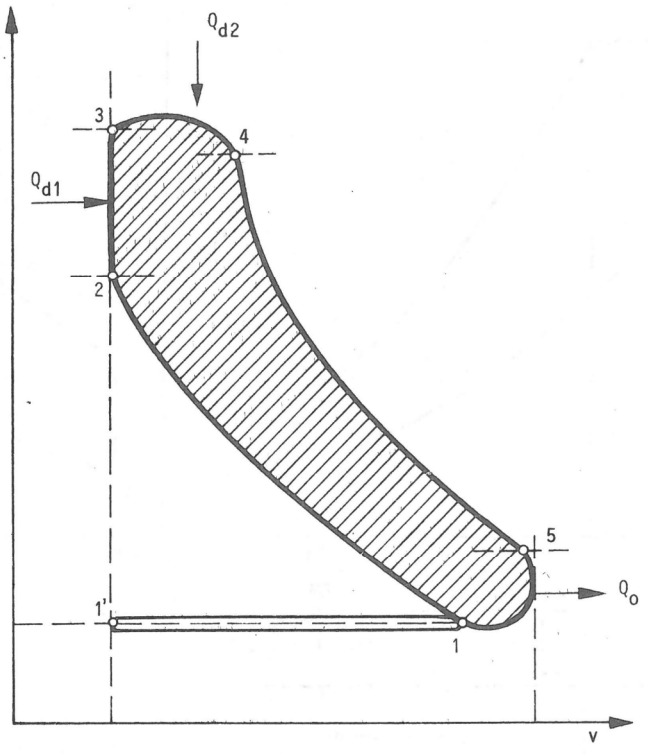
I takt: Usisavanje svježeg zraka iz atmosfere po liniji 1'-1 na p-v dijagramu pri približno konstantnom tlaku (nešto nižem od atmosferskog). Za ovaj tlak troši se energija.

II takt: Usisani zrak stap komprimira pri nekoj promjeni stanja u_1 od točke 1 do 2. Komprimiranje se vrši do takvog tlaka ($\varepsilon = 12 \sim 20$) da temperatura zraka naraste do 875 K, što je dovoljno da zapali uštrcano gorivo. Nakon uštrcavanje goriva, njegov jedan dio naglo izgara (lakši ugljikovodici), pa tlak i temperatura naglo rastu pri konstantnom volumenu (2-3). Za ovaj takt također se troši rad.

III takt: Preostali dio goriva (teži ugljikovodici) dalje izgara pri konstantnom tlaku (3-4) i postiže se maksimalna temperatura do 2275 K pri tlaku do 115 bara. Kod ovog dijela Sabathe procesa jedan dio energije se dobiva.

IV takt: Plinovi izgaranja velike potencijalne energije vrše ekspanziju po nekoj politropi (u_2) od točke 4-5. Ekspanzija se vrši do temperature oko 875 K i tlaka oko 5 bara. Od stanja 5 do 1 odvodi se toplina (Q_o), a što znači da se plinovi hlade (do oko 476 K) pri konstantnom volumenu. U isto vrijeme tlak pada na približno atmosferski tlak. Klip sada vrši gibanje u lijevo (1-1') pri čemu se otvara ispušni ventil i plinovi izlaze u atmosferu (tlak nešto viši od atmosferskog).

Ukupni rad ovog procesa dobiva se tako da se od pozitivnog rada (pomak stapa u desno 3-4-5) odbije apsolutna vrijednost negativnog rada (pomak stapa u



Sl. 45. p-v dijagram Sabathe procesa (stvarni)

lijevo 1-2), pri čemu se obično zanemari rad za pomak stapa 1'-1-1' punjenje i punjenje cilindra).

Stvarni rad je nešto niži od teoretskog zbog inercije stapa, hlađenje cilindra itd., a p-v dijagram realnog Sabathe - procesa prikazan je na sl. 45.

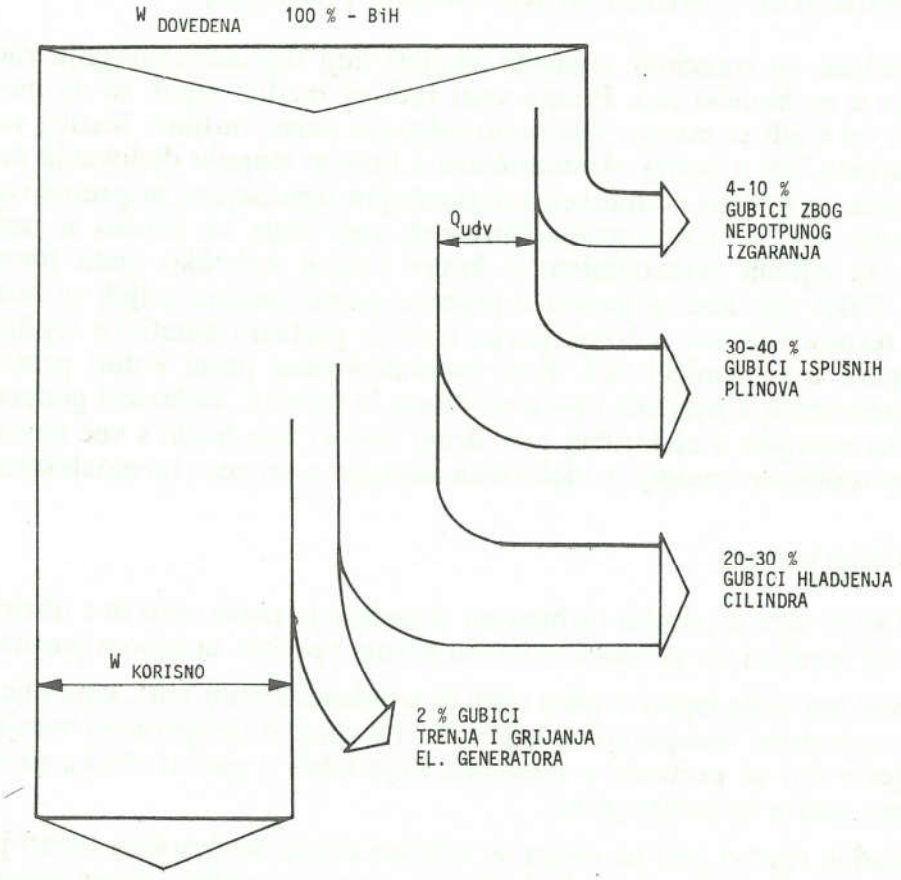
Dvotaktni rad Sabathe procesa sličan je dvotaktnom radu Otto procesa, a što znači da je sličan i četverotaktnom radu. Na kraju drugog takta u blizini donje mrtve točke (DMT) nastaje ispuh i usis preko izvedenih otvora slično Otto-procesu. Ovdje se na usisu vrši prednabijanje svježeg zraka koji osim što ispire zaostale plinove izgaranja i ispunjava prostor cilindra.

S obzirom da se radi o procesu koji je najčešće primijenjen u praktičnom korištenju, potrebno je nešto kazati o ukupnom stupnju iskorištenja kod motora izvedenih na temelju Sabathe procesa:

$$\eta_{nk} = \eta_{izg} + \eta_T \cdot \eta_u \cdot \eta_m \qquad (155)$$

gdje je:

η_{nk} - ukupni stupanj djelovanja, a kreće se od 0.45-0.50
η_{izg} - stupanj djelovanja procesa izgaranja (gubici zbog nepotpunog izgaranja), a kreće se od 0,90-0.96
η_T - termički stupanj djelovanja (osnovni gubici su zbog odvođenja topline putem ispušnih plinova) vrijednost mu je do 0.65, a ovisi u prvom redu o stupnju kompresije (c_c) o omjeru volumena na izobarnom



Sl. 46 Energijski dijagram pretvorbe energije goriva u korisnu energiju kod Sabathe motora

dovodu topline (V_4/V_3 na sl. 44), te o omjeru tlakova kod izohornog dovoda topline (p_3/p_2 sl. 44) i adijabatskom eksponentu k

η_u - unutrašnji stupanj djelovanja motora (gubici uslijed hlađenja i trenja u cilindru), a kreće se od 0.70-0.80

η_m - mehanički stupanj djelovanja (gubici trenja), a kreće se oko 0.98.

Veću vrijednost stupnja djelovanja imaju savršeniji motori velikih snaga koji koriste energiju ispušnih plinova i kod kojih se kontrolira proces izgaranja u cilindru.

Na slici 46. prikazan je dijagram gubitaka Sabathe procesa.

Uspoređujući opisana dva procesa (Otto i Sabathe) može se doći do slijedećih konstatacija:

- Paljenje smjese kod Otto motora vrši se pomoću svjećica a kod Sabathe motora toplinom komprimiranog zraka.
- Kod Sabathe motora robusnija je konstrukcija cilindra zbog većeg kompresionog omjera (ε), a samim time i skuplja izvedba
- Otto motor ima veći stupanj djelovanja ako radi s jednako dovedenom toplinom i istim kompresionim omjerom
- Veći stupanj djelovanja ima Sabathe proces ako se uz odgovarajući (svaki za sebe) stupanj kompresije troši ista količina topline.

2.4.3. PRETVORBA UNUTRAŠNJE TERMIČKE ENERGIJE U MEHANIČKU PREKO TURBINA

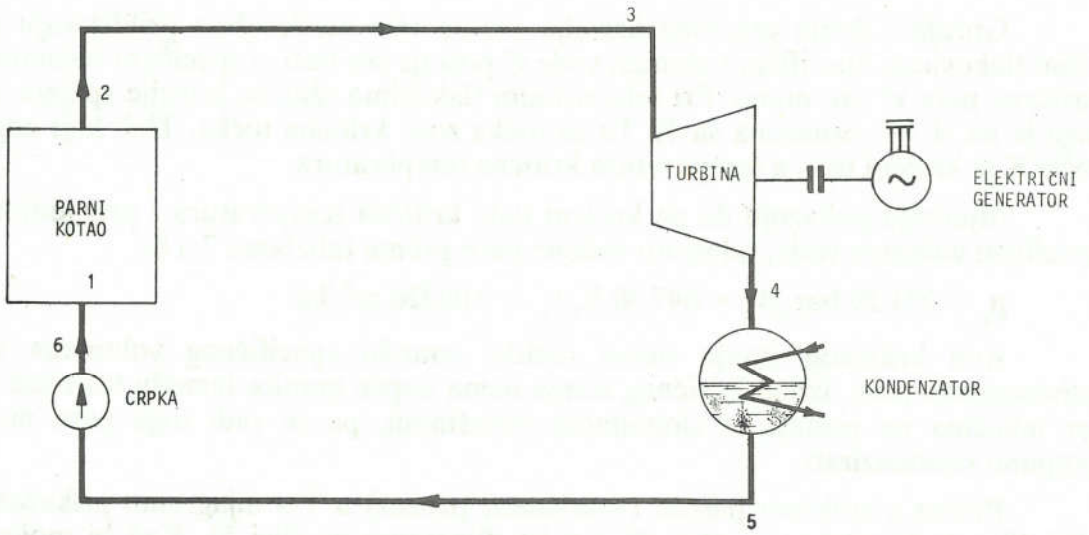
Turbine su rotacioni toplinski strojevi koji toplinsku energiju radnog medija pretvaraju u mehanički rad. Prema vrsti radnog medija dijele se na parne i plinske turbine, a od kojih se mnogo više upotrebljavaju parne turbine. Razlog veće upotrebe parnih turbina leži u boljoj ekonomičnosti i boljem stupnju djelovanja parne turbine. Kad turbina, za razliku od motora s unutrašnjim izgaranjem, priprema radnog medija tj. izgaranje vrši se izvan stroja (turbine), radi čega se proces u turbine obično povezuje sa cijelim postrojenjem u kome postoji nekoliko vrsta pretvorbi oblika energije. Tako npr. kad se govori o procesu parne turbine uvijek se misli na proces klasične termoelektrane u kojoj: parna turbina pretvara kinetičku toplinsku energiju vodene pare u mehanički rad. Kod termoelektrane parni kotao proizvodi vodenu paru, kondenzator kondenzira paru na izlazu iz turbine, električni generator pretvara mehaničku energiju u električnu i svi drugi činioci zajednički s već navedenima, vrše pretvorbu toplinske energije u električnu energiju u procesu termoelektrane (sl. 47).

2.4.3.1. Parna turbina

Kad je riječ o parnim turbinama potrebno je razlikovati ih s obzirom na stanje pogonskog medija i to: proces s mokrom parom i proces sa suhom parom.

Kad sva voda ispari u paru riječ je o suhozasićenoj pari, koja nije postojana, a njena temperatura "temperatura zasićenja" jednaka je temperaturi vrenja. Hlađenjem jedan njezin dio se pretvara u tekućinu, koja lebdi u pari u obliku sitnih kapljica, a takva para naziva se mokra para.

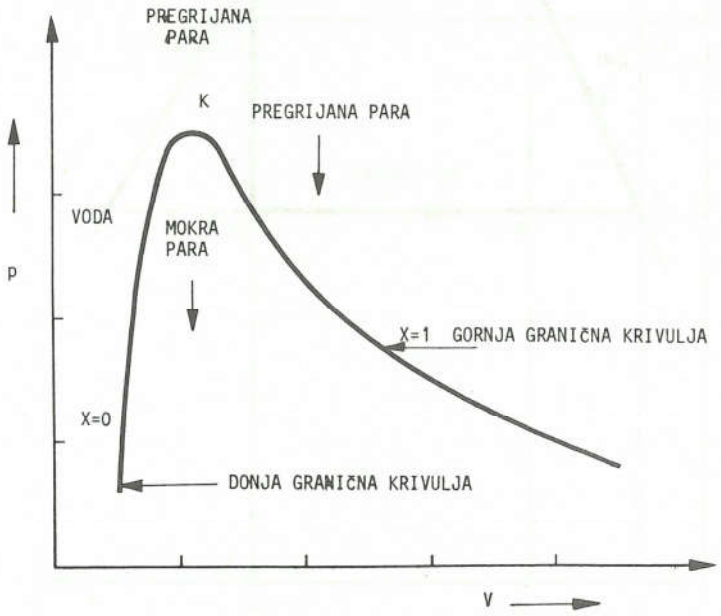
Kad je riječ o pari ne mogu se veličine stanja međusobno vezati jednostavnom jednadžbom, kako je to slučaj kod plinova, nego se veličine stanja određuju pomoću tablica i dijagrama za paru.



Sl. 47. Blok shema Ronhine-ovog procesa (termoelektrane)

Na slici 48. prikazan je p-v dijagram na kome su naznačena razgraničenja između vode, mokre i pregrijane pare. Krivulja označena sa x=0 naziva se donja granična krivulja, a ona pokazuje ovisnost između tlaka i volumena tekućine koja vrije. S lijeve strane krivulje nalazi se područje vode, a s desne strane nalazi se područje mokre pare. Gornja granična krivulja (x=1) dijeli suhozasićenu i pregrijanu paru od mokre pare, a prikazuje ovisnost volumena suhozasićene pare o promjeni tlaka. Područje između donje i gornje granične krivulje je područje mokre pare.

Sve veličine koje se odnose na donju graničnu krivulju označuju se jednom crticom, npr. v', u', i', a veličine koje se odnose na gornju graničnu krivulju sa dvije crtice, npr. v'', u'', i'' itd.



Sl. 48 P-V dijagram razgraničenja vode, mokre i pregrijane pare

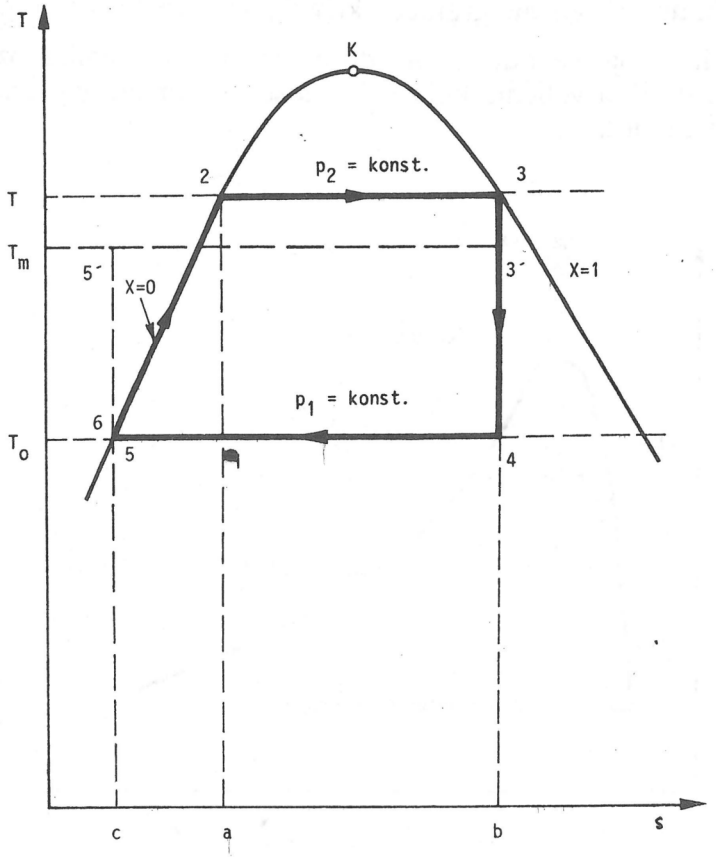
Gornja i donja granična krivulja sve se više međusobno približavaju prema višim tlakovima. Specifični volumen vode v' postaje sve veći, a specifični volumen suho zasićene pare v" sve manji. Pri vrlo visokim tlakovima obje se krivulje spajaju u točki koja je na sl. 48. označena sa K. Ta se točka zove kritična točka. Tlak koji odgovara točki K je kritični tlak, a temperatura kritična temperatura.

Mjerenja pokazuju da su kritični tlak, kritična temperatura i pripadni kritični specifični volumen vode, odnosno vodene pare prema tabelama 7. i 8.:

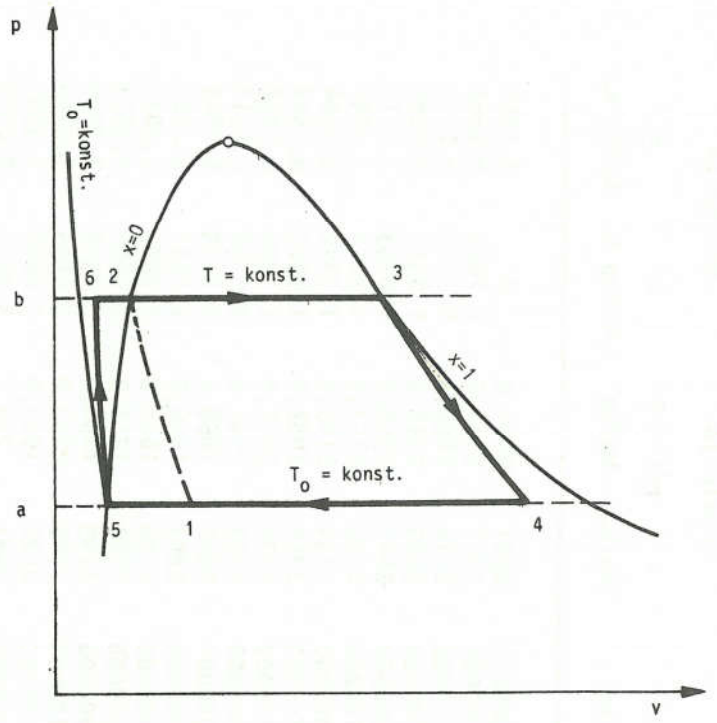
$p_k = 221.29$ bar, $\vartheta_k = 647.30$ K, $v_k = 0.00326$ m^3/kg.

Kod kritičnog stanja nema razlike između specifičnog volumena vode i suhozasićene pare. Iznad kritičnog stanja nema uopće granice između tekućine i pare, jer tekućina ne postoji sa slobodnom površinom, pa se radi toga para ne može potpuno kondenzirati.

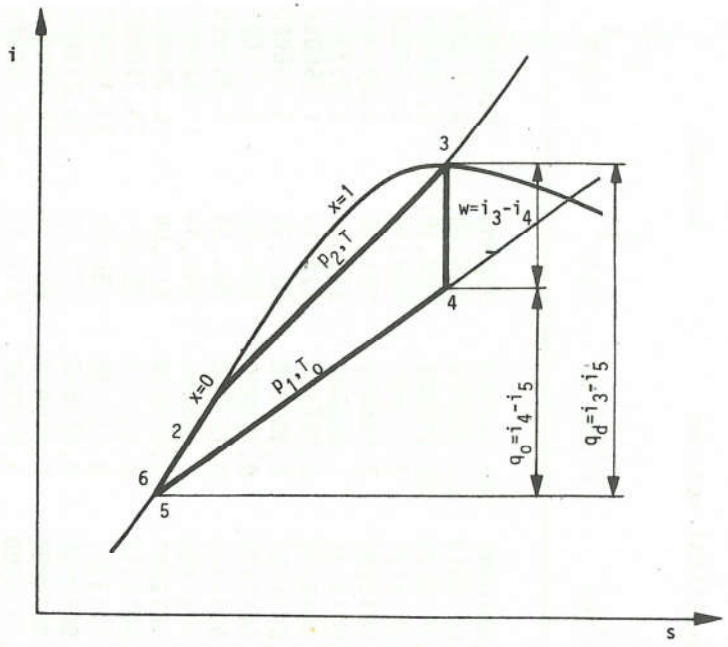
Proces s mokrom parom (Rankineov proces) u T-s dijagramu prikazan je na slici 49, p-v dijagramu na slici 50, i u i-s dijagramu na slici 51. Kad bi mokra para mogla ići po Carnotovu procesu, u tom slučaju bi proces tekao 1-2-3-4 (sl. 49), a ne kako u stvari teče 5(6)-2-3-4-5(6). Naime, kad bi proces završio u točki 1, u tom slučaju sva para ne bi bila kondenzirana, a to bi onda stvaralo probleme prilikom kompresije (ugrijavala bi se samo para, jer bi voda zbog loših uvjeta pri izmjeni



Sl. 49 Proces s mokrom parom u T, s-dijagramu



Sl. 50 Proces s mokrom parom u p, v-dijagramu



Sl. 51. Proces s mokrom parom u i,s-dijagramu

topline ostajala hladna). Da se taj problem prevlada u krug se ugrađuje kondenzator u kome se sva para kondenzira pri tlaku p_1 = konst i temperaturi T_0 = konst, a mora završiti na donjoj graničnoj krivulji (x=0). To stanje označeno je na slici 49. točkom 5. S obzirom na to da postoji razlika tlaka u kotlu i kondenzatoru, potrebno je vodu adijabatski komprimirati od tlaka p_1 na tlak kotla p_2, pri čemu temperatura malo poraste. Taj porast temperature je malen, pa je radi toga zanemariv i točke 5. i 6. na

Tabl. 7. Zasićena vodena para (H_2O) ovisno o temperaturi

Temperatura	Tlak	Specifični volumen		Gustoća			Entalpija		Entropija	
T	p	v'	v''	ρ'	ρ''	i'	i''	$r=i''-i'$	s'	s''
K	bara	m^3/kg	m^3/kg	kg/m^3	kg/m^3	kJ/kg	kJ/kg	kg/kg	kJ/kg K	kJ/kg K
273,16	0,006112	0,0010002	206,300000	999,80	0,004847	0,000611	2501	2501,0	0	9,1544
293,15	0,023370	0,0010018	57,840000	998,20	0,017290	83,900000	2537	2454,0	0,2964	8,6665
313,15	0,073750	0,0010079	19,550000	992,16	0,051150	167,500000	2574	2406,0	0,5723	8,2559
333,15	0,199170	0,0010171	7,678000	983,19	0,130200	251,100000	2609	2358,0	0,8311	7,9084
373,15	0,473600	0,0010290	3,408000	971,82	0,293400	334,900000	2643	2308,0	1,0753	7,6116
393,15	1,013250	0,0010435	1,673000	953,31	0,597700	419,100000	2676	2257,0	1,3071	7,3547
413,15	3,614000	0,0010798	0,508700	926,10	1,966000	589,000000	2734	2145,0	1,7392	6,9304
433,15	6,180000	0,0011021	0,306800	907,36	3,258000	675,500000	2758	2082,0	1,9327	6,7508
453,15	10,027000	0,0011275	0,193900	886,92	5,157000	763,100000	2778	2015,0	2,1395	6,5858
473,15	15,551000	0,0011565	0,127200	864,68	7,862000	852,400000	2793	1941,0	2,3308	6,4318
493,15	23,201000	0,0011900	0,086060	840,34	11,620000	943,700000	2802	1858,0	2,5179	6,2849
513,15	33,480000	0,0012291	0,059670	813,60	16,760000	1037,500000	2803	1766,0	2,7021	6,1425
533,15	46,940000	0,0012755	0,042150	784,01	23,720000	1135,100000	2796	1661,0	2,8851	6,0013
553,15	64,190000	0,0013321	0,030130	750,69	33,190000	1236,900000	2780	1542,9	3,0681	5,8573
573,15	85,920000	0,0014036	0,021640	712,45	46,210000	1344,900000	2749	1404,2	3,2548	2,7049
593,15	112,900000	0,0014990	0,015450	667,11	64,720000	1462,100000	2700	1237,8	3,4495	5,5353
613,15	146,080000	0,0016390	0,010780	610,13	92,760000	1594,700000	2622	1027,0	3,6605	5,3361
633,15	186,740000	0,0018940	0,006943	527,98	144,000000	1762,000000	2481	719,3	3,9162	5,0530
647,30	221,290000	0,0031700	0,03170	315,50	315,500000	2095,000000	2095	0	4,4300	4,4300

Tabl. 8. Zasićena vodena para (H_2O) ovisno o tlaku

Tlak p	Temperatura	Specifični volumen		Gustoća		Entalpija			Entropija	
bàra	T	v'	v''	ρ'	ρ''	i'	i''	r=i''-i'	s'	s''
	K	m^3/kg	m^3/kg	kg/m^3	kg/m^3	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg K	kJ/kg K
0,01	280,07	0,0010001	129,900000	999,90	0,00770	29,32	2513	2484,0	0,1054	8,974
0,02	290,66	0,0010014	66,970000	998,60	0,01493	73,52	2533	2459,0	0,2609	8,722
0,04	302,13	0,0010041	34,810000	995,92	0,02873	121,42	2554	2433,0	0,4225	8,473
0,06	309,33	0,0010064	23,740000	993,64	0,04212	151,50	2567	2415,0	0,5207	8,328
0,08	314,69	0,0010085	18,100000	991,57	0,05525	173,90	2576	2402,0	0,5927	8,227
0,10	318,99	0,0010103	14,680000	989,81	0,06812	191,90	2584	2392,0	0,6492	8,149
0,20	333,23	0,0010171	7,647000	983,19	0,13080	251,40	2609	2358,0	0,8321	7,907
0,40	342,27	0,0010222	5,226000	978,28	0,19130	289,30	2625	2336,0	0,9441	7,769
0,60	349,03	0,0010264	3,994000	974,28	0,25040	317,70	2636	2318,0	1,0261	7,670
0,80	366,67	0,0010385	2,087000	962,83	0,47920	391,80	2665	2273,0	1,2330	7,434
1,00	372,79	0,0010432	1,694000	958,59	0,59030	417,40	2675	2258,0	1,3026	7,360
2,00	393,38	0,0010605	0,885400	942,95	1,12900	504,80	2707	2202,0	1,5302	7,127
4,00	416,77	0,0010836	0,462400	922,85	2,16300	604,70	2738	2133,0	1,7770	6,897
6,00	331,99	0,0011007	0,315600	908,51	3,16900	670,50	2747	2086,0	1,9310	6,761
8,00	443,57	0,0011149	0,240300	896,94	4,16100	720,90	2769	2048,0	2,0460	6,663
10,00	453,03	0,0011273	0,194600	887,08	5,13900	762,70	2778	2015,0	2,1380	6,587
20,00	485,52	0,0011766	0,099580	849,91	10,04100	908,50	2799	1891,0	2,4470	6,340
40,00	523,48	0,0012520	0,049770	798,72	20,09000	1087,50	2801	1713,0	2,7960	6,070
60,00	548,71	0,0013185	0,032430	758,44	30,84000	1213,90	2785	1570,8	3,0270	5,890
80,00	568,13	0,0013839	0,023520	722,60	42,50000	1317,00	2758	1441,1	3,2080	5,745
100,00	584,11	0,0014521	0,010830	588,66	55,46000	1407,70	2725	1317,0	3,3600	5,615
120,00	597,78	0,0015270	0,014260	654,88	70,13000	1491,10	2685	1193,5	3,4960	5,492
140,00	609,78	0,0016110	0,011490	620,73	87,03000	1570,80	2638	1066,9	3,6230	5,372
160,00	620,47	0,0017100	0,009318	584,80	103,70000	1650,00	2582	932,0	3,7460	5,247
180,00	630,11	0,0018370	0,007504	544,37	133,20000	1732,00	2510	778,2	3,8710	5,107
200,00	638,86	0,0020400	0,005850	490,20	170,90000	1827,00	2410	583,0	4,0150	4,928
220,00	646,85	0,0027300	0,003670	366,30	272,50000	2016,00	2168	152,0	4,3030	4,591
221,29	647,30	0,0031700	0,003170	315,50	315,50000	2095,00	2095	0	4,4300	4,430

sl. 49. se obično crtaju kao jedna. Kompresija vode, na tlak kotla vrši se pojnom crpkom, a prikazan je u p-v dijagramu na slici 50. Prilike lijevo od donje granične linije (x=0) uveličane su da bi se uočile razlike, jer su stvarne prilike takove da donja granična krivulja, adijabata i izoterma (T_o - konst) praktički padaju zajedno. Energija za crpljenje i komprimiranje vode je zanemarivo malena prema mehaničkoj energiji koja se dobiva ekspanzijom pare, pa se s njom ne računa kod kružnog procesa, ali se uračunava u vlastiti potrošak termoelektrane.

Termički stupanj djelovanja Rankineova procesa (sl. 49) računa se prema izrazu:

$$\eta_T = 1 - T_o/T_m. \qquad (156)$$

Budući da je $T_m < T$, slijedi da je termički stupanj djelovanja Rankineova procesa manji od onoga u Carnotovu procesu.

Kad se žele prikazati procesi s vodenom parom, mnogo češće se upotrebljava prikazivanje s pomoću i-s dijagrama nego T-s ili p-v dijagrama. Dijagram u koordinatnom sistemu entalpija - entropija (i-s) dijagram), koji se po svom autoru naziva i Mollierov dijagram, ima znatne praktične prednosti. U njemu su entalpije prikazane dužinama, pa je te veličine stanja koje se pojavljuju u formulaciji prvog glavnog stavka za otvorene sisteme, moguće neposredno očitati. Zbog toga je i-s dijagram postao jedan od najvažnijih i najčešće upotrebljavanih dijagrama veličine stanja. Na slici 51. prikazan je u i-s dijagramu isti proces s mokrom parom, koji je prikazan u T-s dijagramu na sl. 49. i p-v dijagramu na slici 50. Kao i u T-s dijagramu i u i-s dijagramu točke 5. i 6. padaju praktički zajedno jer su izobare vrlo guste u području tekućeg agregatnog stanja (lijevo od donje granične krivulje). Unesu li se razlike entalpija, termički stupanj djelovanja procesa je:

$$\eta_T = 1 - (i_4-i_5)/(i_3-i_5) = (i_3-i_4)/(i_3-i_5) \qquad (157)$$

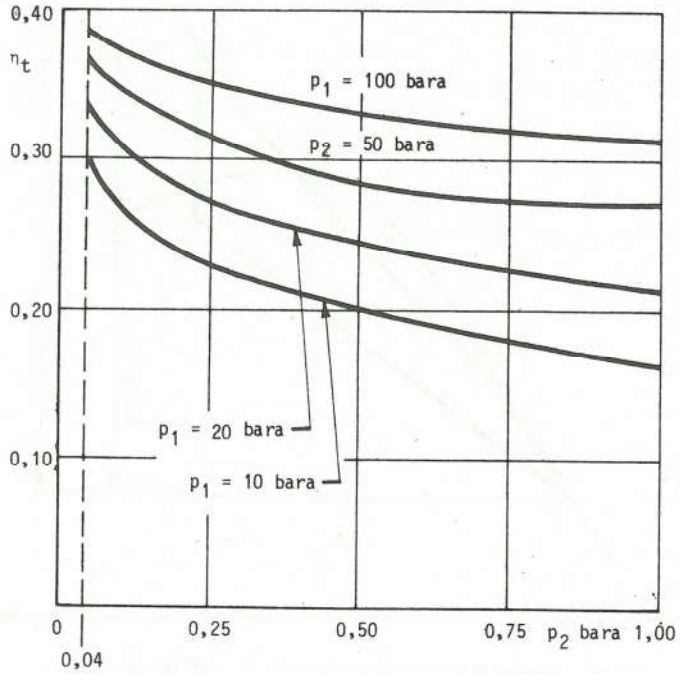
jer je razlika entalpija i_3-i_4 upravo jednaka mehaničkoj energiji koja se dobiva iz procesa ako ekspanzija teče po adijabati.

Termički stupanj djelovanja procesa s mokrom parom ovisi o tlaku svježe pare i tlaku p_2 na kraju procesa, što je prikazano na sl. 52. Iz slike je vidljivo da je taj porast vrlo malen u usporedbi s povišenjem tlaka. To se obrazlaže činjenicom, da s porastom tlaka srednja temperatura (T_m na sl. 50) sve polaganije raste, jer se sve više dolazi u uži dio ispod graničnih krivulja.

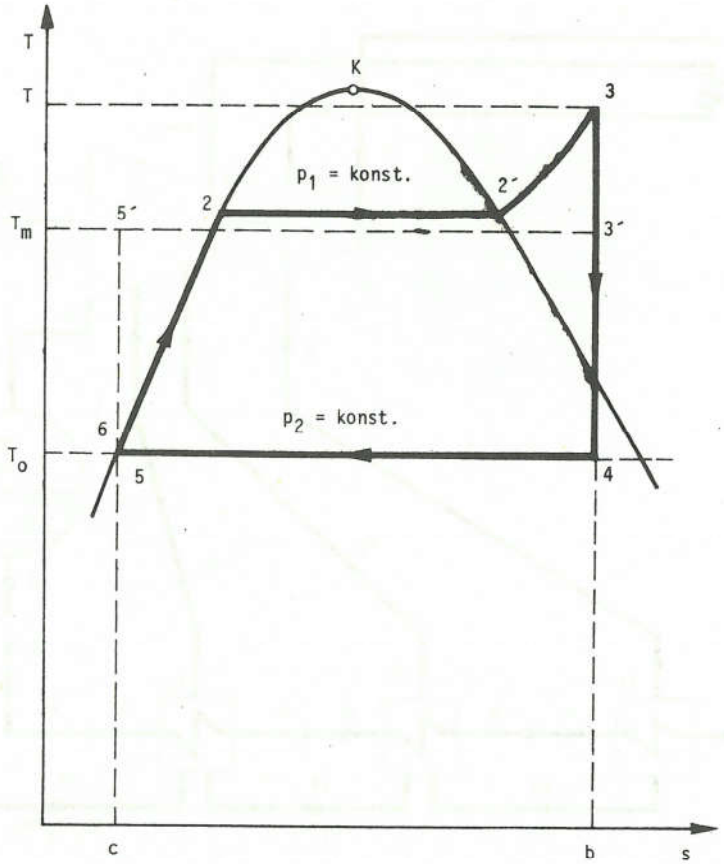
Kako bi se izbjegli visoki tlakovi, a da se ipak postignu visoke temperature, normalno se proces izvodi s pregrijanom parom. Na sl. 53. prikazan je proces s pregrijanom parom u T-s dijagram, a na sl. 54. u i-s dijagram. Proces teče tako da se voda u kotlu zagrijava od stanja 6 do stanja 2, zatim se isparava do stanja 2 i u pregrijačima pregrijava do stanja 3. Ovako pregrijana para ulazi u turbinu gdje adijabatski ekspandira do stanja 4, pri čemu se dobiva rad. Para stanja 4 obično ima tlak reda veličine 0.05 bara i temperaturu oko 313 K. Obično je to zasićena para s 3% vlažnosti. Nakon izlaska iz turbine para odlazi u kondenzator gdje se kondenzira (stanje 5), a od stanja 5 do stanja 6 postupak je isti kao i kod mokre pare tj. crpljenje i kompresija vode na tlak kotla p_2 (stanje 6). Kod promatranja ovog procesa također se zanemaruje rad crpke u odnosu na rad ekspanzije u turbini.

Termički stupanj djelovanja računa se po istoj formuli (157) kao i kod rada mokre pare.

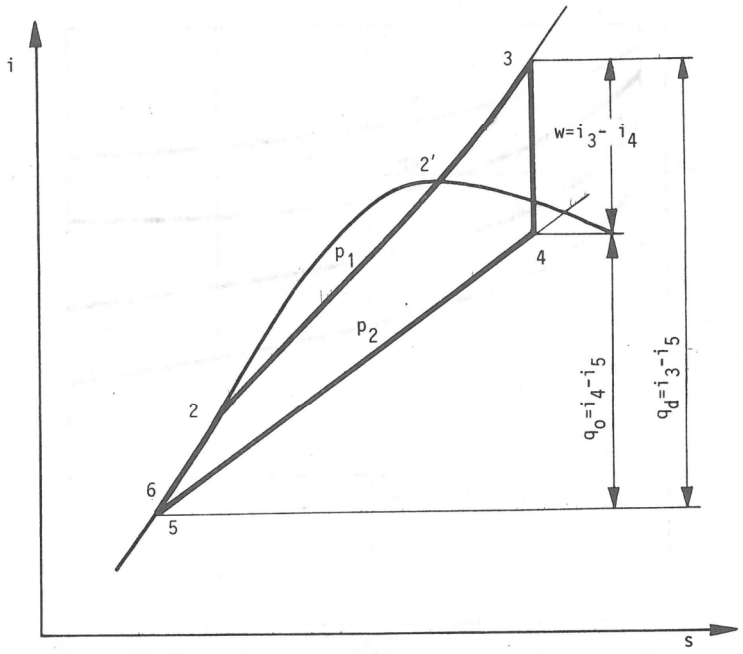
Opisani proces je praktički najjednostavniji proces parnog postrojenja. Na slici 55. prikazana je shema slična ovom procesu poboljšana s regenerativnim



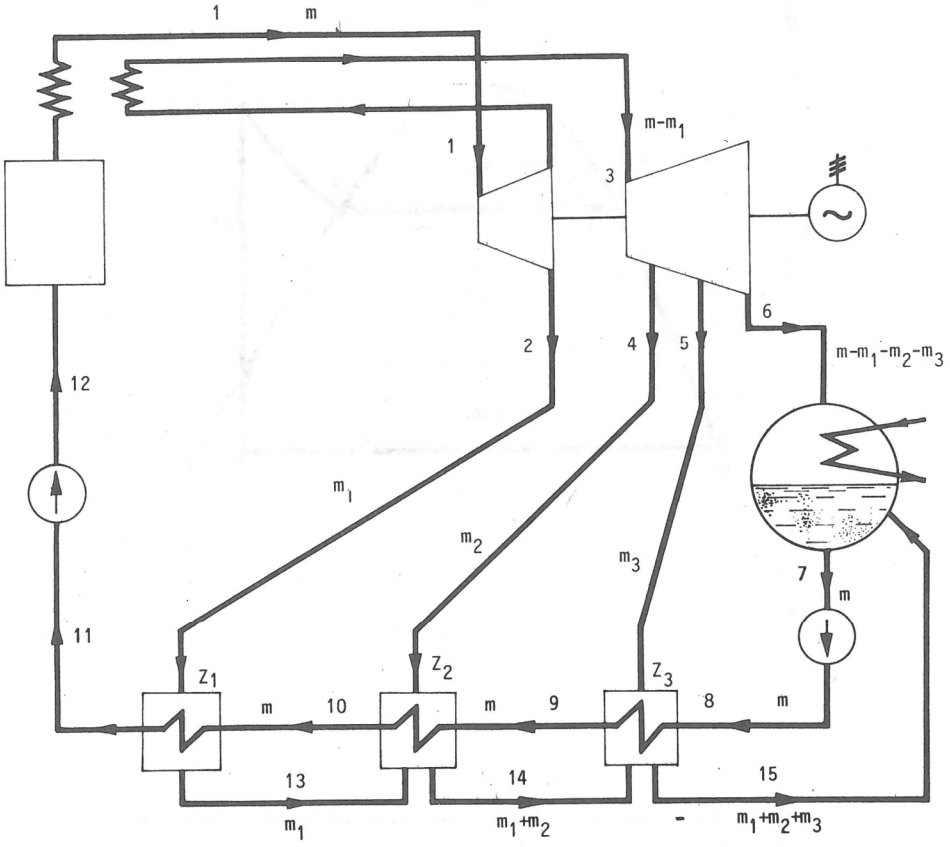
Sl. 52. Termički stupanj djelovanja η_t procesa s mokrom parom ovisno o tlaku na kraju ekspanzije, a za različite vrijednosti tlaka svježe pare



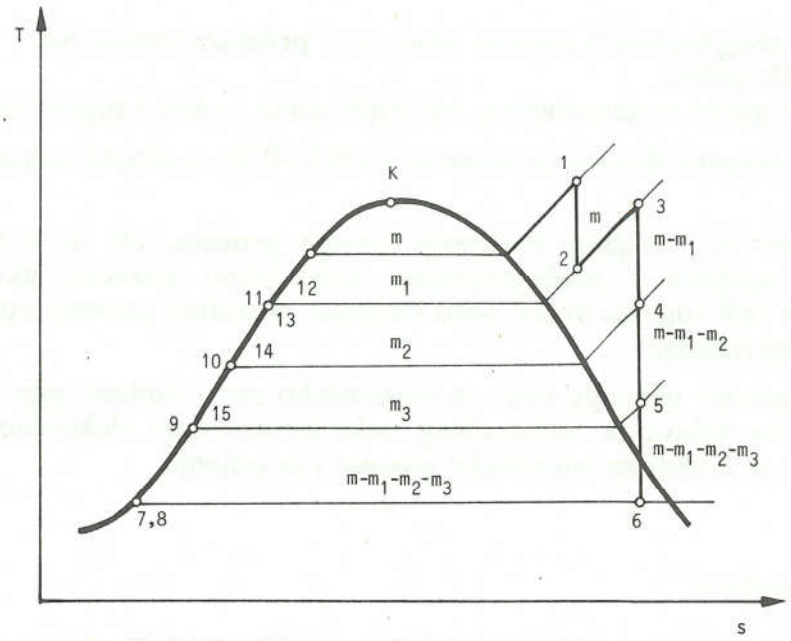
Sl. 53. Proces pregrijanom parom u T, s-dijagramu



Sl. 54. Proces s pregrijanom parom u i, s-dijagramu



Sl. 55. Poboljšani proces parnog ciklusa - blok shema



Sl. 56. T-s dijagram poboljšanog parnog ciklusa

zagrijavanjem vode i međupregrijanjem pare, a na slici 56. T-s dijagram parnog ciklusa s naznakom količina medija.

Određivanje količina medija za pojedine zagrijače može se odrediti iz bilanci topline pojedinih zagrijača:

I zagrijač z_1:

$$m_1 i_2 + m\, i_{10} = m i_{11} + m_1 i_{13} \tag{158}$$

II zagrijač z_2:

$$m_2 i_4 + m i_9 + m_1 i_{13} = m i_{10} + (m_1 + m_2) i_{14} \tag{159}$$

III zagrijač z_3:

$$m_3 i_5 + m i_8 + (m_1 + m_2) i_{14} = m i_9 + (m_1 + m_2 + m_3) i_{15}. \tag{160}$$

Uz navedene tri jednadžbe i uz poznavanje snage turbine koja se može izraziti jednadžbom:

$$P = m(i_1 - i_2) + (m - m_1)(i_3 - i_4) + (m - m_1 - m_2)(i_4 - i_5) + \\ + (m - m_1 - m_2 - m_3)(i_5 - i_6) \tag{161}$$

mogu se odrediti sve četiri nepoznanice, m, m_1, m_2 i m_3. Nakon toga mogu se odrediti dovedene i odvedene količine energije. Dovedena količina energije jednaka je:

$$Q_d = Q_{11\text{-}1} + Q_{3\text{-}2} = m(i_1 - i_{11}) + (m - m_1)(i_3 - i_2). \tag{162}$$

Termički stupanj djelovanja ovog procesa računa se prema ustaljenom postupku

$$\eta_T = p/Q_d. \tag{163}$$

Da bi se izračunao ukupni stupanj djelovanja postrojenja potrebno je navesti i ostale gubitke:

- u turbini zbog toga što ekspanzija ne teče adijabatski jer postoji trenje

- u kotlu, zbog topline u dimnim plinovima, prijelaza topline itd.
- mehanički gubici
- toplinski gubici u cjevovodima, izmjenjivačima topline i regeneratorima.

Termički stupanj djelovanja kreće se od 0.35-0.50, a ukupni stupanj djelovanja od 0.25-0.40.

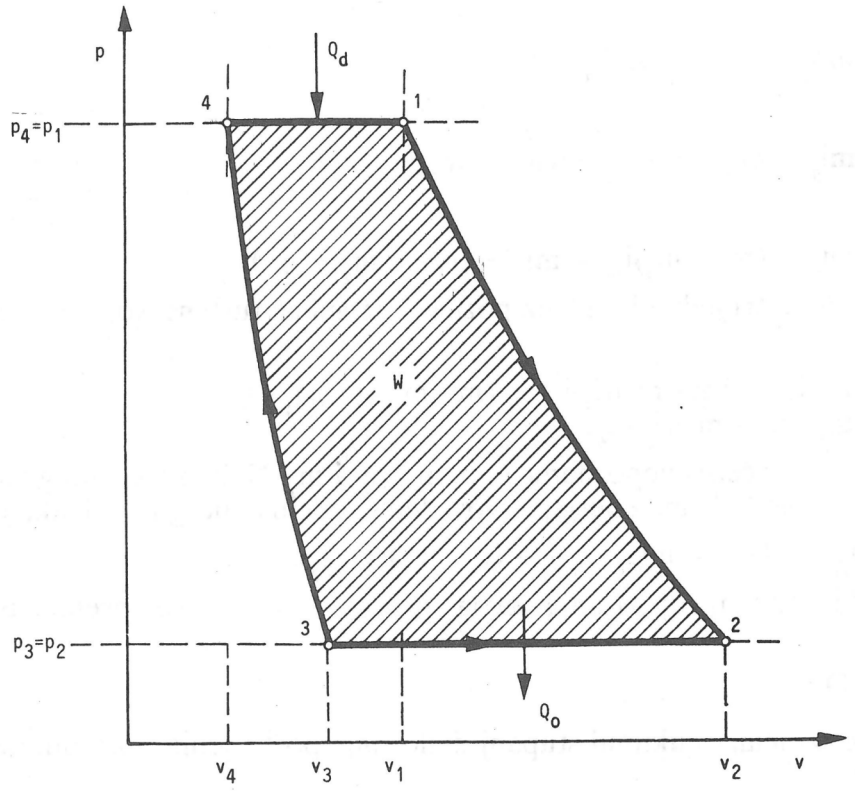
Postoji još niz varijanti korištenja parnih procesa, ali se uvođenjem više regenerativnih zagrijača i međupregrijača neće bitno povećati ukupni stupanj djelovanja, pa je radi toga za svaku novu varijantu potrebno provesti optimizaciju, tj. traženje najboljeg rješenja.

Na prikazanom principu rade se termoelektrane - toplane gdje se jedan dio energije koristi za dobivanje mehaničkog rada (proizvodnju električne energije), a drugi dio topline se koristi za tehnološke procese i za grijanje.

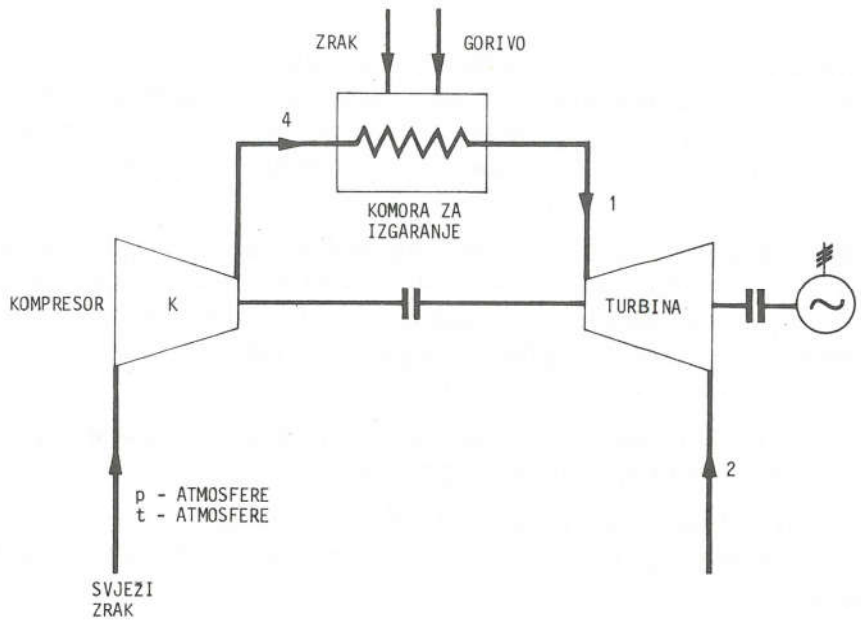
2.4.3.2. Plinske turbine

Plinske turbine kao i parne spadaju u motore s "vanjskim" izgaranjem. Radni medij se stvara izgaranjem smjese zraka i goriva u komori za izgaranje.

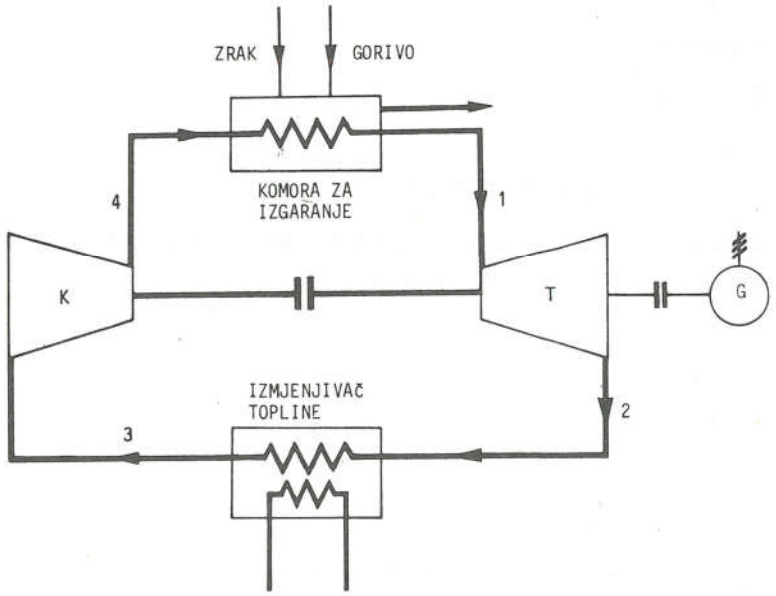
Proces turbo-stroja je praktički Jouleov kružni proces, sastavljen od dvije izobare i dvije realne adijabate (sl. 57). Realizacija takvog procesa može se ostvariti u postrojenjima (prikazanim na slikama 58. i 59. Na sl. 58. prikazano je postrojenje bez izmjenjivača topline. U tom slučaju se radi o otvorenom procesu, za razliku od zatvorenog procesa (sl. 59) u kome je ugrađen izmjenjivač topline.



Sl. 57. p-v dijagram TURBO-STROJA (JOULE-ov PROCES)



Sl. 58. Blok shema otvorenog procesa TURBO-STROJA



Sl. 59. Blok dijagram zatvorenog procesa TURBO-STROJA

Proces u postrojenju teče tako da kompresor komprimira zrak od tlaka atmosfere (ako se radi o otvorenom procesu) ili od nekog konstantnog tlaka u izmjenjivaču topline (ako se radi o zatvorenom procesu) i minimalne temperature (tlak $p_2 = p_3$ i temperatura $T_3 = T_{min}$ na sl. 57) na viši tlak p_4 i temperaturu T_4. Komprimirani zrak odlazi u komoru za izgaranje gdje se mediju dovodi toplina (stanje 4-1). Izgaranje se vrši uz konstantni tlak ($p_4 = P_1$), ali se povećava temperatura s T_4 na T_1 na T_1 (najviša temperatura). Tako zagrijani medij ulazi u turbine gdje ekspandira sa tlaka p_1 i temperature T_1 na tlak p_2 i temperaturu T_2. Ako se radi o otvorenom procesu onda je to tlak okoline, a ako se radi o zatvorenom procesu onda je to tlak u

izmjenjivaču topline. Nakon ekspanzije plinova prema sl. 57. od stanja 2 do stanja 3 je odvođenje topline pri konstantnom tlaku. Da bi se osigurao prijelaz topline temperatura u komori za izgaranje nešto je viša od maksimalne temeperature T_1, a temperatura u izmjenjivaču ili okolna temperatura nešto niža od minimalne temperature T_4.

Kod zatvorenog procesa radni medij stalno kruži u procesu što izaziva razliku u izvedbi komore za izgaranje. Naime, kod otvorenog procesa kompresor usisava zrak kojega komprimira i koji izgara s gorivom u komori za izgaranje, a kod zatvorenog procesa komprimira se smjesa plinova izgaranja koja se odvodi u komoru za izgaranje.

Zbog svoje izvedbe zatvoreni proces ima izvjesne prednosti ali i mane nad otvorenim procesom. Prednosti zatvorenog procesa:

- na ulazu u turbinu mogu imati veći tlak - veću snagu
- manje je onečišćenje lopatica, manja je korozija i može koristiti gorivo slabije kvalitete,

dok je osnovna mana kompliciranije i veće postrojenje.

Budući da je kod Jouleova procesa riječ o dovođenju i odvođenju topline uz p = konst., specifična količina topline može se odrediti iz izraza:

$$q_d = c_p(T_1-T_4) \tag{164}$$

a odvedena toplina:

$$q_o = C_p(T_2-T_3). \tag{165}$$

Termički stupanj djelovanja

$$\eta_T = 1 - q_o/q_d = 1 - (T_2-T_3)/(T_1-T_4). \tag{166}$$

Budući da su adijabatske promjene stanja između 1 i 2, te između 3 i 4, za omjere temperatura može se prema (148) pisati:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}. \tag{167}$$

i

$$\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{p_3}{p_4}\right)^{\frac{k-1}{k}}. \tag{168}$$

S obzirom na to da je $p_2 = p_3$ i $p_1 = p_4$, slijedi da je:

$$T_1 = T_2 T_4/T_3. \tag{169}$$

Uvrštavanjem vrijednosti za T_1 u jednadžbu (166) dobiva se izraz za termički stupanj djelovanja:

$$\eta_T = 1 - T_3/T_4. \tag{170}$$

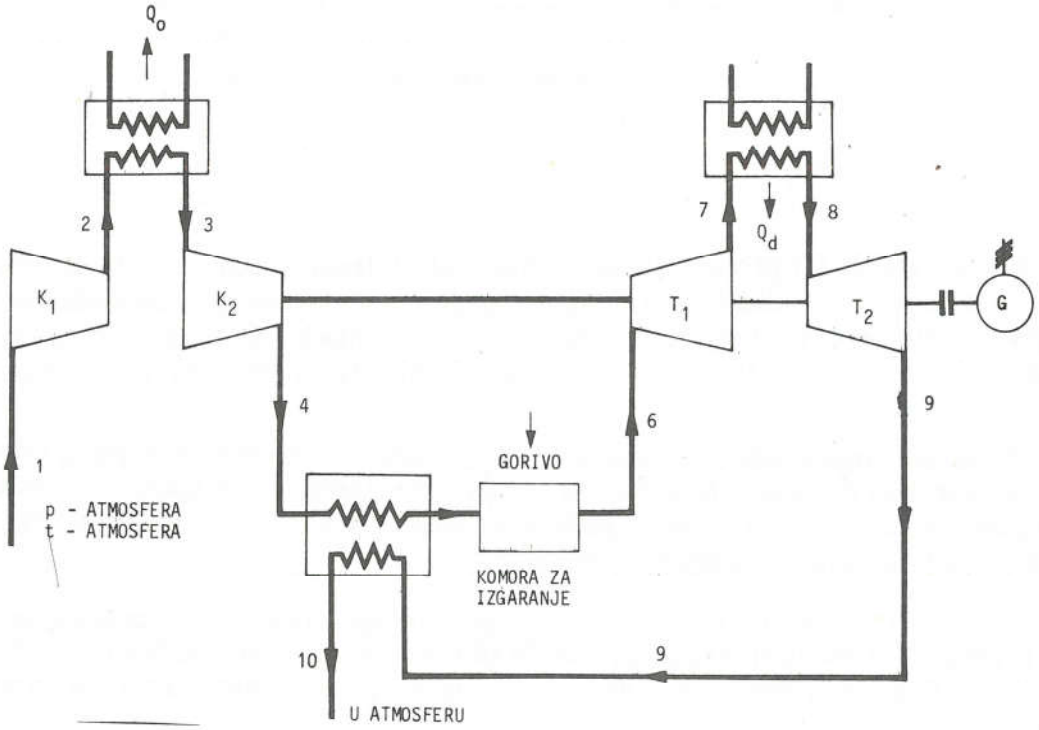
Ako je pak omjer kompresije p_4/p_3, za termički stupanj djelovanja dobiva se

$$\eta_T = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\frac{k-1}{k}}}, \tag{171}$$

Dakle, termički stupanj djelovanja ovisi o stupnju kompresije i o vrsti pogonskog medija ili o (ulaznoj i izlaznoj) temperaturi medija kroz turbinu. Veći omjer kompresije i veća ulazna temperatura daju veći termički stupanj iskorištenja.

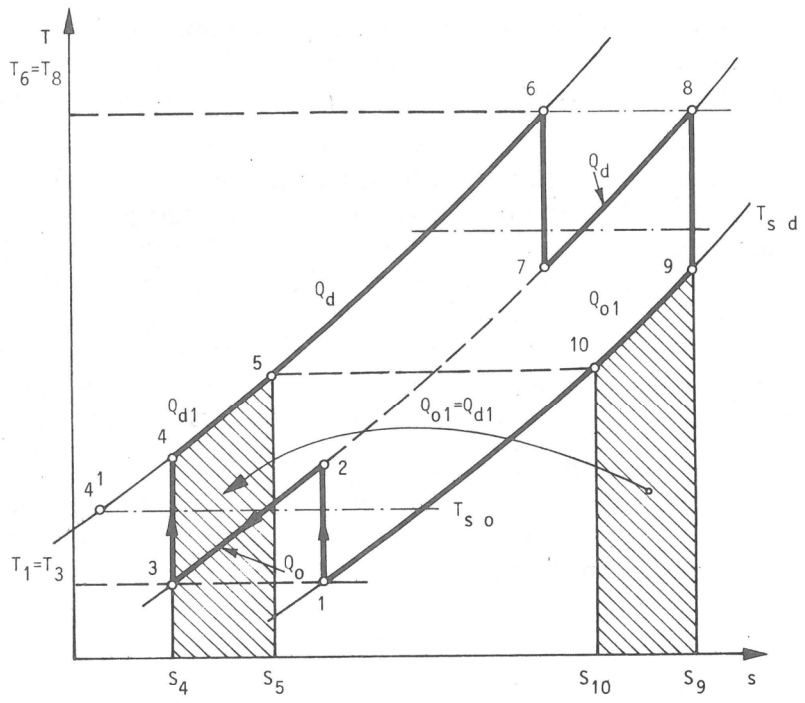
Plinovi izgaranja u komori za izgaranje imaju temperaturu i do 1750 K. Ovako visoku temperaturu ne mogu podnijeti lopatice turbine, pa se radi toga, da se snizi temperatura, u komoru dodaje i do 4 puta više zraka nego je potrebno za izgaranje. Niže temperature izgaranja daju i nižu temperaturu medija za dovođenje topline pa prema (118) i niži termički stupanj djelovanja. Kad bi lopatice mogle podnijeti 1125 K do 1175 K stupanj djelovanja bi dostigao do 0.37. Smatra se da bi takav stupanj djelovanja bio dovoljan razlog da zamjeni motore s unutarnjim izgaranjem s maksimalnim stupnjem djelovanja 0.48. Naime, manji stupanj djelovanja turbine nadoknadio bi se ukupnom ekonomičnošću (jednostavnijom i jeftinijom izvedbom).

Da bi se postigao nešto bolji stupanj djelovanja uvode se stupnjevane kompresije i ekspanzije s međuhlađenjem i međupredgrijanjem pogonskog medija, te eventualnim iskorištenjem topline izlaznih vrućih plinova. Shematski prikaz jednog takvog postrojenja prikazan je na slici 60, koji se suštinski ne razlikuje od već spomenutog otvorenog procesa.



Sl. 60. Blok shema poboljšanog procesa TURBO-STROJA

Kompresor (K_1) uzima zrak iz atmosfere (stanje 1 na T-s dijagramu sl. 61) komprimira ga na viši tlak i temperaturu (stanje 2). Nakon toga se u izmjenjivaču topline hladi zrak na temperaturu okoline (stanje 3) i ponovo komprimira do stanja 4. Tako komprimirani zrak prolazi kroz izmjenjivač topline i zagrijava se do temperature koja odgovara stanju T_1 i odatle odlazi u komoru za izgaranje. Plinovi izgaranja (stanje 6) imaju određeni tlak i temperaturu i ekspandiraju u prvom stupnju turbine (T_1) na tlak i temperaturu stanja 7. Nakon ekspanzije kroz prvi stupanj turbine, plinovi izgaranja idu u izmjenjivač topline gdje se zagrijavaju do temperature i tlaka



Sl. 61. T-s dijagram poboljšanog procesa TURBO-STROJA

koji odgovara stanju 8 i prolaze (ekspandiraju) kroz drugi stupanj turbine do stanja 9. S ispušnim plinovima odlazi se u izmjenjivač topline u kome se komprimirani zrak zagrijava od stanja 4 na stanje 5, a ispušni plinovi se hlade od stanja 9 na stanje 10 i odlaze u atmosferu ili za neko drugo korištenje (zagrijavanje) prije odlaska u atmosferu.

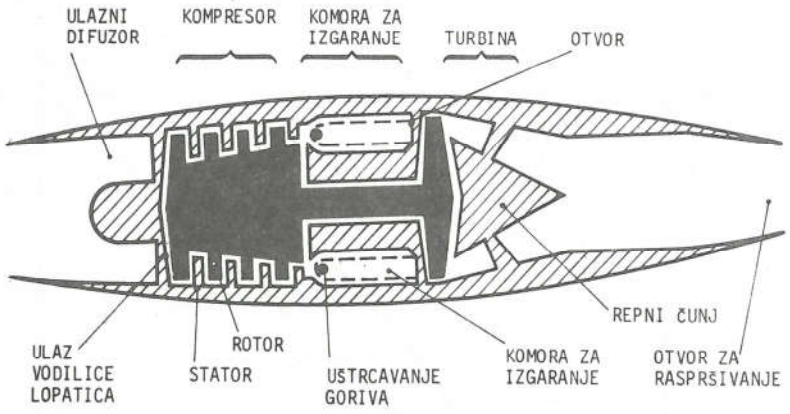
Iz navedenoga može se zaključiti da se procesu izvana dovodi toplina od stanja 5 (ne od stanja 4) do stanja 6, zatim od stanja 7 do stanja 8 i od stanja 2 do stanja 3. Na ovakav način povećava se srednja temperatura dovođenju topline, a na taj način prema (118) povećava se i stupanj djelovanja.

Teoretski gledano kad bi se u postrojenju postavilo beskonačan broj međupregrijanja i međuhlađenja, proces bi bio omeđen dvjema izobrama 6'-9' i 4'-1' (sl. 61), te dvjema izobarama 4'-6' i 1'-9', pa bi stupanj djelovanja bio kao kod Carmot-ova procesa:

$$\eta_T = 1 - T_{sro}/T_{srd} \qquad (172)$$

gdje su: T_{sro} srednja odvedena temperatura, a T_{srd} srednja dovedena temperatura.

Plinska turbina s otvorenim procesom znatno se više upotrebljava za pogon aviona (reaktivni pogon) nego za pogon ostalih strojeva ili za proizvodnju električne energije. Reaktivni pogon temelji se na sili reakcije, a koja je posljedica kinetičke energije plinova na izlazu iz motora. Shematski prikaz avionskog turbo-stroja naveden je na slici 62. iz koje se vidi da je cijeli motor smješten u cijevi specijalnog oblika. Rad turbo-stroja odvija se tako da zrak ulazi u stroj brzinom kojom leti avion. U prednjem dijelu smješten je kompresor koji komprimira zrak i šalje ga u komoru za izgaranje. U komoru za izgaranje uštrcava se gorivo i nakon izgaranja vrući plinovi struje kroz plinsku trubinu. Budući da su i turbina i kompresor na istoj osovini turbina tjera



Sl. 62. Shematski prikaz subsoničnog turbomlaznog stroja s aksialnim tokom

kompresor. Plinovi izgaranja samo djelomično ekspandiraju u turbinu, do nekog tlaka koji je viši od tlaka okoline, jer turbina treba proizvesti samo toliku snagu da pokreće kompresor. Preostali tlak entalpije uz ekspanziju do tlaka okoline pretvara se u kinetičku energiju, jer plinovi izgaranja izlaze iz motora brzinom većom od brzine aviona i radi toga se pojavljuje sila reakcije koja omogućuje da avion leti.

Sila reakcije ovisna je o količini (masi) zraka (m) koji prolazi kroz turbinu i razlici brzina na izlazu (c_i) i na ulazu (c_u) motora dakle:

$$F = m(c_i - c_u). \tag{173}$$

Reaktivna snaga dobiva se iz izraza:

$$P_k = c_u F = m c_u (c_i - c_u). \tag{174}$$

Iz razlika kinetičkih energija na izlazu plinova izgaranja iz cijevi i zraka na ulazu u nju izračunava se snaga:

$$p = \frac{m}{2}(c_i^2 - c_u^2). \tag{175}$$

Stupanj djelovanja propulzije računa se iz:

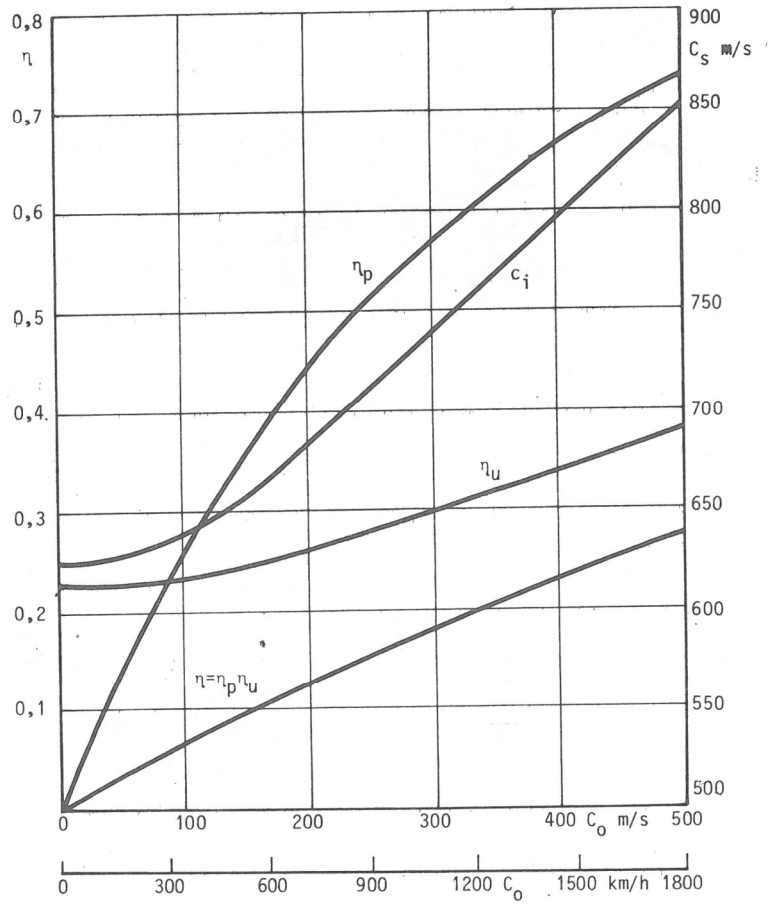
$$\eta_p = \frac{P_R}{p} = \frac{2}{1 + \frac{c_i}{c_u}}. \tag{176}$$

Unutarnji stupanj djelovanja jednak je:

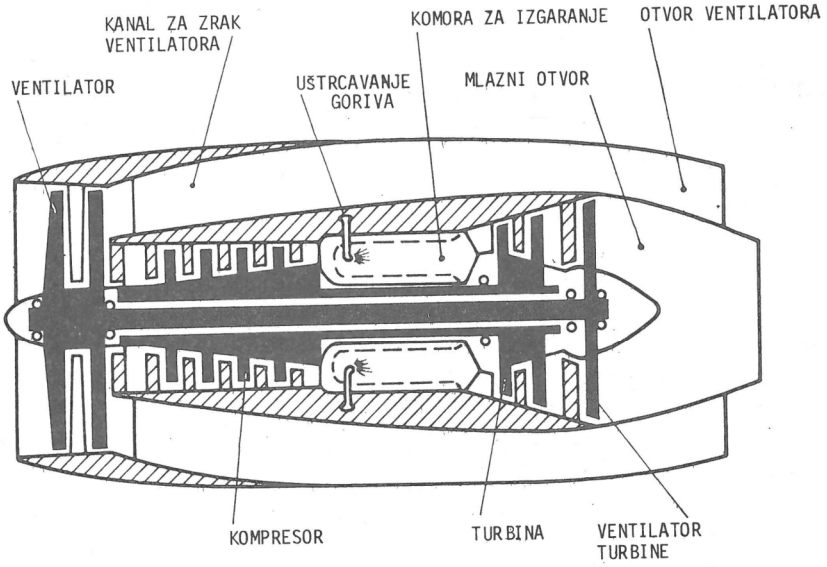
$$\eta_u = \frac{P}{m_g \cdot h_d} = \frac{m}{2} \frac{c_v^2 - c_u^2}{m_g \cdot h_d}. \tag{177}$$

gdje je m_g masa goriva dovedena u jedinici vremena, a h_d donja ogrjevna moć goriva.

Iz navedenih jednadžbi (176 i 177) i dijagrama na sl. 63, vidljivo je da stupanj



Sl. 63. Stupanj djelovanja propulzije η_p, unutrašnji stupanj djelovanja η_u i ukupni energetski stupanj djelovanja η, te izlazna brzina c_i u reaktivnom motoru s plinskom turbinom



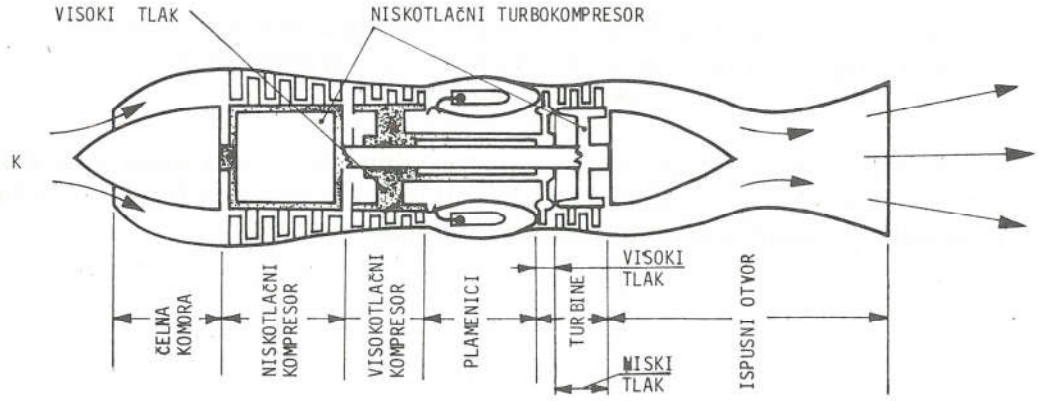
Sl. 64. Shema turbostroja s ventilatorom

djelovanja propulzije (η_p) i unutarnji stupanj djelovanja (η_u) rastu s povećanjem brzine aviona, pa stoga i ukupni stupanj djelovanja postaje veći, a računa se prema izrazu:

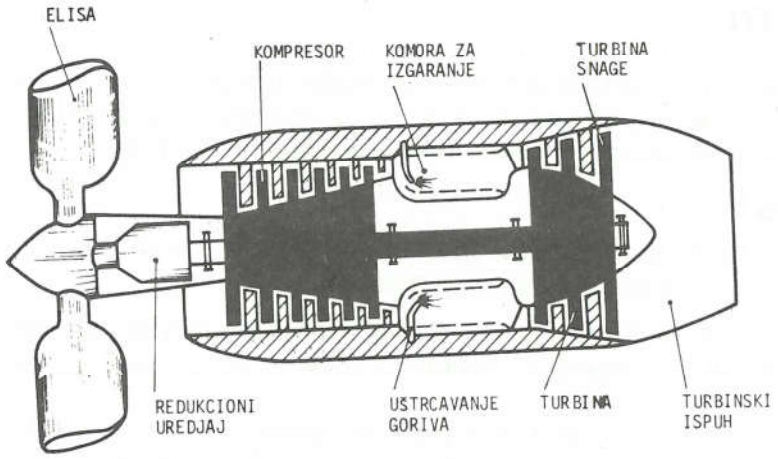
$$\eta = \eta_p \eta_u . \qquad (178)$$

Unatoč tome što avioni lete brzinom između 800-1000 km/h ukupni stupanj djelovanja veoma je nizak (sl. 63). Da bi se taj nedostatak koliko toliko popravio u praksi postoji nekoliko izvedbi turbo-strojeva kao npr. s jednim kompresorom ili s dva kompresora, jednom ili s dvije turbine (ili jednorednom i dvorednom turbinom), s dodatnim izgaranjem, s pomoćnom elisom, s dodatnim ventilatorima, ili s kombinacijama navedenih osnovnih dijelova. Turbo-stroj s ventilatorom prikazan je na sl. 64, turbo-mlazni stroj na sl. 65, a turbo-elisni stroj na sl. 66.

Turbo-mlazni strojevi su najčešći u upotrebi i upotrebljavaju se za velike brzine. Za manje brzine aviona, kad reaktivni motor ima vrlo mali stupanj djelovanja, upotrebljava se turbo-elisni stroj. U toj izvedbi plinska turbina tjera i kompresor i elisu koji su svi na istoj osovini. Pri manjim brzinama pogon s elisom postiže nešto



Sl. 65. Dvorotorski turbomlazni stroj



Sl. 66. Turboelisni stroj s turbinom snage

bolji ukupni stupanj djelovanja. Turbo-stroj s ventilatorom koristi se za brzine između naprijed navedena dva tipa turbo strojeva.

Prednosti turbo-strojeva u odnosu na ostale toplinske strojeve mogu se ukratko sumirati kako slijedi:

- manje dimenzije, manja težina i jednostavnija izvedba
- mirniji hod, što je posljedica rada turbine (samo kružno gibanje)
- ne trebaju sistem za hlađenje
- veća mehanička iskoristivost
- sposobnost za lakše balansiranje
- nemaju ograničenja u veličini
- mala frontalna površina za lakše svladavanje otpora zraka
- mogućnosti rada s manje kvalitetnim gorivom
- jednostavnost održavanja i podmazivanja
- neznatno vrijeme zagrijavanja
- velika pouzdanost
- duži vijek trajanja.

Nedostaci turbo-strojeva u odnosu na ostale toplinske strojeve održavaju se kroz slijedeće:

- znatno niži stupanj djelovanja, a time i viši specifični potrošak goriva
- slaba mogućnost promjene ubrzanja ili odgovarajuće snage
- osjetljivost na temperaturu ulaznog zraka.

Na kraju se može zaključiti da će pogon plinskih turbina imati značajnu ulogu u budućnosti, i uz otklanjanje ili djelomično otklanjanje navedenih nedostataka mogle bi još značajnije potisnuti upotrebu ostalih toplinskih strojeva.

2.5. PRETVORBE POTENCIJALNE ENERGIJE VODE U MEHANIČKU ENERGIJU

2.5.1. OPĆENITO

Prema definiciji potencijalna je energija posljedica međusobne privlačnosti Zemljine mase i mase tijela (m) koja je iznad Zemlje, a u Zemljinu gravitacijskom polju. Potencijalna se energija prema definiciji, može izraziti kao:

$$W_p = mg\,(h_2-h_1) \qquad (179)$$

gdje su: m masa tijela, g ubrzanje Zemljine sile teže, h_2 razina na kojoj se nalazi tijelo mase m i h_1 razina do koje se giba tijelo mase m.

Da bi se mogla odrediti potencijalna energija vodotoka potrebno je poznavati količinu vode (masu m) i visinsku razliku na kojoj će se koristiti dotična količina vode.

Voda koja protiče vodotocima pada na površinu Zemlje u obliku oborina, pa količine vode ovise u prvom redu o njima. Dio oborina ishlapljuje i ne pojavljuje se u vodotocima, a ostatak otiče rijekama i potocima u more.

Odnos između količine vode koja otječe i one koja pada u obliku oborina (faktor otjecanja) mijenja se u vrlo širokim granicama, a ovisi o mnogim faktorima (geološki sastav terena, nagib zemljišta, vegetacija, vremenski raspored oborina i dr.). Aposlutna visina vodotoka H nad morem smanjuje se sve više od izvora do ušća, dok se količina vode (V) koja u toku godina proteče vodotokom povećava od izvora prema ušću.

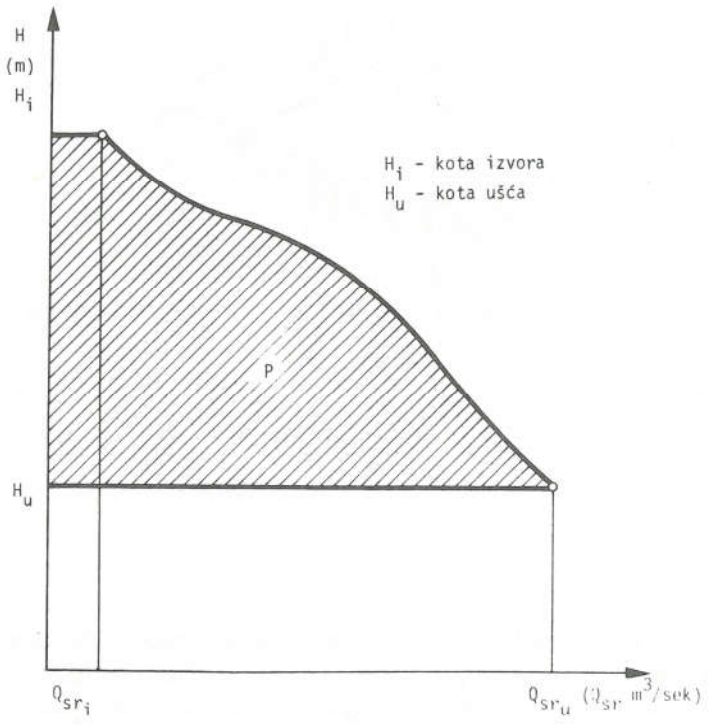
Ukupna količina vode (V m^3), koja protiče vodotokom tijekom godine, naziva se *srednjim protokom* Q_{sr} (m^3/sek).

Za određeni vodotok svakoj koti H odgovara određeni srednji protok pa to omogućuje prikazivanje prilika pomoću Q H - dijagrama (sl. 67).

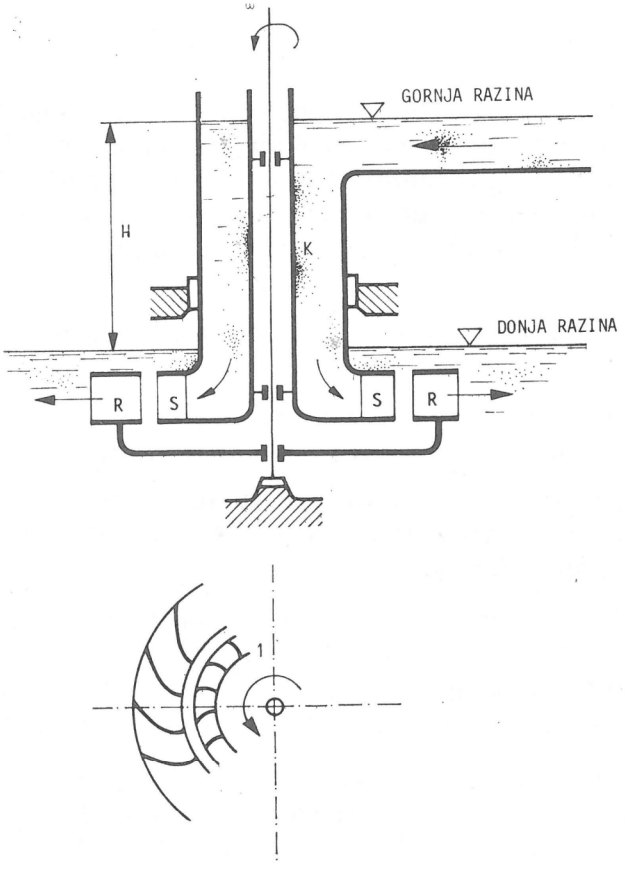
Energija koju ima voda u vodotoku (u kome struji nekom brzinom) sastoji se od energije tlaka, ili potencijalne i kinetičke energije, a one se preko turbina pretvaraju u mehaničku energiju.

Razvoj vodnih turbina u današnjem smislu datira iz 1837. godine kada je konstruirana Fourneyranova turbina (sl. 68). U toj turbini voda struji od osovine prema obodu tako da se strujanje vode usmjerava lopaticama statora, a okretanjem lopatica rotora, energija vode se pretvara u mehaničku energiju.

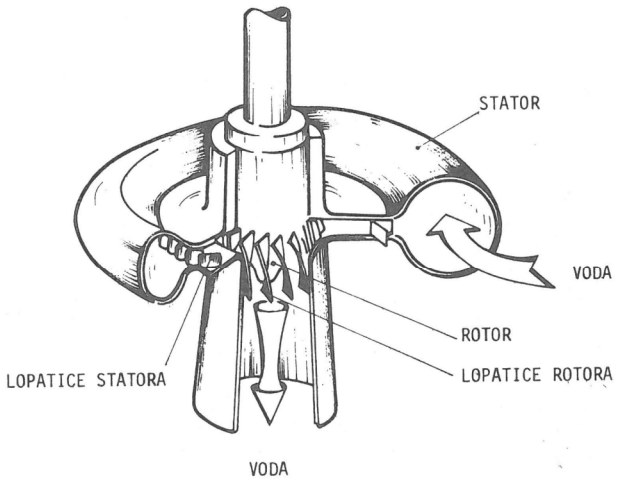
Nakon toga razvila su se tri osnovna tipa turbina. Francis turbina (konstruirana 1847. godine) upotrebljava se za padove do 500 m a izvode se s vertikalnom i horizontalnom osovinom. Na sl. 69. prikazana je shema Francisove turbine s vertikalnom osovinom. 1878. godine Amerikanac Pelton konstruirao je vodnu turbinu (sl. 70), slobodnog mlaza koja je po njemu prozvana Pelton turbina. Izvodi se s jednom ili više mlaznica, a upotrebljava se za padove iznad 500 m. I konačno Kaplan turbina (sl. 71) za manje padove (konstruirao ju je Kaplan 1922. godine) a može biti s



Sl. 67. Q-H dijagram vodotoka

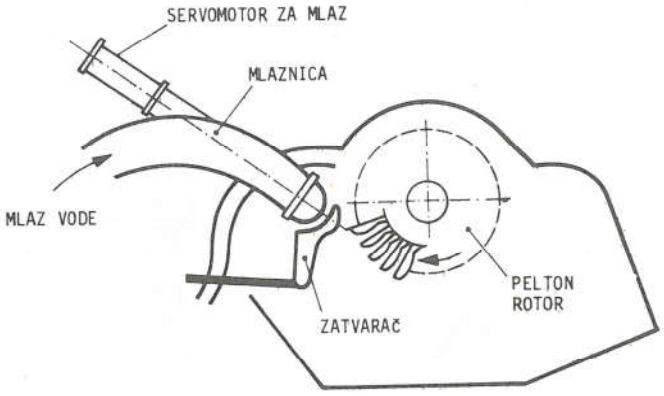


Sl. 68. Skica Fourneyronove vodne turbine;
S - stator, R - rotor

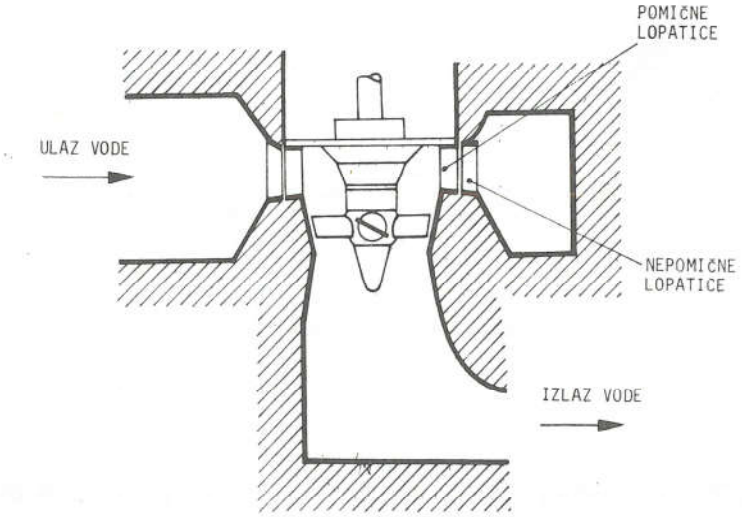


Sl. 69. Presjek i princip rada Francis turbine

pomičnim (Kaplan) ili čvrstim rotorskim lopaticama (poznata pod imenom propelerna turbina). Kod primjene pojedinih tipova turbina nema oštrih granica, nego se područje njihove primjene preklapa tako da se za neki pad može upotrijebiti jednom Pelton ili Francis, a drugi put Francis ili Kaplan.



Sl. 70. Presjek i princip rada Pelton turbine



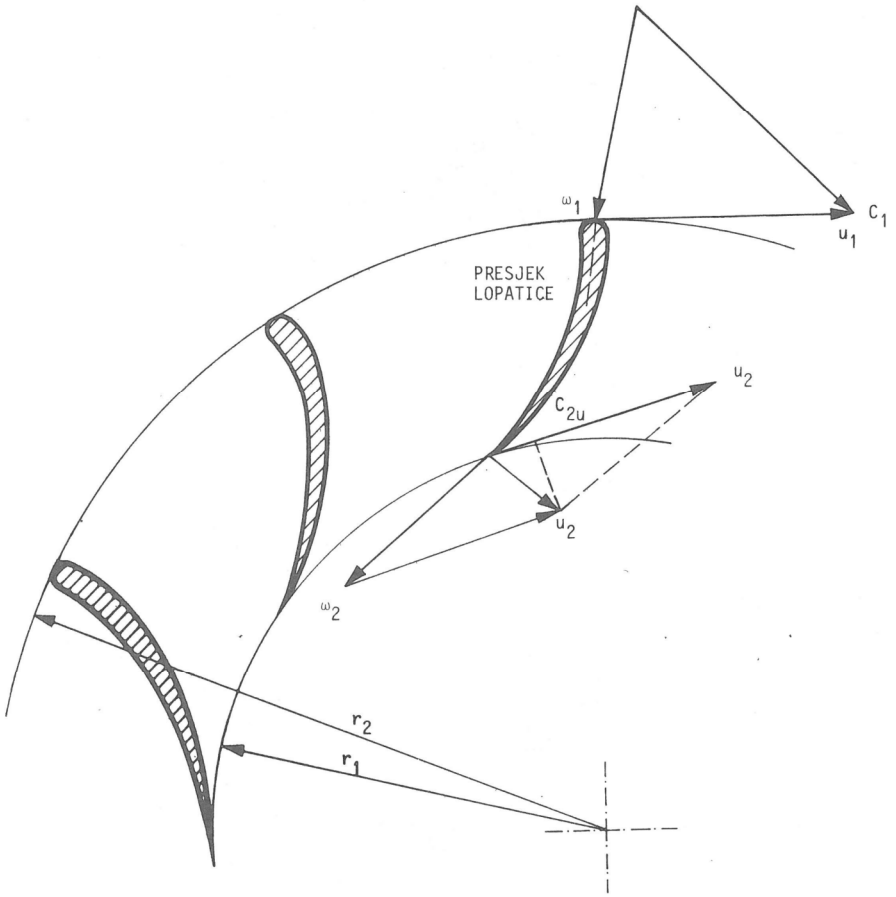
Sl. 71. Presjek i princip rada Kaplan turbine

Kaplanova i Francisova turbina su tzv. pretlačne ili reakcione turbine, a njihovo je obilježje da im je tlak na ulazu u rotor veći od tlaka na izlazu iz rotora. Kod ove vrste turbina (pretlačnih) dio se energije tlaka pretvara u kinetičku energiju u statoru, a dio u rotoru. Kod turbine slobodnog mlaza (Pelton) tlak je na ulazu u rotor jednak tlaku na njegovu izlazu, jer se sva energija tlaka pretvara u kinetičku energiju vode u statoru.

2.5.2. SNAGA I STUPANJ DJELOVANJA TURBINE

Snaga reakcione turbine može se odrediti pomoću Eulerove osnovne jednadžbe za turbostrojeve koja glasi:

$$P = u_1 c_1 \cos \alpha_1 - u_2 c_2 \cos \alpha_2 \qquad (180)$$



Sl. 72. Prikaz brzina kod pretlačnih brzina

gdje su prema sl. 72. u_1 obodna brzina u točki 1, $c_1 \cos \alpha_1$ projekcija brzine u točki 1 u smjeru obodne brzine u_1, a u_2 obodna brzina u točki 2 i $c_2 \cos \alpha_2$ projekcija brzine u točki 2 u smjeru obodne brzine u_2.

Do snage na osovini reakcione turbine može se doći ako se promotri kretanje vode od točke 1 ispred turbine do točke 2 iza turbine sl. 73. Za svaku od tih točaka mora biti

$$p_x = \frac{p_x}{\rho} + \frac{c_x^2}{2} + gh_x \qquad (181)$$

gdje je p_x/ρ snaga tlaka kao posljedica stupca vode iznad točke x i tlaka okoline p_o, ρ gustoća vode (kg/m^3), c_x brzina vode u točki x, pad u točki x. Snaga na turbini dobiva se kao razlika snaga u točki 1 i 2, a ona iznosi:

$$p_k = Q(P_1 - P_2) = Q_g\left(\left(\frac{p_1}{\rho} + \frac{c_1^2}{2g} + gh_1\right) - \left(\frac{p_2}{\rho} + \frac{c_2^2}{2g} + gh_2\right)\right) \qquad (182)$$

Ako p_x/ρ odgovara tlaku po površini i stupcu vode u točki x, onda se može pisati:

$$p_x/\rho = p_o/\rho + gh_x'. \tag{183}$$

Uvrštavajući (183) u (182) dobiva se

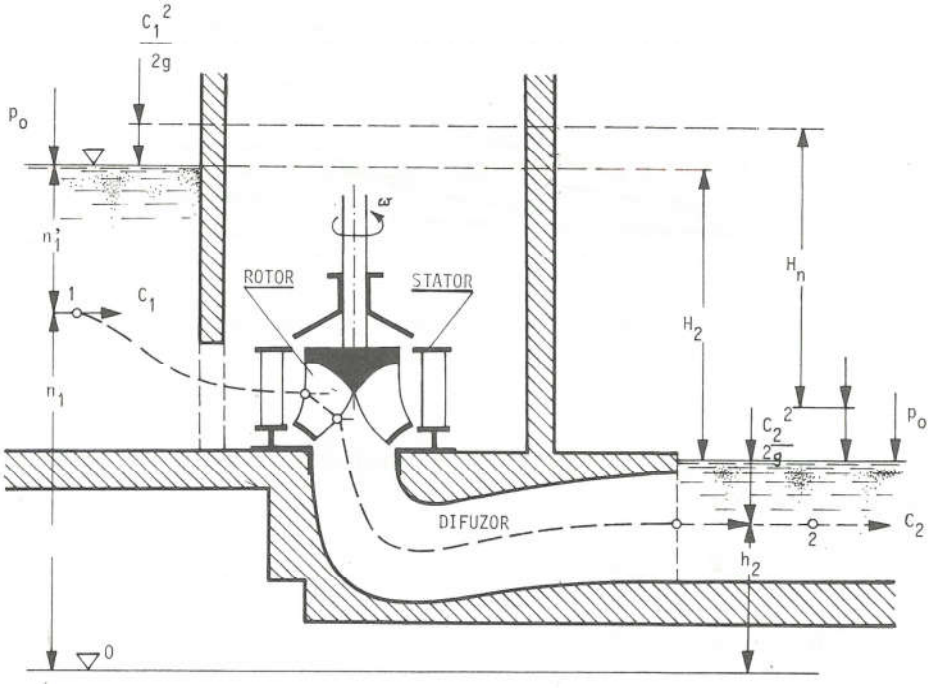
$$P_h = Q_g\left(\left(h_1 + h_1' + \frac{c_1^2}{2g}\right) = \left(h_2 + h_2' + \frac{c_2^2}{2g}\right)\right) \tag{184}$$

Razlika između razina vode (sl. 73) na strani dovoda (gornja voda) i na strani odvoda (donja voda) naziva se bruto pad hidroelektrana (H_b), a on iznosi:

$$H_b = (h_1 + h_1') - (h_2 + h_2') \tag{185}$$

pa je iskoristiva snaga vode u vodnoj turbini

$$p_h = Qg\left(H_b + \frac{c_1^2}{2g} - \frac{c_2^2}{2g}\right). \tag{186}$$



Sl. 73 Presjek kroz vodnu turbinu u hidroelektrani

Uvrste li se dimenzije za brzinu i silu težu dobivaju se dimenzije svih veličina u zagradi u m, pa se drugi i treći član u zagradi nazivaju visina brzine.

Uobičajeno je, međutim, iskoristivu snagu vodne turbine izraziti pomoću neto-pada, pa se može pisati

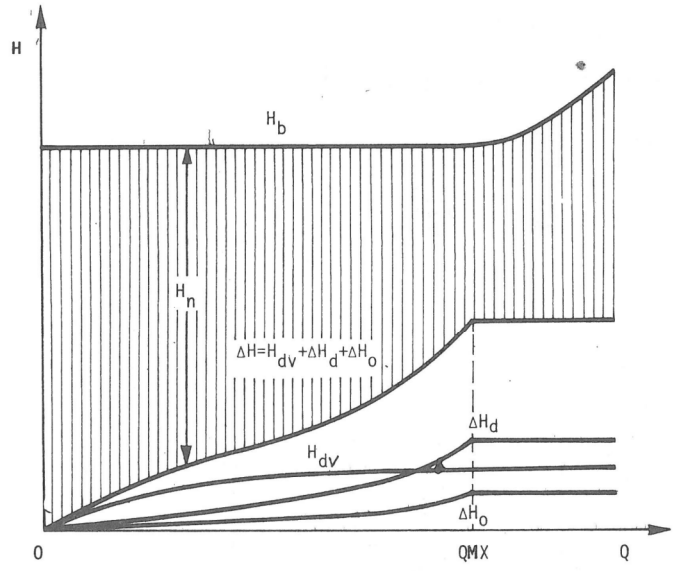
$$P_h = gQH_n. \tag{187}$$

Dva su puta u određivanju neto-pada. Prvi put je da se neto-pad određuje kroz razlike kota i gubitaka u dovodu i odvodu, a drugi put je da se određuju gubici u pojedinim dijelovima postrojenja.

U slučaju kad se neto-pad određuje kroz razlike kota, pretpostavi se konstantna razina gornje vode (H_b - bruto pad), zatim se određuje razina donje vode (H_{dv}), te uvažavajući gubitke pada u dovodu (ΔH_d) i gubitke pada u odvodu (ΔH_o) neto-pad se računa prema jednadžbi:

$$H_n = H_b - H_{dv} - \Delta H_d - \Delta H_o . \tag{188}$$

Grafički prikaz određivanja neto-pada načinjen je na sl. 74.



Sl. 74. Grafičko odredjivanje neto pada u hidroelektrani

Računanje neto-pada preko gubitaka u pojedinim dijelovima postrojenja može se prikazati jednadžbom

$$H_n = H_b + \frac{c_1^2}{2g} - \frac{c_2^2}{2g} \tag{189}$$

pri čemu je zanemaren utjecaj brzine na ulazu u cjevovod i gubici u cjevovodu. Ako se uvaži utjecaj brzine na ulazu u cjevovod (c_o) i gubici u cjevovodu (H_c) dobiva se izraz za neto-pad:

$$H_n = H_b + \frac{c_o^2}{2g} + \frac{c_1^2}{2g} - \frac{c_2^2}{2g} - H_c . \tag{190}$$

Pored navedenih gubitaka pada prolazom vode kroz turbinu postoje gubici u statoru, rotoru, difuzoru, na izlazu iz difuzora, gubitak vode između statora i rotora, te mehanički gubici turbine.

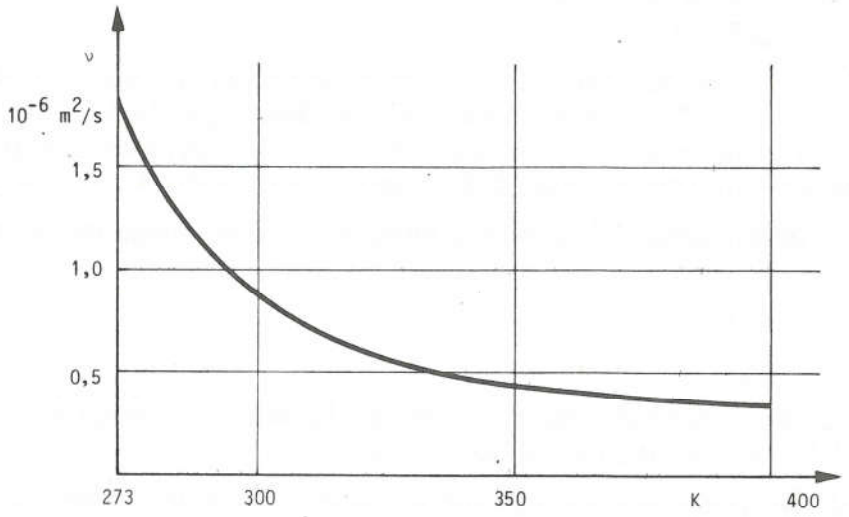
Prolaskom vode kroz stator javljaju se gubici statora koji su posljedica trenja turbulentnog strujanja vode. Turbulentno strujanje (za razliku od laminarnog strujanja) je takvo strujanje kod kojega su staze (putevi, kretanje) pojedinih čestica

tekućine nepravilne, a brzina strujanja ima osim glavne komponente još i bočne komponente. Daljnja je karakteristika turbulentnog strujanja promjena brzine u pojedinim točkama promjenjive i po smjeru i po vrijednosti. Radi toga se kod turbulentnog strujanja računa s vremenski srednjim vrijednostima brzina kao s vrijednošću brzine u nekoj točki.

Pokusima je utvrđeno da će laminarno strujanje prijeći u turbulentno kad bude premašena određena vrijednost Reynoldsove značajke definirane relacijom

$$Re = cD/\nu \qquad (191)$$

gdje je c srednja brzina strujanja (određena omjerom protoka Q i površine presjeka A), D je promjer cijevi, a ν kinematička viskoznost. Viskoznost je svojstvo tekućine, a ovisna je o tlaku, temperaturi i gustoći tekućine. Ovisnost o tlaku i temperaturi naziva se kinematička viskoznost. Za proračune se obično zanemaruje utjecaj tlaka, pa se kinematička viskoznost prikazuje u ovisnosti o temperaturi (sl. 75) . Laminarno strujanje prijeći će u turbulentno kad bude postignuto da je Re = 2320. Ta vrijednost Reynoldsove značajke naziva se kritična vrijednost i ona ima samo statističku vrijednost jer nije utvrđena teorijskim analizama. Iz objašnjenja Reynoldsove značajke proizlazi da će laminarno strujanje prijeći u turbulentno ne samo s porastom brzine nego i s povećanjem promjera cijevi. Ono će također postati turbulentno, ako se uz nepromijenjenu brzinu i promjer smanji kinematička viskoznost tekućine (npr. povisi li se temperatura vode, prema sl. 75).



Sl. 75. Ovisnost kinematičke viskoznosti ν vode o temperaturi

Određivanje gubitaka kod turbulentnog strujanja kroz stator nemoguće je egzaktno odrediti, ali se zna da su oni u osnovi proporcionalni kvadratu srednje brzine strujanja kroz stator, da ovise osim toga i o obliku kanala među lopaticama statora, o Reynoldsovoj značajci te o hrapavosti stijenki. Još složenija situacija određivanja gubitaka u statoru proizlazi iz same konstrukcije statora. Naime, lopatice statora se zaokreću zbog regulacije protoka vode kroz turbinu, a samim zakretanjem lopatica mjenjaju se uvjeti i elementi za određivanje gubitaka (brzina, otvor). Gubici kroz stator mogu se prikazati kao gubitak pada H_s.

Gubici u rotoru turbine nastaju zbog trenja o stjenke lopatica rotora, zbog promjene smjera strujanja vode kao posljedice zakrivljenosti lopatica i njihove rotacije, te uslijed odvajanja strujanja na ulaznom bridu lopatice. I ovi gubici se mogu prikazati kao gubitak pada H_R.

Da bi se odredio ukupni hidraulički stupanj djelovanja turbine (η_k), potrebno je pripomenuti, da pored gubitaka u statoru i rotoru, postoje gubici u difuzoru (ovisno o kvadratu brzine strujanja, ovisni o obliku i izvedbi difuzora te o Reynoldsovoj značajci) i gubici na izlazu iz difuzora (zbog nagle promjene brzine u odvodnom kanalu. Gubici u difuzoru i na izlazu iz difuzora mogu se također prikazati kao gubici pada H_o i H_i.

Spoznavši da pored gubitaka pada u hidroelektrani postoje i hidraulički gubici u turbini, može se umjesto izraza (187) za snagu pisati:

$$P = Qg\,(H_n - H_S - H_R - H_D - H_i). \tag{192}$$

Koristeći jednadžbe 192. i 187. može se za hidraulički stupanj djelovanja turbine pisati

$$\eta_h = 1 - (H_S + H_R + H_D + H_i)/H_n. \tag{193}$$

Pored hidrauličkih gubitaka u statoru i rotoru (zbog trenja i promjena brzine) u turbini postoje gubici vode. Naime, sva količina vode koja prođe kroz stator ne uspije proći kroz rotor, jer se jedan dio vode gubi kroz raspore između statora i rotora (ΔQ). Ako kroz stator protječe količina vode Q, a kroz rotor $Q-\Delta Q$, u tom slučaju se za volumetrijski stupanj djelovanja turbine može pisati

$$\eta_v = (Q - \Delta Q)/Q. \tag{194}$$

Da bi se dobio ukupni stupanj turbine potrebno je još odrediti mehanički stupanj djelovanja η_m. Mehanički gubici nastaju zbog toga što je potrebno savladati otpore trenja u ležajevima i brtvenicima turbine, zatim otpor koji nastaje ventilacijom zbog okretanja rotora i otpora vode koji se gubi između statora i rotora.

Nakon određivanja svih gubitaka može se odrediti snaga na osovini turbine, a ona iznosi

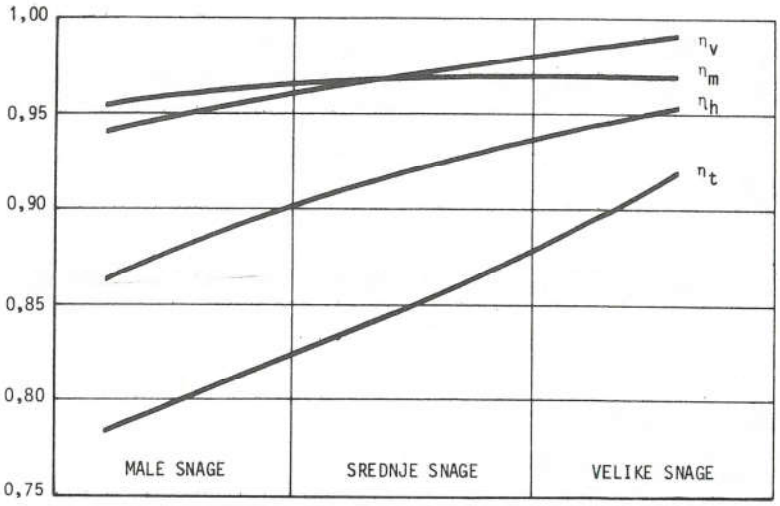
$$P_o = Qg\,H_n\,\eta_h\,\eta_v\,\eta_m \tag{196}$$

$$\eta_t = \eta_h\,\eta_v\,\eta_m. \tag{197}$$

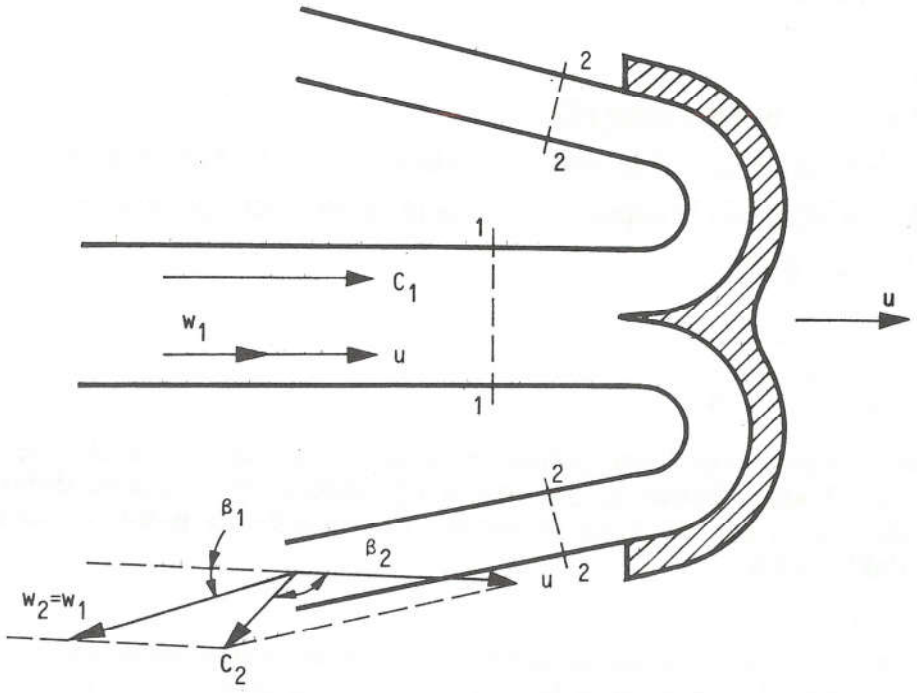
Navedeni stupnjevi djelovanja ovisni su o brzinama strujanja, o vrsti strujanja, o hrapavosti, o izvedbi turbine i o veličini turbine itd.

Na sl. 76. prikazana je ovisnost srednjih vrijednosti stupnjeva djelovanja u najpovoljnijim područjima rada o veličini snage reakcione turbine.

Potpuno istim postupkom određuje se snaga akcione turbine (s napomenom da se moraju uvažiti sve fizikalno-tehničke karakteristike akcione turbine) kao što se određuje snaga reakcione turbine. Za razliku od reakcionih turbina stator je kod akcionih turbina sapnica (mlaznica) u kojoj se voda, dovedena cjevovodom, pretvara u kinetičku energiju. Na sl. 77. prikazane su brzine na ulazu i izlazu iz lopatičnog kola akcione (Peltonove) turbine, iz kojih se može zaključiti princip rada turbine. Mlaz vode, koji izlazi iz sapnice brzinom C_1 udara u lopaticu koja je smještena na obodu rotora i koja se zbog djelovanja mlaza okreće brzinom u_2 jednakom obodnoj brzini središta lopatice. Prema sl. 77. lopatice su oštrim bridom podjeljene u dva jednaka ovalna udubljena. Zbog djelovanja mlaza pojedine lopatice samo povremeno dolaze u dodir s mlazom, a za vrijeme dodira nagib im se s obzirom na mlaz stalno mijenja.



Sl. 76. Stupnjevi djelovanja reakcionih turbina u ovisnosti o snazi turbina



Sl. 77. Brzine na ulazu i izlazu iz lopatičnog kola Peltonove turbine

Ako se zanemare gubici trenja ($h_1 = h_2$), u tom slučaju se iz slike 77. može zaključiti da u presjeku 1 i 2 vlada tlak okoline ($p_1 = p_2 = p_o$), te da su obodne brzine na ulazu i na izlazu međusobno jednake ($u_1 = u_2 = u$), pa se na temelju Bernoulijeve jednadžbe za presjek 1 i 2 može napisati

$$\frac{p_1}{\rho} - \frac{u_1^2}{2} + \frac{\omega_1^2}{2} + gh_1 = \frac{p_2}{\rho} - \frac{u_2^2}{2} + \frac{\omega_2^2}{2} + gh_2 \qquad (198)$$

iz čega slijedi da je

$$\omega_1 = \omega_2. \qquad (199)$$

Pođe li se, prema sl. 77, od trokuta brzina na ulazu i izlazu iz rotora može se zaključiti da je

$$c_1 = u_1 + \omega_1 \qquad (200)$$

a koristeći kosinusov poučak

$$c_2^2 = u_2^2 + \omega_2^2 - 2n_2\omega_2\cos\beta_i. \qquad (201)$$

Ako je $u_1 = u_2$, $\omega_1 = \omega_2$ i $h_1 = h_2$ onda se snaga turbine koristeći jednadžbe za snagu u točki 1 i 2 dobiva sa

$$P = \frac{c_1^2 - c_2^2}{2} + \frac{u_1^2 - u_2^2}{2} - \frac{\omega_1^2 - \omega_2^2}{2} \qquad (202)$$

odnosno

$$P = u\,(c_1 - u)\,(1 + \cos\beta_i)\,Q. \qquad (203)$$

Vrijednost snage dakle, ovisi o obodnoj brzini u i o kutu istjecanja β_i.

Brzina istjecanja iz sapnice c_1 ovisna je samo o neto-padu jer je

$$Q \cdot c_1^2/2 = gQH_n \qquad (204)$$

pa je

$$c_1 = \sqrt{2gH_n}\,. \qquad (205)$$

Maksimalna vrijednost jedinične snage može se dobiti ako se izraz (203) derivira po obodnoj brzini u, pa nakon izjednačavanja s nulom dobiva se da se maksimalna snaga postiže kada je obodna brzina jednaka polovici izlazne brzine iz sapnice, dakle kad je

$$u = c_1/2. \qquad (206)$$

Brzina istjecanja vode iz sapnice određena jednadžbom (205) je teoretska brzina istjecanja, dok je stvarna brzina nešto manja zbog trenja u sapnici. Gubici u statoru izračunavaju se uz pomoć koeficijenta brzine γ koji je definiran omjerom između stvarne brzine na izlazu iz sapnice i brzine bez trenja

$$\varphi = c_{11}/c_1. \qquad (207)$$

Zbog trenja u sapnici na izlazu se postiže manja brzina ($c_{11} < c_1$), pa se gubici u sapnici određuju kao gubitak kinetičke energije pomoću jednadžbe

$$H_s = \frac{c_1^2}{2g} - \frac{c_{11}^2}{2g} = \frac{c_1^2}{2g}\,(1-\varphi^2). \qquad (208)$$

Koeficijent brzine za vodu iznosi $\varphi \cong 0.97$.

Gubici u rotoru akcione turbine nastaju zbog istih razloga kao i gubici u rotoru reakcione turbine i predstavljaju se kao gubici pada H_R.

Kod turbina slobodnog mlaza (akcionih ili Pelton turbina) nema gubitaka u difuzoru jer voda odlazi slobodno nakon što je predala dio energije rotoru turbine. Samom izvedbom akcione turbine eliminirani su i volumetrijski gubici zbog gubljenja vode između rotora i statora.

Znatan udio gubitaka ostvaruje se u akcionoj turbini kao izlazni gubici zbog postojanja izlazne brzine c_2 prema sl. 77. i iz jednadžbe (208), pa su oni izraženi kao gubitak pada

$$H_i = c_2^2/2g . \tag{209}$$

Prema tome, ukupni hidraulički gubici kod akcionih turbina sastoje se: od gubitaka u sapunici (H_s), gubitaka u rotoru turbine (H_r) i izlaznih gubitaka (H_i). Hidraulički stupanj djelovanja za akcionu turbinu određuje se prema izrazu:

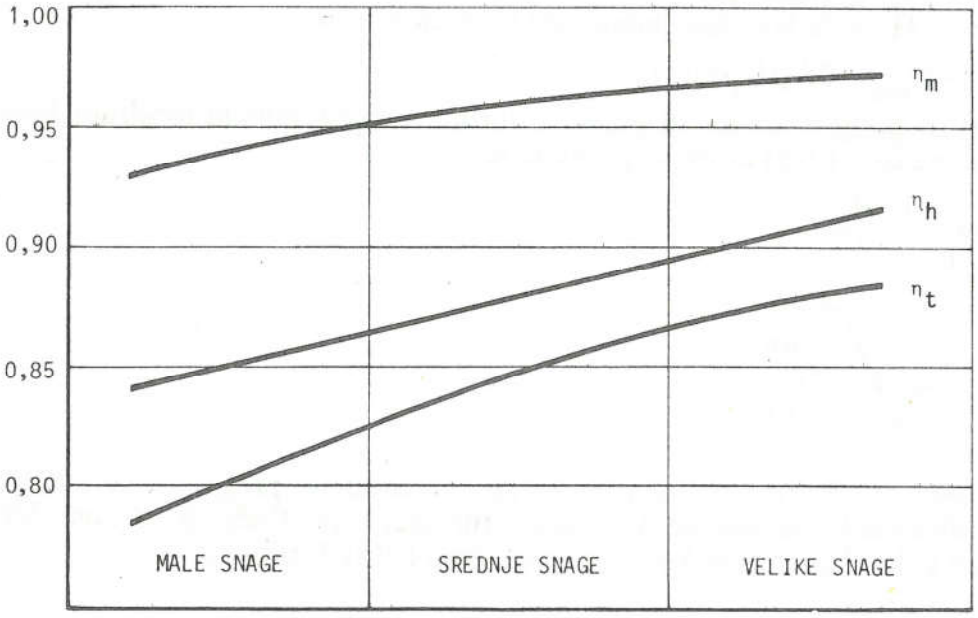
$$\eta_h = 1 - (H_s + H_r + H_i)/H_n . \tag{210}$$

Zbog istih razloga kao i kod reakcione turbine i kod akcione turbine postoje mehanički gubici koji se određuju mehaničkim stupnjem djelovanja η_m.

Snaga na osovini Peltonove turbine računa se prema izrazima 195 i 196 s napomenom da je stupanj djelovanja turbine

$$\eta_t = \eta_h \eta_m . \tag{211}$$

Srednje vrijednosti stupnjeva djelovanja u najpovoljnijem području rada Peltonovih turbina prikazane su na sl. 78.



Sl. 78. Ovisnost stupnjeva djelovanja akcione turbine o snazi turbine

2.5.3. IZBOR BROJA OKRETAJA I TIPA TURBINE

Zbog nemogućnosti točnog proračuna strujanja i gubitaka koji su posljedica strujanja, prijeko je potrebno u većini slučajeva upotrijebiti modele, kako bi se odredile najpovoljnije dimenzije i oblik uređaja za pretvorbu potencijalne u mehaničku energiju.

Modelsko ispitivanje provodi se na modelu smanjenih dimenzija, a za vodne turbine ono se obavlja s padom vode koji se redovno razlikuje od onoga s kojim će raditi izvedena turbina.

U modelu vodne turbine moraju se ostvariti takve prilike strujanja da se postigne potpuna sličnost sa strujanjem u izvedenoj turbini i tako omogućiti njezinu što sigurniju konstrukciju.

Između modela i stvarne turbine mora postojati geometrijska, kinematička i mehanička sličnost.

Geometrijska sličnost pretpostavlja postojanje istog omjera među svim linearnim dimenzijama (λ). Najreprezentativniji omjer modelske (indeks M) i stvarne (indeks T) turbine je omjer njihovih promjera

$$\lambda = D_M/D_T. \tag{212}$$

Kinematička sličnost (K) može se utvrditi iz izraza za obodne brzine

$$u = (2\pi n/60)\cdot D/2 \tag{213}$$

(gdje su: u obodna brzina, n broj okretaja i D promjer) tako da se postave omjeri obodnih brzina za model i za stvarnu turbinu, pa je:

$$k = u_M/u_T = \omega_M/\omega_T = C_M/C_T = n_M/n_Z\lambda\ . \tag{214}$$

Međutim, kinematička sličnost može se odrediti iz jednadžbi za određivanje snage (180 i 186) koristeći pri tome neto padove i gubitke za model (H_{nM} i H_{GM}) i za turbinu (H_{nT} i H_{GT}), te koristeći jednadžbu (214) dobiva se:

$$H_{nM} - H_{GM} = k^2 (H_{nT}-H_{GT}). \tag{215}$$

Ako se pretpostavi da su gubici u turbini proporcionalni kvadratu brzine, te koristeći jednadžbu (215) može se pisati da je

$$H_{GM} = k^2 H_{GT} \tag{216}$$

pa sledi da je

$$k = \sqrt{\frac{H_{nM}}{H_{nT}}}\ . \tag{217}$$

Veoma se lako može dokazati da su uz navedene pretpostavke i hidraulički stupnjevi djelovanja modelske i stvarne turbine, isti. Pođe li se od definicije hidrauličkih gubitaka (210) te koristeći jednadžbu (216) dobiva se

$$\eta_{nM} = \eta_{nT}\ . \tag{218}$$

Određeni omjer broja okretaja modelske i stvarne turbine ne može se, uvrštavanjem vrijednosti za kinematičku sličnost (k), izraziti slijedećom jednadžbom:

$$\frac{n_M}{n_T} = \frac{D_T}{D_M}\sqrt{\frac{H_{nM}}{H_{nT}}}\,. \tag{219}$$

U literaturi, a i u praksi, veoma često se upotrebljava specifični broj okretaja modelne turbine. To je broj okretaja modelne turbine koja ima toliki promjer da uz pad $H_{nM} = 1$ propušta protok $Q_M = 1\ m^3/s$, pa je:

$$n_{ns} = n_T \frac{D_T}{D_M}\sqrt{\frac{1}{H_{nT}}}\,. \tag{220}$$

S obzirom na to, da su protoci kroz turbinu proporcionalni presjecima otvora za dovod vode i brzinama, a da se presjeci odnose kao kvadrati promjera, može se postaviti:

$$Q_M/Q_T = (D_M/D_T)^2 c_M/c_T\,. \tag{221}$$

Prvi član u izrazu (221) odgovara kvadratu geometrijske sličnosti (λ^2), a drugi član je kinematička sličnost (k), dakle:

$$Q_M/Q_T = \lambda^2 k\,. \tag{222}$$

Uvrštavajući vrijednosti za k prema (217) dobiva se

$$\frac{Q_M}{Q_T} = \left(\frac{D_M}{D_T}\right)^2\sqrt{\frac{H_{nM}}{H_{nT}}}\,. \tag{223}$$

Ako se radi o specifičnom broju okretaja, u tom slučaju je $Q_M = 1$ i $H_{nM} = 1$, pa se dobiva

$$1 = Q_T\left(\frac{D_M}{D_T}\right)\sqrt{\frac{1}{H_{nT}}} \tag{224}$$

iz čega slijedi da je

$$\frac{D_T}{D_M} = \sqrt{QT}\sqrt{\frac{1}{H_{nT}}} = \sqrt{Q_T}\sqrt[4]{\frac{1}{H_{nT}}}\,. \tag{225}$$

Uvrštavanjem dobivene vrijednosti za D_T/D_M u jednadžbu za specifični broj okretaja (220) dobiva se

$$n_{Ms} = n\sqrt{Q_T}\sqrt[4]{\frac{1}{H_{nT}}}\sqrt{\frac{1}{H_{nT}}} \tag{226}$$

odnosno

$$n_{Ms} = n\frac{\sqrt{Q_T}}{\sqrt[4]{H_{nT}^3}}\,. \tag{227}$$

Navedena jednadžba za određivanje specifičnog broja okretaja modelske turbine računski je korektno provedena, što se ne može kazati za dimenziju broja okretaja. Naime, jedinice upotrebljene kod izvoda broja okretaja za neto-pad ($H_{nM}=1$) i protok turbine ($Q_M=1$) imaju dimenzije m i m^3/s pa je radi toga u dobiveni izraz za protok turbine (Q_T) i za neto-pad turbine (H_{nT}) potrebno stavljati samo bezdimenzionalne vrijednosti.

Izvedeni izraz za specifični broj okretaja vrijedi za vodne turbine u kojima se sva voda iskorištava u jednom rotoru kod reakcionih (pretlačnih) turbina, odnosno u kojima se sva voda dovodi jednom mlaznicom kod akcionih (Pelton) turbina. Takve turbine nazivaju se jednostrujnim turbinama. Međutim, kad se radi o višestrujnim ili višestepenim turbinama ukupna količina vode dijeli se na više rotora ili na više mlaznica u jednakim dijelovima (x).

Specifični broj okretaja višestrujne turbine (n_{sx}) odredit će se na isti način kao za jednostrujnu turbinu s tom razlikom što se umjesto ukupne količine protoka Q uvrštava vrijednost Q/X, pa se dobiva

$$n_{sx} = n \frac{\sqrt{\frac{Q_T}{X}}}{\sqrt[4]{H_{nT}^3}} = \frac{n_{Ms}}{\sqrt{X}}. \qquad (228)$$

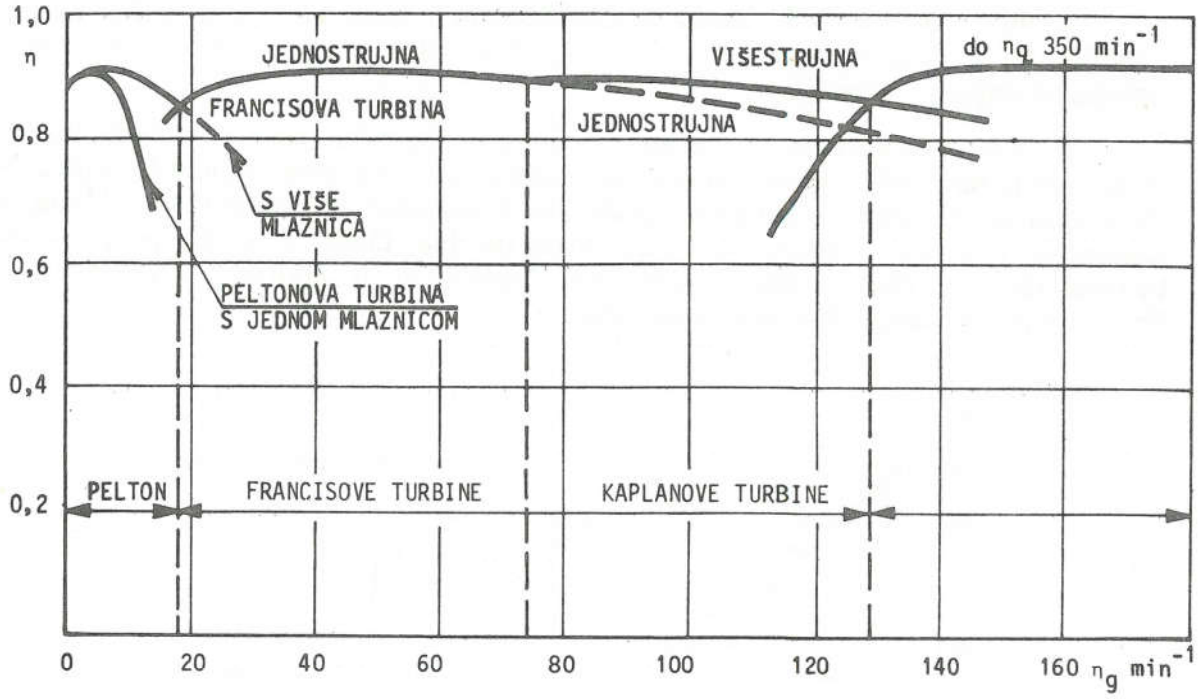
Ako se radi o situaciji kada se više turbina nalazi na istoj osovini u tom slučaju vrijednosti za X su onolike koliko ima rotora kod reakcionih turbina, odnosno koliko je ukupno sapnica kod akcionih turbina.

Koristeći jednadžbu (219) može se odrediti broj okretaja turbine prema jednadžbi:

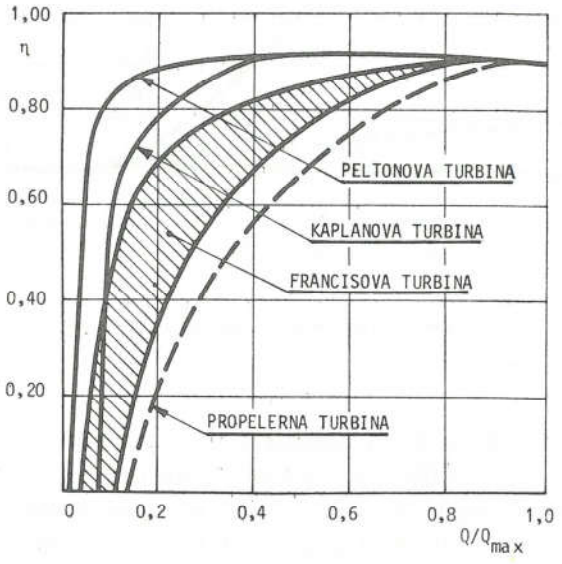
$$n_T = n_M \frac{D_M}{D_T} \sqrt{\frac{H_{nT}}{H_{nM}}} \qquad (229)$$

S obzirom na spoznaju da je stupanj djelovanja turbine ovisan o gubicima pada, a gubici pada ovisni o ulaznim i izlaznim brzinama odnosno kutevima s povećanjem broja okretaja (uz nepromijenjene dimenzije turbine) doći će do znatnog povećanja gubitaka, odnosno do znatnog smanjenja stupnja djelovanja. Naime, povećanim brojem okretaja mijenjaju se ulazni i izlazni kutevi, pa ako se želi turbinu prilagoditi tim kutevima, lopatice turbine moraju biti duže, a to izaziva povećane gubitke trenja (zbog povećanja kutne brzine ω, a gubici su proporcionalni kvadratu brzine). Radi toga je kod konstrukcije turbine neophodno potrebno poduzeti takve mjere kojima će se gubici u turbini svesti na najmanju moguću mjeru, jasno uvažavajući pri tome tehno-ekonomske zahtjeve i uvjete za turbine.

Ovisnost optimalnog stupnja djelovanja vodnih turbina o tipu turbine i specifičnom broju okretaja prikazana je na sl. 79. Da bi se dobila prava slika o području upotrebe pojedinog tipa turbine, potrebno je prikazati ovisnost stupnja djelovanja o odnosu protoka i maksimalnog protoka kroz turbinu (sl. 80). Maksimalni protok određuje se kao protok koji protiče kroz turbinu kod konstantnog pada i konstantnog broja okretaja, a kod maksimalnog otvora statora.



Sl. 79. Optimalni stupanj djelovanja vodnih turbina ovisno o tipu turbine i o specifičnom broju okretaja

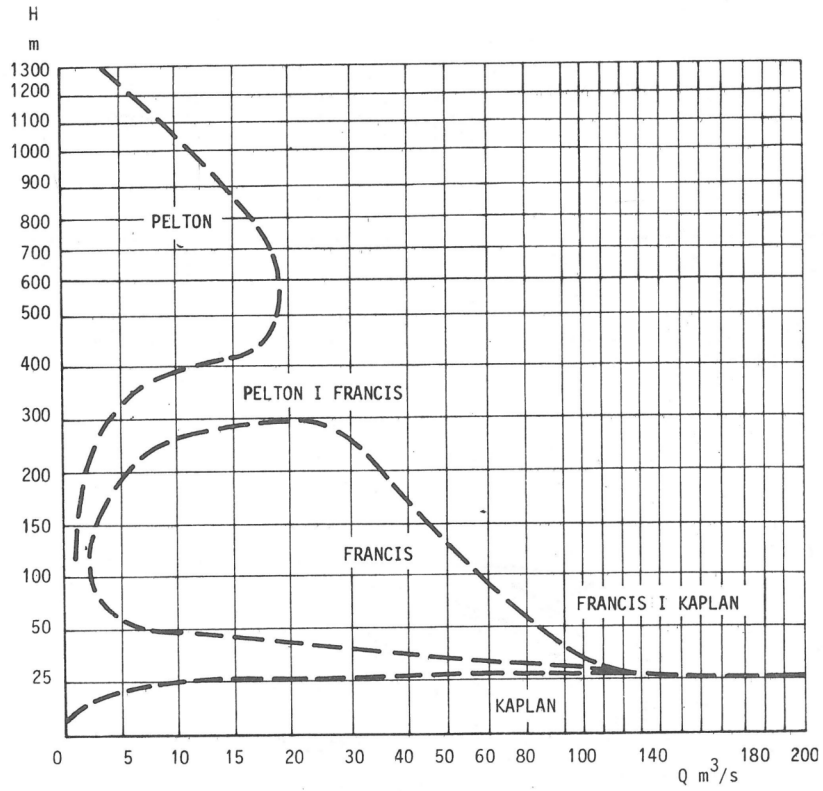


Sl. 80. Ovisnost stupnja djelovanja turbine o protoku (Q/Q_{max})

Iz dijagrama na sl. 79. uočljiva je ovisnost stupnja djelovanja Francisove turbine o specifičnom broju okretaja, pa se radi toga na sl. 80. navodi raspon ovisnosti stupnja djelovanja turbine u odnosu protoka kroz turbinu i maksimalnog protoka kroz turbinu.

Iz dijagrama na sl. 79. može se zaključiti da je svaki od tipova vodnih turbina pogodan za stanovito područje specifičnog broja okretaja jer o tom broju ovisi i optimalni stupanj djelovanja.

Prema raspoloživim podacima područje upotrebe tipova vodnih turbina prikazano je na sl. 81. i to ovisno o maksimalnom protoku kroz turbinu i o padu. Na dijagramu je označeno zajedničko područje Kaplanovih i Francisovih turbina, te zajedničko područje Francisovih i Peltonovih turbina. Dalji razvoj izgradnje vodnih turbina ide sve više u smjeru prodora Kaplanovih u područje Francisovih, a Francisovih u područje Peltonovih turbina.



Sl. 81. Područja upotrebe tipova vodnih turbina

Upotreba propelernih turbina poklapa se s područjem upotrebe Kaplanovih turbina. Propelerne turbine, međutim, rijetko se upotrebljavaju jer je njihov stupanj djelovanja jako opao s opadanjem protoka, a što se može vidjeti iz dijagrama na sl. 80. Na istom dijagramu može se uočiti i potrebna količina vode za prazni hod turbine ($\eta=0$). Ta količina vode raste s porastom specifičnog broja okretaja. Najmanji potrošak vode za prazni hod turbine ima Pelton, zatim Francis, pa Kaplan i propelerna turbina. Međutim, Francis turbina s velikim specifičnim brojem okretaja može imati manji potrošak vode za prazni hod od Kaplanove turbine.

2.5.4. OGRANIČENJA U RADU TURBINA

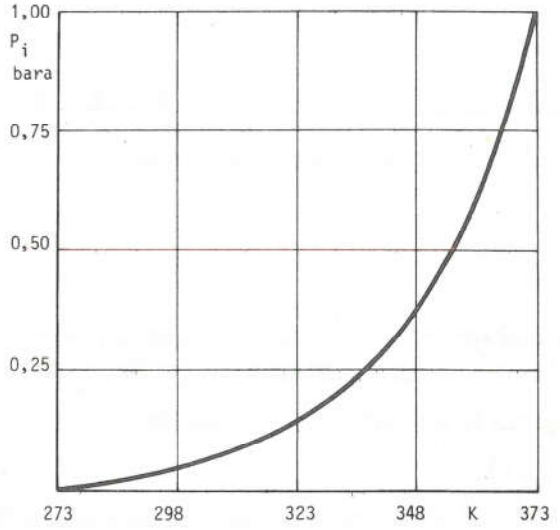
Da bi turbina mogla obaviti temeljnu funkciju za koju se gradi, a to je da mehaničku energiju preda generatoru u kome se proizvodi električna energija, mora

svojim brojem okretaja biti prilagođena uvjetima generatora. Konstrukcija turbine i generatora traži čim veći broj okretaja, jer se na taj način smanjuju dimenzije i turbine i generatora za istu nazivnu snagu. Iz navedenoga proizlazi da treba odabrati turbinu sa što većim specifičnim brojem okretaja.

Maksimalni dopušteni specifični broj okretaja s obzirom na raspoloživi neto-pad ne smije se prekoračiti zbog izraženije pojave kavitacije.

Kavitacija je isparavanje tekućine na pojedinim točkama strujanja kod velikog broja okretaja turbine. Isparavanje nastaje uslijed pada tlaka i njime izazvanog sniženja temperature isparavanja vode, ovisnost tlaka isparavanja (p_i) o temperaturi vode prikazana je na sl. 82.

Prema navedenom kavitacija se pojavljuje kod reakcionih (pretlačnih) turbina kod kojih su ulazne i izlazne brzine, te ulazni i izlazni tlakovi različiti.

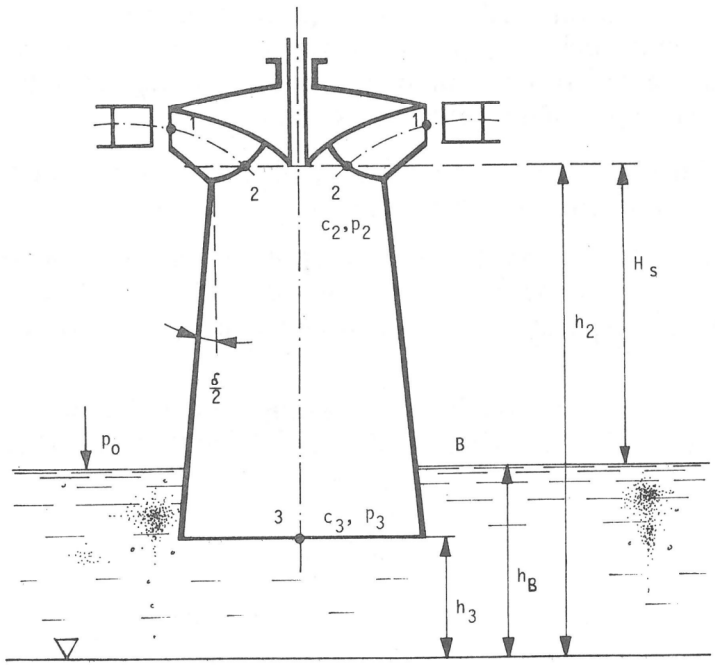


Sl. 82. Ovisnost tlaka isparavanja p_s o temperaturi

U slučaju kad je izlazni tlak iz turbine manji od tlaka isparavanja ($p_2 < p_i$) dolazi do isparavanja vode i do stvaranja mjehurića pare. Stvoreni mjehurići nošeni strujom vode dolaze u područje višeg tlaka gdje nastaje nagla kondenzacija i para se ponovo pretvara u vodu. Pojava kavitacije smanjuje stupanj djelovanja turbine, a pored toga djeluje štetno na dijelove postrojenja na kojima može prouzročiti i znatna oštećenja.

Da bi se izbjegla kavitacija, a time i smanjili gubici pada, na izlazu iz turbine ugrađuje se difuzor. Zadatak je difuzora da smanji izlaznu brzinu vode. Smanjenje brzine postiže se postepenim proširenjem difuzora, pri čemu je potrebno osigurati da u difuzoru uvijek bude tlak veći od tlaka isparavanja vode (p).

Zadatak je difuzora (sl. 83) da omogući iskorištenje potencijalne energije vode između izlaza iz rotora i razine donje vode. Iz saznanja da se s povećanjem specifičnog broja okretaja smanjuje promjer rotora, što ima za posljedicu porast brzine na izlazu iz rotora, a s time i povećanje gubitaka na izlazu iz rotora. Da bi se smanjila izlazna



Sl. 83. Prikaz izvedbe difuzora

brzina iz turbine upotrebljava se difuzor, u obliku cijevi koja se proširuje (sl. 83), pa na izlazu iz njega voda ima brzinu c_3 manju od brzine c_2 na izlazu iz turbine.

Gubici energije na kraju difuzora iznosili bi:

$$\Delta P = c_3^2/2 + g\Delta H_d \tag{230}$$

gdje je $c_3^2/2$ gubitak uslijed postojanja brzine (kinetička energija za jedinicu mase) na kraju difuzora a $g\,\Delta H_d$ gubici u difuzoru.

Prema tome, ako bi se znatno smanjila brzina na izlazu iz difuzora, mogli bi se u velikom iznosu eliminirati gubici kinetičke energije ($c_3^2/2$), ali bi za to bilo potrebno veliko proširenje i dužina difuzora. Samo prekomjerno proširenje difuzora dovodi do pojave kavitacije, a produženje difuzora dovodi do povećanja gubitaka u difuzoru ($g\Delta H_d$).

Postavljanjem Bernoullijeve jednadžbe (sl. 83) za stanje na izlazu iz turbine (razina 2) i na presjeku koji odgovara površini vode (razina B) dobiva se

$$\frac{p_2}{\rho} + \frac{c_2^2}{2} + gh_2 = \frac{p_o}{\rho} + \frac{c_B^2}{2} + gh_B + g\Delta H_d \,. \tag{231}$$

Ako se lijevoj strani doda i oduzme energija tlaka koji odgovara tlaku isparavanja (p_i/ρ), te ako se prema sl. 71 postavi da je $h_2 - h_B = H_s$, dobiva se da je:

$$H_s = \frac{p_o}{g\rho} - \frac{p_i}{g\rho} - \frac{c_2^2 - c_B^2}{2g} - \frac{p_2 - p_i}{g\rho} + \Delta H_d \tag{232}$$

Prvi i drugi član u navedenoj jednadžbi predstavljaju karakteristike lokacije hidroelektrane, a ne karakteristike turbine, dok ostala tri člana ovise o karakteristikama turbine i difuzora, koji također ovisi o vrsti turbine.

Ako tri posljednja člana u jednadžbi (232) zamjenimo s konstantom o (koeficijentom kavitacije) i netto padom elektrane, dobiva se da je koeficijent kavitacije:

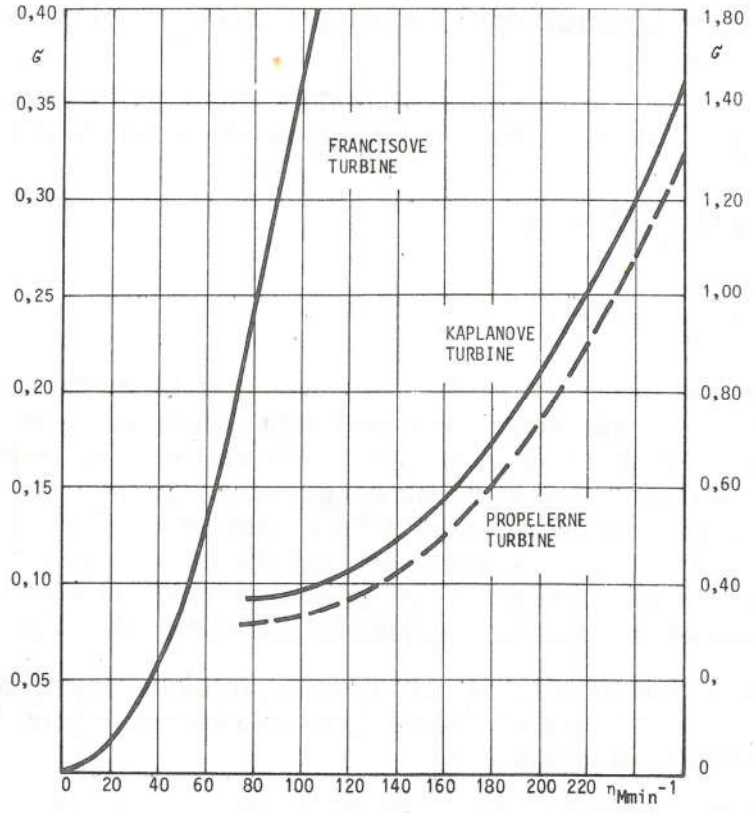
$$\sigma = \frac{\frac{c_2^2 - c_B^2}{2g} + \frac{p_2 - p_s}{g\rho} - \Delta H_d}{H_n} \qquad (233)$$

odnosno, da je maksimalno dopuštena visina izlaznog presjeka turbine iznad razine donje vode jednaka:

$$H_s = p_o/g\rho - p_s/g\rho - \sigma H_n . \qquad (234)$$

Koeficijent kavitacije ovisan je u prvom redu o tipu turbine, te o izlaznoj brzini i izlaznom tlaku vode, a prema tome i o specifičnom broju okretaja. Na sl. 84. prikazana je ovisnost koeficijenta kavitacije (σ) o specifičnom broju okretaja za različite tipove turbine.

Sinhroni generator, pokretan vodnom turbinom, zahtjeva od vodne turbine toliki broj okretaja da bude upravo jednak jednom od sinhronih brojeva okretaja, koji



Sl. 84. Ovisnost koeficijenta kavitacije o specifičnom broju okretaja i tipu turbine

je određen jednadžbom

$$n_s = 60\, f/p \qquad (235)$$

gdje je f frekvencija fizikalnih veličina struje i napona u elektroenergetskom sistemu (broj amplituda u jednoj sekundi), a p je broj pari polova sinhronog generatora.

Ako se broj okretaja turbine, određen prema (229) razlikuje od sinhronog broja n_s prema (235), što se obično događa, odabire se idući niži sinhroni broj okretaja, kako bi se ostalo u granicama maksimalnog specifičnog broja okretaja. Broj okretaja turbine može se smanjiti i smanjivanjem maksimalnog protoka kroz turbinu, odnosno smanjivanjem snage turbine.

Pored ograničenja kod izbora broja okretaja u radu turbine postoje ograničenja vezana za protok kroz turbinu, ograničenja vezana za snagu generatora i granica ovisnosti neto-pada o protoku za konstantni bruto-pad. Navedena ograničenja proizlaze i iz činjenice da izgrađena turbina radi s konstantnim brojem okretaja, pa je snaga turbine ovisna o protoku i neto-padu, koji se tijekom rada turbine mijenjaju. Ograničenje s obzirom na snagu generatora proizlazi iz činjenice da se turbina radi zbog generatora.

Spomenuta ograničenja najbolje se mogu prikazati u topografskom dijagramu turbine (školjkastom dijagramu). Topografski dijagram turbine (sl. 84) snima se tako, da se pretpostave različite vrijednosti za konstantan stupanj turbine (η_T=konst.), te da se mjere ovisnosti protoka (Q) od neto-pada (H_n).

Maksimalni protok kroz turbinu (Q_{max}) određen je mogućnošću gutanja turbine uz maksimalne otvore turbine. On je prikazan na sl. 85. pravcem $Q_{max} = f(H_n)$. Iz dijagrama na sl. 85. očito je da maksimalni protok kroz turbinu raste s povećanjem neto-pada jer raste brzina protjecanja vode. Ograničenje protoka kroz turbinu određeno je njenom konstrukcijom, a nagib pravca $Q_{max} = f(H_n)$ ovisi o specifičnom broju okretaja turbine.

Ograničenje vezano za snagu generatora mora postojati da bi se spriječilo preopterećenje generatora. Protok za maksimalnu snagu generatora može se odrediti iz jednadžbe:

$$P_{Gmax} = g\, Q_{Gmax}\, H_n\, \eta_T\, \eta_G \qquad (236)$$

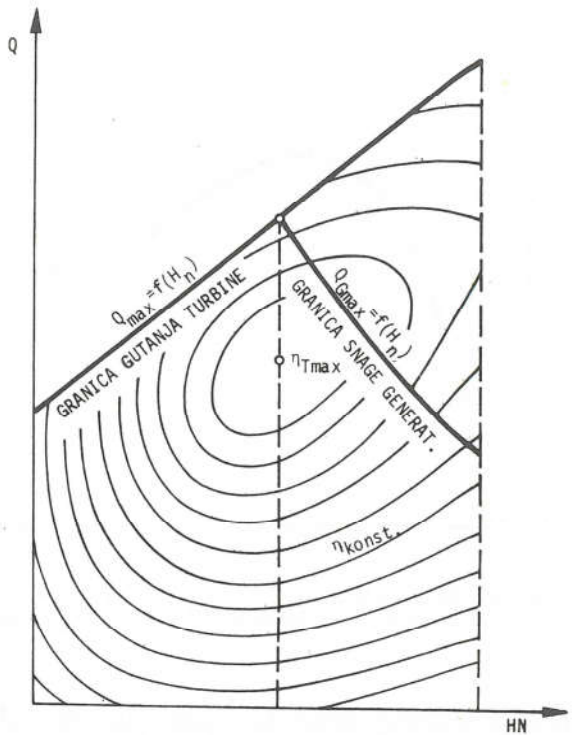
dakle

$$Q_{Gmax} = P_{Gmax}/gH_n\eta_T\eta_G. \qquad (237)$$

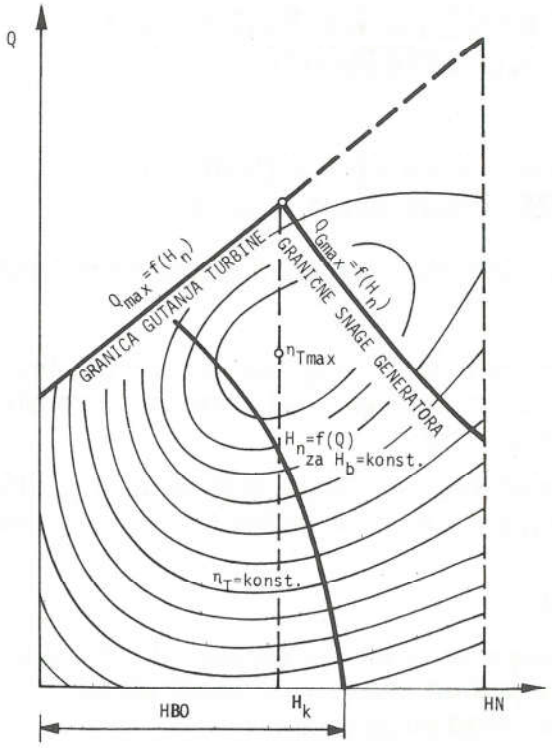
U navedenim jednadžbama P_{Gmax} je poznata maksimalna snaga generatora, a η_G je stupanj djelovanja generatora koji ima konstatnu i poznatu vrijednost. Pretpostavljajući različite vrijednosti neto-pada za različite stupnjeve djelovanja turbine može se u dijagram na sl. 85. ucrtati granična vrijednost protoka kroz turbinu s obzirom na snagu generatora, pa se dobiva dijagram na sl. 86. Presjecište pravca $Q_{max} = F(H_n)$ i krivulje $Q_{Gmax} = f(H_n)$ daje maksimalni protok kroz turbinu. Na istoj slici nacrtana je i granica ovisnosti neto-pada o protoku uz konstantan bruto pad. Granica navedene ovisnosti ucrtana na temelju jednadžbe 188. i dijagrama na sl. 74.

Koristeći navedenu ovisnost neto-pada o protoku u topografskom dijagramu (sl. 86) može se načiniti ovisnost stupnja djelovanja turbine o protoku $\eta_T = f(Q)$ za pretpostavljeni bruto pad prema sl. 87.

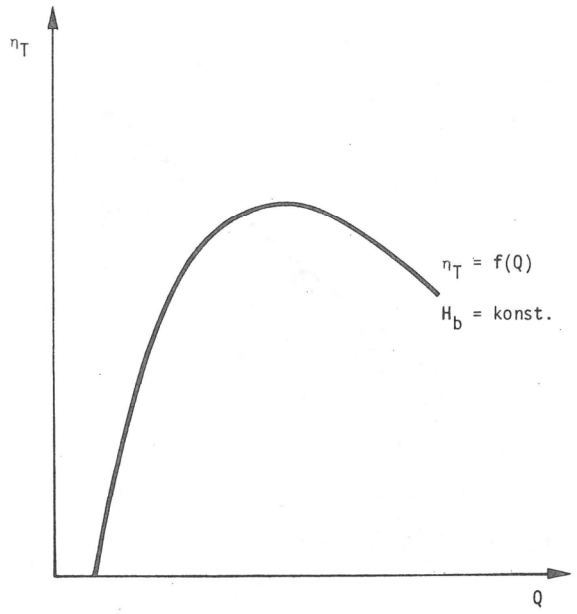
Iz svega navedenoga može se zaključiti da se svaka turbina gradi za neki određeni pad, koji se naziva konstrukcioni pad (H_K). Konstrukcioni pad odabire se



Sl. 85. Ovisnost granične vrijednosti protoka kroz turbinu o snazi generatora



Sl. 86. Primjer topografskog dijagrama vodne turbine s ucrtanom krivuljom $H_n=f(Q)$ i H_b=konst.



Sl. 87. Ovisnost stupnja djelovanja turbine (η_T) o protoku (Q) za konstantni bruto-pad (H_b = konst.)

tako da se postigne što bolji stupanj djelovanja iskorištenja vode. Prema topografskom dijagramu (sl. 86) maksimalnoj snazi turbine odgovara konstrukcioni pad, od kojega se zahtijeva da omogući postizanje maksimalnog stupnja djelovanja turbine. Kod iskorištenja turbine poželjno je da turbina što dulje koristi vodu na padu čim bližem konstrukcionom.

2.6. PRETVORBE KINETIČKE ENERGIJE U MEHANIČKU ENERGIJU

2.6.1. TEORETSKE POSTAVKE I PODLOGE ZA KORIŠTENJE ENERGIJE VJETRA

Energija vjetra je kinetička energija, a budući da je kinetička energija:

$$W = 1/2\, mv^2 \qquad (238)$$

(gdje je m masa, a v brzina) to će ona biti proporcionalna kvadratu brzine vjetra. Zbog toga je poznavanje brzine vjetra od temeljne važnosti za ocjenu mogućnosti energetskog iskorištavanja vjetra.

Ako se sa V označi volumen zraka koji struji u jedinici vremena (m^3/s), s ρ njegova gustoća (kg/m^3), a s v njegova brzina (m/s), snaga strujanja zraka dobiva se iz izraza:

$$P = 1/2\, \rho\, Vv^2\ (W). \qquad (239)$$

U tom slučaju snaga se dobiva u vatima (W). Gustoća zraka iznosi približno 1.25 kg/m^3, a volumen u jedinici vremena se može pisati kao umnožak površine (A) i brzine (v), pa se izraz za snagu može pisati

$$P = 0.625\, Av^3 \times 10^{-3}\ kW \qquad (240)$$

gdje je A površina u m^2.

Navedena snaga je maksimalna teoretska snaga. Naime, ukupna kinetička energija zraka ne može se sva iskoristiti, jer zrak mora dalje strujati da bi načinio mjesta onome koji dolazi. Moguće je, dakle, iskorištavati energiju koja odgovara razlici brzina. Za pretvorbu kinetičke energije zraka u mehaničku energiju služe zračne turbine. Njihov pogon omogućuje razlika kinetičkih energija zraka koje odgovaraju brzinama ispred i iza zračne turbine.

Maksimalnu snagu koja se može dobiti pogonom pomoću zračne turbine izračunao je Betz 1927. godine i iznosi 16/27 odnosno 0.59259 od teoretske maksimalne moguće snage.

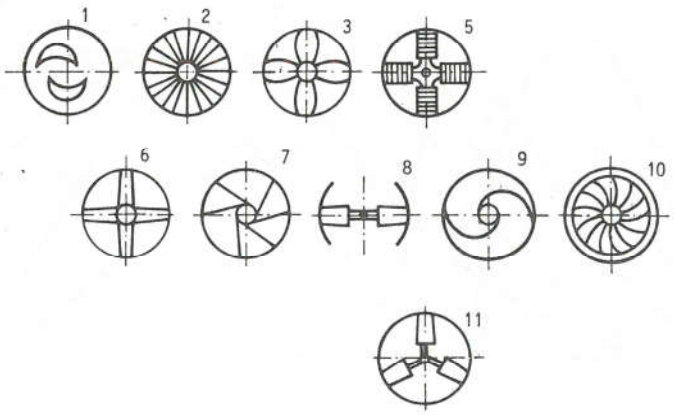
Uvažavajući maksimalni stupanj djelovanja (0.59259) dobiva se, da je maksimalna iskoristiva snaga:

$$P_{mi} = 0.3704\, Av^3 \times 10^{-3}\ (kW)\,. \qquad (241)$$

Ako površinu zračne turbine izrazimo u funkciji s polumjerom, dobiva se da je maksimalna iskoristiva snaga na osovini turbine:

$$P_{mi} = 1.163\, r^2v^3 \times 10^{-3}\ (kW)\,. \qquad (242)$$

Od samog početka korištenja zračnih turbina nastojalo se približiti u postizanju maksimalno iskoristive snage (242), a s tim u vezi se i razvio veliki broj vrsta zračnih turbina (sl. 88).



Sl. 88. Shematski prikaz vrsta zračnih turbina

Zračne turbine pokretane vjetrom, što se susreću u izvedbi i literaturi, razlikuju se po konstrukciji, a mogle bi se podjeliti prema:

- smještaju pokretnih površina (lopatica) u odnosu na pravac vjetra
- iznosu brzohodnosti.

Zračne turbine s obzirom na smjer vjetra i pokretnih lopatica u odnosu na smjer vjetra mogu biti: okomite na smjer vjetra ili u smjeru vjetra. Okomito smještene zračne turbine na smjer vjetra obično imaju horizontalna vratila, dok zračne turbine u smjeru vjetra obično imaju okomita vratila. Vertikalne zračne turbine ne mogu iskoristiti u idealnom slučaju više od 30% raspoložive količine vjetra, zbog čega su za dobivanje većih snaga potrebne vrlo velike radne površine. Znatno veću efikasnost postižu horizontalne zračne turbine (horizontalno vratilo) i radi toga se istraživači najviše bave njihovim usavršavanjem.

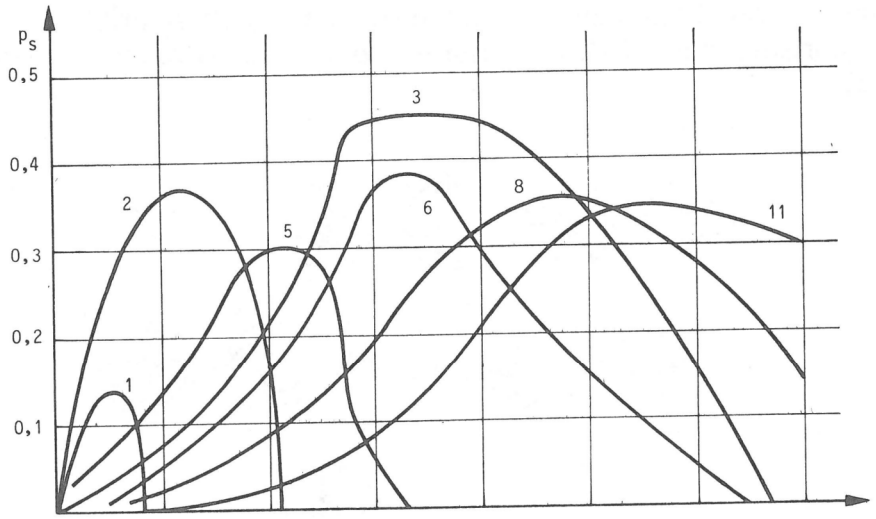
S obzirom na brzohodnost razlikuju se slijedeći tipovi zračnih turbina: sporohodne, normalne, srednje brzohodne i brzohodne. Brzohodnost je obično vezana s brojem lopatica, pa zračne turbine s većom brzinom imaju manji broj lopatica i obratno.

Usporedbom do sada korištenih zračnih turbina došlo se do zaključka da je najbolje postignute stupnjeve pretvorbe kinetičke energije vjetra u mehaničku energiju imala zračna turbina propelernog tipa visoke brzohodnosti.

Mjerilom brzohodnosti nazvan je omjer umnoška polumjera i kutne brzine zračne turbine ($r\omega$) i brzine vjetra (v), dakle

$$k_b = r\omega/v \cdot \qquad (243)$$

Poznavajući koeficijent brzohodnosti, mogu se izračunati i nacrtati krivulje ovisnosti specifične snage p_s o koeficijentu brzohodnosti za različite vrste zračnih turbina (sl. 89).

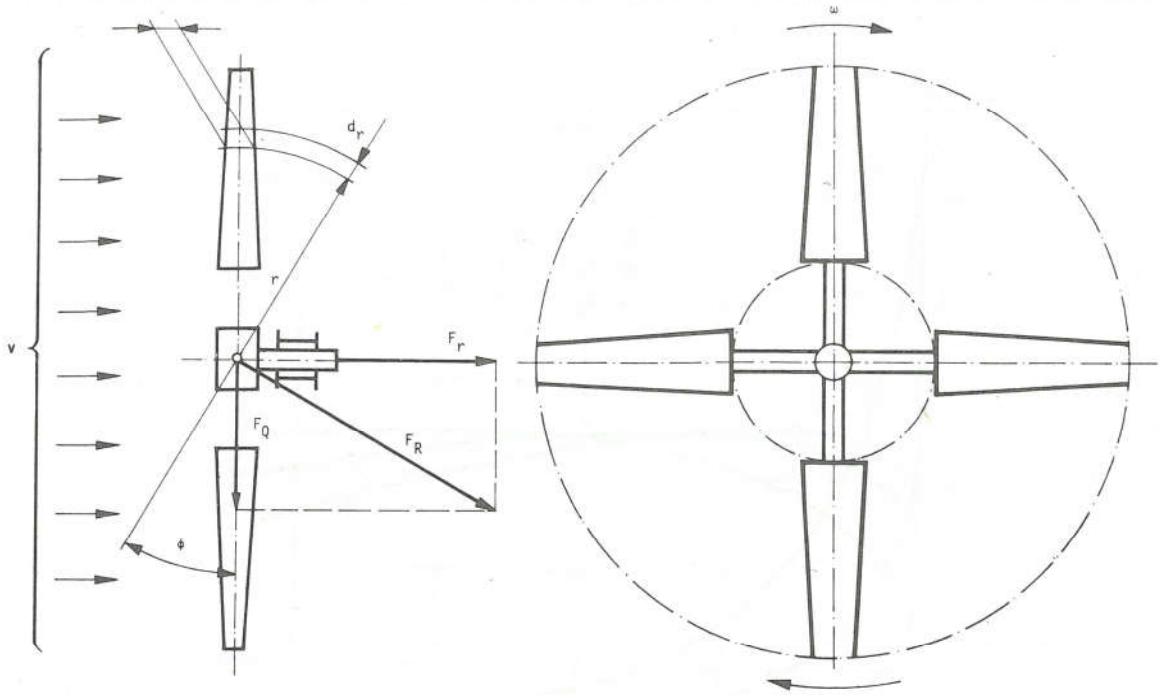


Projektiranje turbina na vjetar propelernog tipa izaziva u posljednjem desetljeću nov interes stručnjaka, da bi se uz pomoć suvremenih spoznaja i sredstava za elektroničku obradu podataka dobile njezine optimalne karakteristike.

Iako se za projektiranje brodskih propelera i vodnih turbina propelernog tipa koristi Golsteinova teorija raspodjele cirkulacije oko hidrodinamičkog profila, ipak, projektiranje optimalnih dimenzija zračnih turbina zahtijeva uvažavanje specifičnosti njezina rada u slobodnom zračnom prostoru. Stoga prilaz analizi trokuta brzina strujanja zraka kroz kolozračne turbine u pravilu vrlo reduciranog broja lopatica kada je riječ o brzohodnoj turbini, zahtijeva studiju induciranih faktora koji modificiraju veličinu i kut relativne brzine.

Radno kolo zračne turbine postavlja svoju kružnu plohu uz pomoć posebnog uređaja uvijek okomito na pravac brzine vjetra koji nizom uređenih strujnica paralelnih horizontalnom vratilu pritječe kolu, ostrujavajući lopatice nagnute prema ravnini vrtnje (slika 90).

Brzina je cirkulacije oko lopatice relativna brzini (w) kojoj pridodana obodna



Sl. 90. Radno kolo turbine u struji vjetra

brzina (r ω) na određenom polumjeru presjeka lopatice čini ukupnu brzinu vjetra (v). Prednja ploha lopatica turbine, koja se sučeljava struji vjetra, umanjuje apsolutnu vrijednost brzine v za iznos inducirane brzine (v_i), dok inducirani rubni vrtlozi smjera rotacije istog smjera $\vec{\omega}$ kola, generiraju njezino povećanje za brzinu u_i. Inducirane brzine prema pravcima vektora kojim se pokazuju, nazivaju se aksijalnom (v_i) i obodnom (u_i), a njihove bezdimenzionalne vrijednosti induciranim aksionim i obodnim faktorima a_1 i a_2:

$$v_i/v = a_1, \quad u_i/r\omega = a_2 \cdot \tag{244}$$

Izračunavanje induciranih aksionih i obodnih faktora (a_1 i a_2) temelji se uglavnom na iterativnim postupcima, a među najčešće upotrebljavanima su Newton-Raphsonov i Gauss-Siedelov postupak. Budući da su inducirani faktori ovisni o promjeru lopatica (r), o faktoru brzohodnosti (K_b), te o odnosu koeficijenta otpora i koeficijenta uzgona (K), to nema egzaktne metode za njihovo izračunavanje. Na temelju do sada izvršenih istraživanja, ovisnost induciranih aksionih i obodnih faktora o promjeru r za neke stupnjeve brzohodnosti, te za jedan odnos koeficijenta otpora i koeficijenta uzgona (K), prikazana je na slici 91.

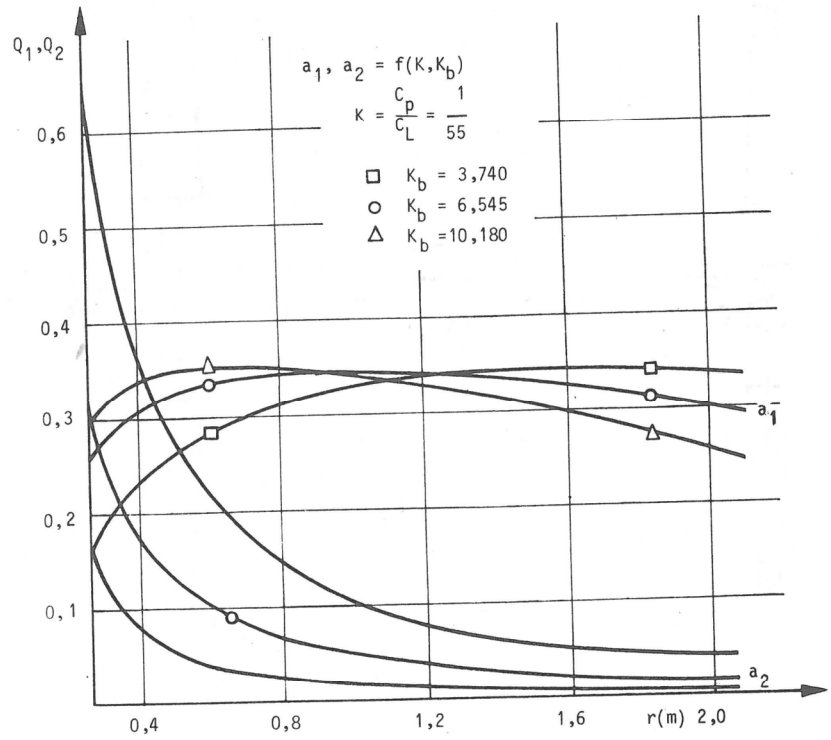
Srednje brzohodne i brzohodne zračne turbine imaju profiliranu lopaticu u aerodinamičnom obliku. Na slici 91 prikazan je dijagram brzina i induciranih sila koje djeluju na jednom presjeku aerodinamične lopatice, a u ravnini njenog aerodinamičkog presjeka. Iz trokuta brzina na slici 92. slijedi da je vektor sume vjetra jednak

$$\vec{v} = \vec{w} + \vec{u}_i + \vec{v}_i + \vec{r}\,\omega \cdot \tag{244}$$

Koristeći jednadžbe (244) dobiva se:

$$\vec{v}\,(1-a_1) = \vec{w} + \vec{r\omega}\,(1+a_2) \cdot \tag{245}$$

Brzina vjetra v kojom vjetar okomito nastrujava na plohu radnog kola reducira se otporom njegove površine za iznos aksijalne komponente brzine v_i, tako da se u



Sl. 91. Ovisnost induciranih aksionih i obodnih faktora (a_1 i a_2) o polumjeru za jedan odnos koeficienta otpora i koeficienta napona

trokutu brzina pojavljuje veličina $\vec{v}(1-a_1)$. Kolo turbine djelovanjem brzine $\vec{v}(1-a_1)$ vrti se u pravcu obodne komponente ove brzine $\vec{r\omega}$ $(1+a_2)$ čiji se iznos $\vec{r\omega}$ uvećava za faktor pritjecanja a_2 obodne komponente pritjecajne brzine $\vec{u}_i$. Obodni faktor pritjecanja je posljedica rubnih vrtloga koji se formiraju na slobodnim krajevima, lopatica, tvoreći vrtložnu stazu iza rotora turbine istog smisla rotacije kao $\vec{\omega}$ vektor rotacije kola, sa čijom se obodnom brzinom superponiraju. Struja vjetra pak, za promatrača koji bi rotirao s kolom, obstrujava profil lopatice relativnom brzinom $\vec{w}$ sa napadnim kutom α prema tetivi profila. Na sl. 92. prikazan je kut φ brzine w prema ravnini kola kao i $\beta = \gamma - \alpha$ kut postavljanja profila lopatice prema ravnini kola.

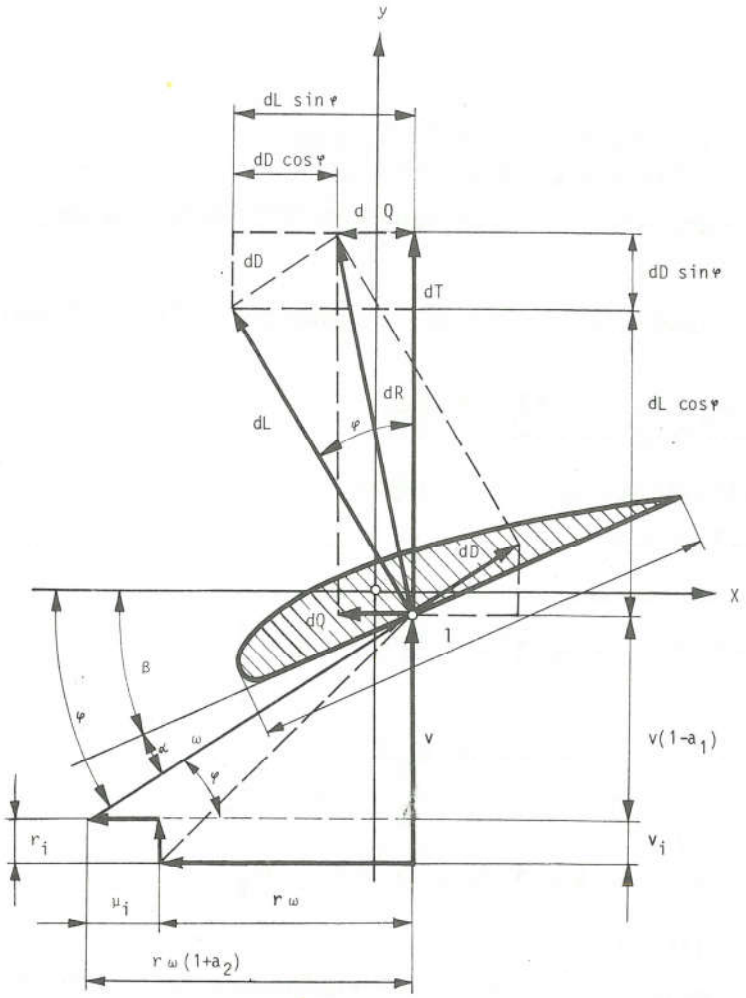
Obstrujavanjem vjetra (zrak u gibanju) brzinom w koja svoj iznos u području profila mijenja iz točke u točku, čineći tako tlačno polje poznate promjene tlaka iz teorije profila, nastaju elementarne aerodinamičke sile uzgona $d\vec{L}$, i otpora $d\vec{D}$, od kojih je prva okomita na brzinu $\vec{w}$, a druga u njenom pravcu (sl. 92). Rezultanta ovih dviju sila je $d\vec{R}$. Iznosi elementarnih aerodinamičkih sila $d\vec{L}$ i $d\vec{D}$ određuju se prema poznatoj teoriji elementarnih presjeka aeroprofila, a glase:

$$dL = c_L \rho w^2/2\, l\, dr \qquad (246)$$

$$dD = c_D \rho w^2/2\, l\, dr \qquad (247)$$

gdje je:

ρ - gustoća zraka dane temperature,



Sl. 92. Dijagram brzina i induciranih sila na presjeku lopatice zračne turbine

c_L - koeficijent uzgona,
c_D - koeficijent otpora,
l - dužina profila,
r - polumjer presjeka lopatice,
w - relativna brzina.

Prema jednadžbama (246 i 247) veličine ovih sila ovise o kvadratu relativne brzine w kao i geometrijskim karakteristikama profila (c_L, c_D, l, dr) koje se mijenjaju sa napadnim kutem α kao i položajem presjeka kola (r). Rezultanta sila (dR) prema slici 91. može se rastaviti na tangencijalnu komponentu dQ koja je motorna sila torzionog momenta dM_Q radnog kola i silu aksijalnog pritiska dT.

Navedene sile prema paralelogramu sila (sl. 92) iznose:

$$dT = dL \cos \varphi + dD \sin \varphi \quad (248)$$

$$dQ = dL \sin \varphi - dD \cos \varphi \,. \quad (249)$$

Ako se iz navedenih jednadžbi na desnoj strani izluči dL cos γ dobiva se:

$$dT = dL \cos \varphi \,(1 + dD/dL \; tg \, \varphi) \quad (250)$$

$$dQ = dL \cos \varphi \,(tg \, \varphi - dD/dL) \,. \quad (251)$$

Uvrštavanjem vrijednosti za dL iz jednadžbe (246) u jednadžbe (250 i 251)

dobiva se:

$$dT = c_L \rho w^2/2\, l dr \cos\varphi\,(1 + dD/dL \operatorname{tg}\varphi) \quad (252)$$

$$dQ = c_L \rho w^2/2\, l dr \cos\varphi\,(\operatorname{tg}\varphi - dD/dL). \quad (253)$$

Delenjem jednadžbe (247) s jednadžbom (246) dobiva se da je:

$$dD/dL = c_D/c_L = K. \quad (254)$$

Unošenjem vrijednosti za dD/dL u jednadžbe (253 i 252) kao i iznos za broj lopatica (B) dobiva se:

$$dT = c_L \rho w^2/2\, lB \cos\varphi\,(1 + k \operatorname{tg}\varphi) \quad (255)$$

$$dQ = c_L r w^2/2\, lB \cos\varphi\,(\operatorname{tg}\varphi - k). \quad (256)$$

Iz trokuta brzina prema slici 91. slijedi:

$$\cos\varphi = r\omega(1+a_2)/w \quad (257)$$

$$W = \sqrt{r^2\omega^2(1 + a_2)^2 + v^2(1 - a_1)^2} \quad (258)$$

pa je:

$$\cos\phi = \frac{r\omega(1 + a_2)}{\sqrt{r^2\omega^2(1 + a_2)^2 v^2(1 - a_1)^2}} \quad (259)$$

(259)

$$\operatorname{tg}\varphi = v(1-a_1)/r\omega(1+a_2). \quad (260)$$

Uvrštavanjem navedenih vrijednosti u jednadžbe (255 i 256) dobiva se

$$dT = \frac{c_L \rho l B}{2} |r\omega(1+a_2) + kv(1-a_1)| \sqrt{r^2\omega^2(1+a_2)^2 + 2(1-a_1)^2}\, dr \quad (261)$$

$$dQ = \frac{c_L \rho l B}{2} v(1-a_1)\, Kr\omega(1+a_2) \sqrt{r^2\omega^2(1+a_2)^2\omega^2(1-a_1)^2}\, dr \quad (262)$$

Drugi, znatno jednostavniji pristup proračunu tangencijalnih i oksialnih sila je Froude-Rankinov pristup koji se temelji na primjeni impulsne jednadžbe na strujanje kroz radno kolo turbo-stroja. Kod navedenog postupka brzina pred kolom zračne turbine je:

$$v_1 = v - v_i \quad (263)$$

a iza kola:

$$v_2 = v - v_i' \quad (264)$$

gdje je v_i' poremećena brzina izlazne struje zbog pojave vrtloga iza kola zračne turbine.

Prema teoriji Žukovskog je:

$$v_i' = 2v_i \quad (265)$$

$$u_i' = 2u_i. \quad (266)$$

Diferencijalne tangencijalne i aksialne sile na kolu zračne turbine iznose:

$$dQ = 2\pi\rho v_1 u' r\, dr \quad (267)$$

$$dT = 2\pi\rho v_1^2 r\, dr. \quad (268)$$

Koristeći jednadžbe (244, 263, 264, 265 i 266) dobiva se:

$$dQ = 4\pi\rho v (1 - a_1) a_2 r^2 \omega\, dr \quad (269)$$

$$dT = 4\pi\rho (1 - a_1) a_1 v^2 r\, dr. \quad (270)$$

Tangencijalna komponenta u sebi sadrži $r^2\omega$, a budući da je brzohodnost zračne turbine određena prema jednadžbi (243), to se jednadžba (269) može pisati u obliku:

$$dQ = 4\pi\rho (1-a_1) a_2 v^2 k_b\, r\, dr. \quad (271)$$

Integriranjem navedenih jednadžbi dobivaju se tangencijalne i aksialne komponente sila koje djeluju na radno kolo zračne turbine, a preko njih određuje se i ukupni moment okretanja kola zračnih turbina.

2.6.2. STUPANJ DJELOVANJA I IZBOR TIPA ZRAČNE TURBINE

Stupanj djelovanja zračne turbine određuje se kao omjer između određene (dobivene) snage i dovedene snage, dakle

$$\eta = P_o/P_d. \quad (272)$$

Snaga strujanja zraka (dovedena snaga) određuje se prema jednadžbi (239). Ako se pak u navedenoj jednadžbi umjesto volumena u jedinici vremena stavi umnožak površine (A) i brzine (v), dobiva se izraz za dovedenu snagu:

$$P_d = 1/2\,\rho A v^3. \quad (273)$$

Snaga strujanja zraka koja se može iskoristiti manja je od dovedene snage prema (273). Naime, da bi se mogla iskoristiti kinetička energija zraka, zrak mora strujati i iza zračne turbine, da bi načinio mjesta zraku koji dolazi. Prema navedenom, pogon zračnih turbina omogućuje razlika kinetičkih energija prije i poslije zračne turbine. Da se odredi volumen iz umnoška površine (A) i brzine (v'), potrebno je za brzinu (v) uvrstiti srednju vrijednost brzine zraka neposredno pred zračnom turbinom (v) i neposredno iza nje (v_2). Srednja brzina iznosi:

$$v' = (v + v_2)/2. \quad (274)$$

Prema tome, za određenu (dobivenu) snagu (P_o) može se pisati:

$$P_o = \frac{1}{2}\,\rho\, A\frac{v+v_2}{2}\, v^2 \quad (275)$$

iz čega slijedi da je stupanj djelovanja

$$\eta = 1/2[1-(v_2/v)^2](1+v_2/v). \quad (276)$$

Znajući za v_2 vrijednost prema (264), a za v_2' vrijednost iz (265), te za v_1 vrijednost prema (244), dobiva se:

$$v_2 = v(1 - 2a_1). \quad (277)$$

Uvrštavanjem dobivene vrijednosti za v_2 (277) u jednadžbu (276) dobiva se za stupanj djelovanja slijedeća vrijednost:

$$\eta = 4a_1(1 - a_1)^2. \quad (278)$$

Maksimalna vrijednost stupnja djelovanja postiže se kod $a_1 = 1/3$ pa ona iznosi 0.59259 što se često naziva "idealnim" stupnjem djelovanja.

Kada su presjeci lopatica zračnih turbina aerodinamičkih profila, stupanj djelovanja može se odrediti kao omjer umnoška tangencijalne komponente sile, polumjera i kutne brzine s umnoškom aksialne komponente sile i brzine vjetra, dakle

$$\eta = dQr\omega/dTv. \quad (279)$$

Uvrštavanjem vrijednosti: za dQ iz (262), za dT iz (261) za K iz (254) i za k_b iz (243) u jednadžbu (279) dobiva se:

$$\eta = k_b \frac{(1-a_1) - Kk_b(1+a_2)}{k_b(1+a_2) + K(1-a_1)}. \quad (280)$$

Iz jednadžbe (280) vidljivo je, da je stupanj djelovanja (η) kod zračne turbine s profiliranim lopaticama ovisan o karakteristikama profila preko $K = c_D/c_L$, zatim o brzohodnosti k_b i induciranim faktorima a_1 i a_2, što upravo čini zračne turbine s aerodinamički oblikovanim lopaticama boljim od ostalih zračnih turbina.

2.6.3. IZBOR TIPA ZRAČNE TURBINE

Kod izbora tipa zračne turbine potrebno je voditi računa o slijedećim elementima:

- brzini vjetra
- promjeru zračne turbine
- brzohodnosti zračne turbine i
- broju lopatica zračne turbine.

Određivanje proračunske brzine oslanja se na snimljene podatke o vjetrovima na mjestu koje se unaprijed treba planirati za postrojenja. Praćenje svih karakteristika vjetra nužno je tada provesti kroz duže razdoblje od jedne godine. Tek povoljni rezultati o potencijalima energije vjetra na određenom mjestu mogu biti polazna osnova za proračun nominalne brzine vjetra za zračnu turbinu.

Tek uz poznavanje energetskih potencijala svih vjetrova područja, odnosno regije, može se pristupiti proračunu srednje brzine odnosno nominalne brzine struja. Podaci o ukupnom srednjem trajanju pojedinih jakosti vjetrova (bez obzira na smjer), odnosno raspoloživih potencijala energije, potrebni su da bi se odredile granične brzine vjetra unutar kojih će raditi zračna turbina. Donja je granica brzine ona brzina ispod koje se potencijali energije po svom ukupnom trajanju tijekom srednje obrađene godine mogu zanemariti. Gornju pak granicu, određuje mogućnost stroja da podnese naprezanje izazvano velikim brzinama, kao i sposobnost reagiranja sistema automatskog isključivanja pri olujnim brzinama vjetrova.

Na temelju izabrane brzine određuje se potrebna snaga zračne turbine. Prema jednadžbi (273) određuje se "idealna" snaga zračne turbine, a za srednju godišnju brzinu vjetra izračunatu na temelju trajanja brzina u intervalu graničnih vrijednosti.

Idealna snaga je:

$$P_i = 1/2\, A\rho v^3 \eta_i \qquad (281)$$

gdje je η_i "idealni" stupanj djelovanja (0.59259), A površina zračne turbine, a v odabrana brzina vjetra.

Međutim, izbor stvarnog stupnja djelovanja zračne turbine, a i cijelog agregata, može se izvršiti samo na temelju grube procjene temeljene na oskudnim podacima o radu strojeva slične konstrukcije i veličine. Iz naprijed navedenoga može se zaključiti da je veoma veliki broj faktora koji utječu na stupanj djelovanja agregata. Približna vrijednost stupnja djelovanja može se dobiti snimanjem na aerodinamički sličnom stroju za određeno strujno polje vjetrova i istu brzohodnost.

Kod određivanja promjera zračne turbine za određenu snagu, bolje je ići na niži stupanj djelovanja zračne turbine nego obrnuto, jer će se na taj način dobiti snaga zračne turbine bliža realno mogućoj.

Na temelju podataka iz prethodnih razmatranja, a s izabranom nominalnom kutnom brzinom rotacije zračne turbine ω, računa se nominalna brzohodnost k_b:

$$k_b = R\omega/v \qquad (282)$$

gje je R polumjer zračne turbine.

Kao i kod drugih vrsta pretvorbi energije za stupanj djelovanja zračne turbine od primarnog je značenja podizanje boljeg stupnja djelovanja što znači, veću ukupno dobivenu energiju tijekom rada. Radi toga su teoretske i eksperimentalne studije svih utjecaja na stupanj djelovanja, posebno onih vezanih za aerodinamičke karakterisike lopatice turbine, od posebne važnosti.

Broj lopatica kod zračnih turbina kreće se od dvije kod brzohodnih do dvanaest ili više kod sporohodnih (sl. 88).

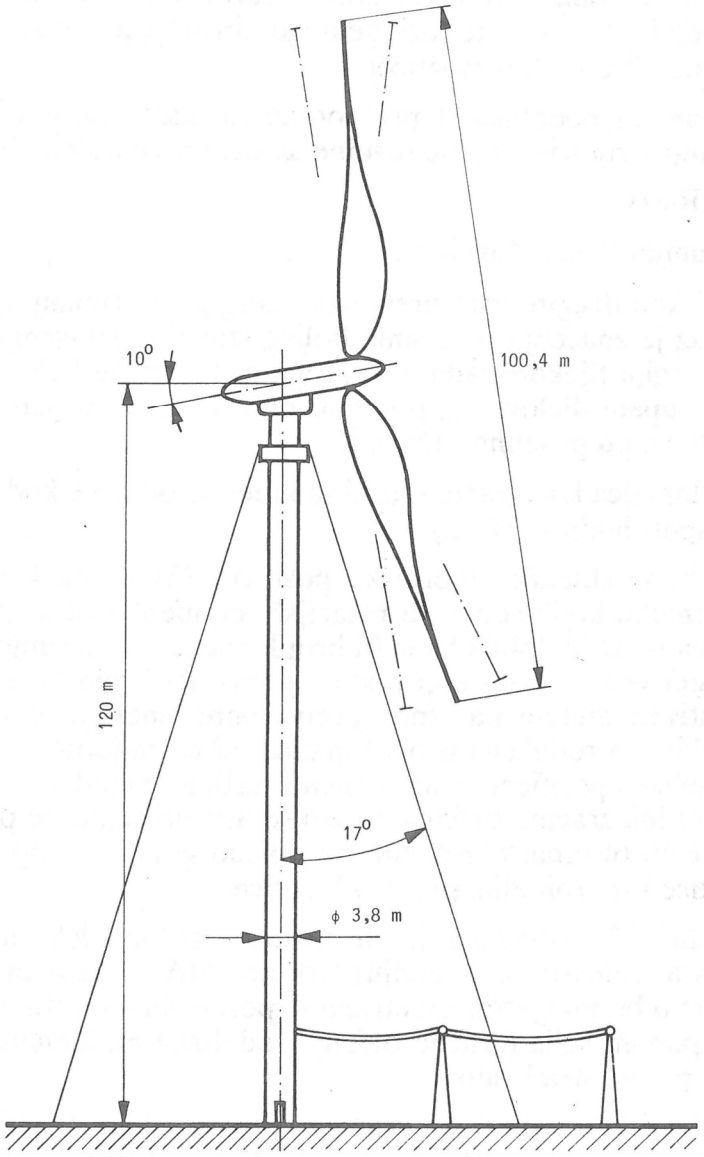
Ako bi se slijedile teoretske postavke Froud-Rankina, kao i aerodinamičke teorije na temelju kojih se izvodi rotacijski moment zračne turbine, očito je da bi se najveća snaga rotacije dobila kada bi broj lopatica bio neizmjerno velik. Zbog utjecaja trenja i drugih vrsta otpora koji rastu s porastom broja lopatica, ovaj porast s druge strane negativno djeluje na iznos pretvorbene energije u energiju rotacije vratila. Očito je, dakle, da redukcija broja lopatica od neizmjernog broja na 4, 3, 2, ne utječe mnogo na velike specifične snage zračne turbine. Slijedeći ove rezultate i postignuta iskustva u gradnji zračnih turbina, mogu se usvojiti slijedeće preporuke o izboru broja lopatica zračnih turbina: brzohodne se obično grade s 2 lopatice, srednje brzohodne od 2-4 lopatice i sporohodne preko 4 lopatice.

Na slici 93. navedena je dispozicija zračne elektrane (pretvorba kinetičke energije vjetra u električnu energiju) tvornice MAN-Growian iz 1983. godine snage 2-3 MW ovisno o brzini vjetra. Elektrana je postavljena na stupu visine 120 m, promjera 3.8 m, s rasponom krila (zračne turbine) od 100.4 m. Zračna turbina može mijenjati svoj položaj prema struji vjetra.

Problemi kod realizacije zračnih turbina velikih snaga proizilaze i iz činjenice postojanja različitih snaga (koje su posljedica različitih brzina vjetra) duž propelera zračne turbine, jer je poznato da se snaga vjetra na nekoj visini računa prema jednadžbi:

$$v = v_o \sqrt[5]{\frac{h}{h_o}} \qquad (283)$$

gdje je v_o referentna brzina vjetra na visini h_o (obično 10 ili 40 m), a h je visina za koju se traži brzina. Za navedenu zračnu turbinu promjera 100.4 m postavljenu na visinu 120 m, razlika snage na turbinu (u slučaju kada je turbina u položaju okomitom na površinu) iznosi 41.3%. Naime, ako se snaga koja djeluje na vrh turbine označi s 1.0, na dnu turbine postiže se snaga 0.587. Ta razlika se smanjuje okretanjem kola turbine i nestaje u situaciji kada je propeler turbine horizontalan, da bi se nakon toga opet povećala. Promjena sila ima za posljedicu dodatna naprezanja i vjerojatno izvjesne vibracije, što sve zajedno poskupljuje postrojenje.



Sl. 93. Dispozicija jedne vjetrenjače snage 2-3 MW

2.7. PRETVORBE MEHANIČKE U ELEKTRIČNU I ELEKTRIČNE U MEHANIČKU ENERGIJU

2.7.1. TEMELJNI POJMOVI I FIZIKALNE PODLOGE ZA PRETVORBE MEHANIČKE U ELEKTRIČNU I ELEKTRIČNE U MEHANIČKU ENERGIJU

Pretvorbe mehaničke u električnu i električne u mehaničku energiju vrše se u napravama koje se jednim imenom nazivaju električni strojevi. Međutim, potrebno je odmah načiniti podjelu u električnim strojevima i to na generatore i motore. Električni generatori su strojevi u kojima se mehanička energija pretvara u električnu, a električni motori (elektromotori) su strojevi u kojima se električna energija pretvara u mehaničku energiju.

Pretvaranje jednog oblika energije u drugi nije savršeno jer se sva energija koja se stroju dovodi ne može pretvoriti u drugi oblik zbog postojanja gubitaka kod pretvorbe. Redovno se gubici pojavljuju kao toplinska energija koja se predaje okolini i koja je prema tome izgubljena za dalje iskorištenje.

Osnovno djelovanje svih električnih storjeva svodi se na vezu između mehaničkog gibanja i mehaničkih sila, s jedne strane i električnih napona i struja, s druge strane. Posrednik je pretvorbe u svim slučajevima magnetsko polje. Da bi se u potpunosti mogli shvatiti energetski odnosi u električnim strojevima, potrebno je naglasiti da električna polja nastaju u izolacijama i da se bez njih ne bi mogli uspostaviti naponi potrebni za dovođenje ili odvođenje električne energije. Energija samog električnog polja, tj. rad potreban da bi se to polje sagradilo, vrlo je mala u usporedbi s energijom koju stroj pretvara, pa se ne uzima u račun pri promatranju energetskih prilika u električnom stroju.

Tri su temeljna zakona elektrotehnike na kojima se zasniva mogućnost rada električnih strojeva u najrazličitijim varijantama njihovih izvedbi. To su: a) - opći zakon indukcije, b) - zakon elektromagnetskog protjecanja i c) - zakon sile u magnetskom polju.

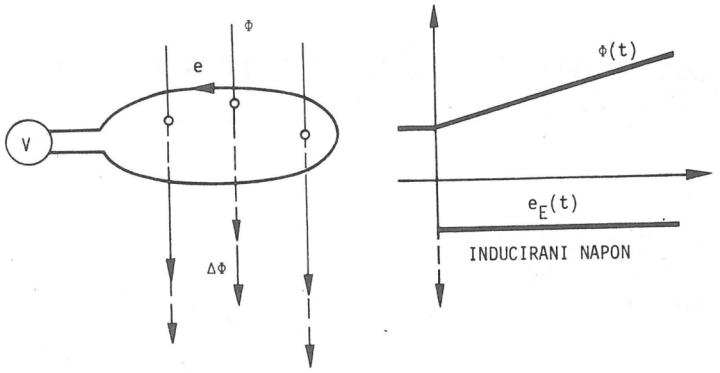
a) Opći zakon indukcije glasi: U zatvorenoj se petlji koja obuhvaća magnetski tok Φ inducira električni napon E jednak brzini promjene toka u petlji, a smjera takvog da bi proizveo struje koje se protive promjeni toka (sl. 94).

$$E = d\Phi/dt. \qquad (284)$$

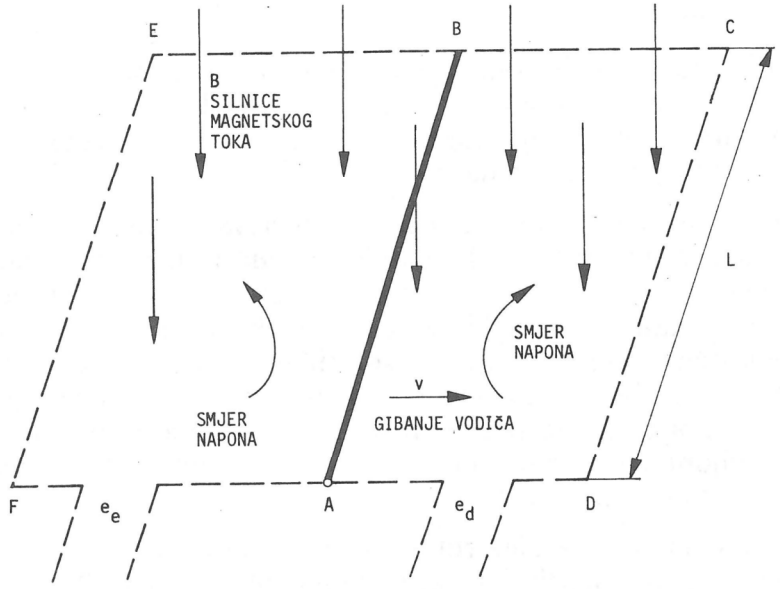
Jedinica za magnetski tok (Φ) je weber (W_b) a određuje se kada pri nestanku magnetskog toka zavojem otpora 1 Ω koji obuhvaća taj magnetski tok, protječe naboj od 1 coulomba (As).

Za induciranje napona potrebna je promjena toka, a ona se može postići bilo promjenom toka (promjena toka se postiže tako da se mijenja bilo struja koja tok uzbuđuje bilo otpor magnetskog kruga) bilo mehaničkim gibanjem (promjena toka ostvaruje se različitim zahvaćanjem toka u petlji zbog mehaničkog gibanja).

Mnogo češće je u upotrebi induciranje napona pomoću mehaničkog gibanja. To gibanje ostvaruje se putem vrtnje električnih slojeva (napon rotacije). Inducirani napon u vodiču proporcionalan je brzini kojom vodič siječe silnice magnetskog toka. Ako je magnetska indukcija B, duljina vodiča L, a njegova brzina v, i ako se vodič



Sl. 94 Opći zakon indukcije



Sl. 95 Napon rotacije pri gibanju vodiča u magnetskom polju

kreće kroz magnetsko polje u smjeru koji je okomit na smjer njegova protezanja, a smjer silnica polja okomit je na ravninu koju čine vodič i smjer njegova gibanja (sl. 95) može se napon rotacije u vodiču izraziti jednadžbom

$$E = BLv. \tag{285}$$

Magnetska indukcija B je ustvari gustoća magnetskog toka, a njena jedinica je 1 tesla (T). Tesla je magnetska indukcija homogenog magnetskog toka od 1 Wb koji prolazi kroz površinu od 1 m^2 okomitu na magnetski tok (Wb/m^2).

b) Zakon protjecanja povezuje električne struje i magnetske tokove. Magnetska indukcija, vezana je s magnetskim poljem jakosti H jednadžbom

$$B = \mu H \tag{286}$$

gdje je μ permeabilnost, veličina karakteristična za medij i njegovo magnetsko stanje. Tako je npr. permeabilnost željeza mnogo veća od permeabilnosti zraka, pa se magnetski tok najvećim dijelom zatvara putem koji određuje aktivni željezni dio, tzv.

magnetskim krugom uz koji se nalaze vodiči kojima protječe struja.

Za svaki zatvoreni krug (silnice magnetskog toka zatvorene su linije) vrijedi zakon protjecanja

$$\oint Hds = \Sigma I \tag{287}$$

gdje se linijski integral $\oint Hds$, tzv. magnetski napon, odnosi na obodnu krivulju plohe površine S.

Obično se u električnim strojevima nalazi više zavoja kroz koje protječe struja I, pa se za ukupno strujno protjecanje može navesti da je

$$\Theta = NI \tag{288}$$

gdje je N broj zavoja.

Zakon protjecanja može se pisati u obliku

$$\oint H/\mu \, ds = \Theta \tag{289}$$

c) Zakon o sili koja djeluje na vodič u magnetskom polju slijedi iz Biot-Savartovog zakona i glasi:

$$F = BIL \tag{290}$$

gdje je F sila na vodič dužine L kroz koji teče struja I, a B magnetska indukcija. Navedena jednadžba (290) vrijedi kad su međusobno okomiti smjer magnetske indukcije i smjer struje, odnosno vodiča. Ako taj uvjet nije, ili kad je kut između smjera vodiča i smjera magnetske indukcije različit od 90°, sila F određuje se iz jednadžbe:

$$F = B\,IL \sin \alpha \tag{291}$$

gdje je α kut između smjera magnetske indukcije (B) i smjera duljine vodiča (L). Veličine B i L mogu se smatrati vektorima, pa u tom slučaju vrijedi:

$$F = I(\vec{L} \times \vec{B}). \tag{292}$$

Struja (I) je pozitivna kada teče u smjeru vektora L.

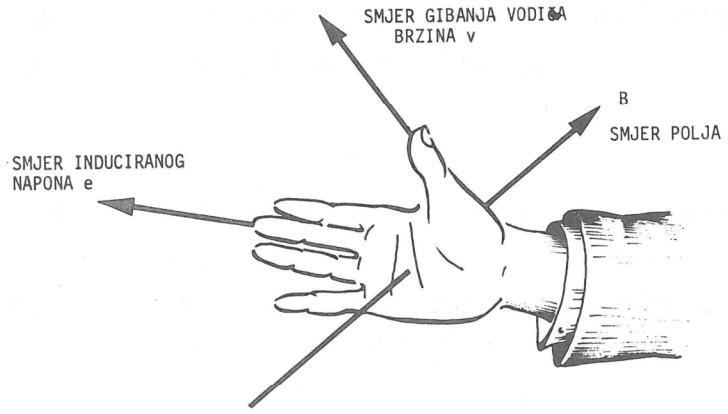
Usporede li se zakon o indukciji i zakon o sili u magnetskom polju, pokazuje se da i ovdje vrijedi energetska ravnoteža. Naime, gibanjem vodiča L brzinom v u polju indukcije B inducira se napon E (pravilo dnesne ruke sl. 96). No čim taj napon E protjera kroz vodič struju I te na taj način izvrši kroz vrijeme dt rad

$$dW = EI\,dt$$

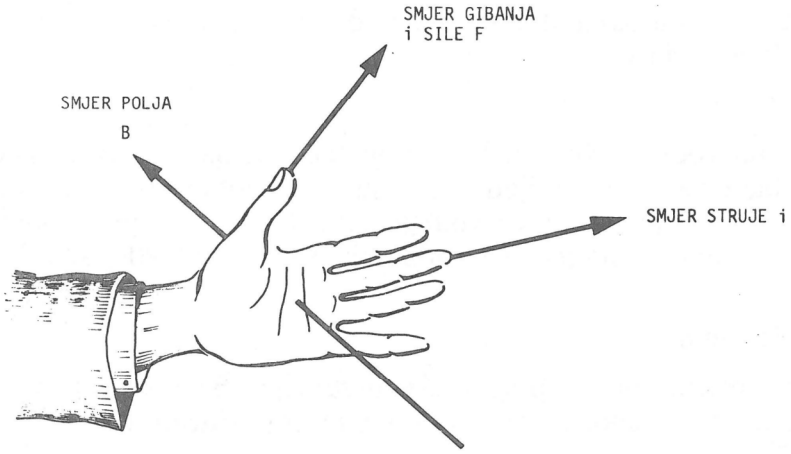
javlja se (po pravilu lijeve ruke sl. 97) mehanička sila F nasuprot smjeru gibanja. Da bi se održalo gibanje treba, dakle, izvršiti mehanički rad

$$dW = Fv\,dt = BIL\,vdt = EI\,dt. \tag{293}$$

Na taj se način pretvara mehanička energija u električnu energiju s pomoću električnih generatora. Ako se pak s pomoću napona iz nekog vanjskog izvora protjera kroz vodič struja I, u tom slučaju vodič se počinje kretati zbog sila koje se javljaju između magnetskog polja i njega. Po pravilu desne ruke u vodiču se inducira napon suprotan smjeru narinutog napona. Da bi se u vodiču mogla održati struja jakosti I nasuprot narinutom naponu E, mora se iz vanjskog izvora stalno dovoditi električna energija dW = IE dt. Zbog te dovedene energije javlja se sila u smjeru kretanja vodiča i takav vodič može vršiti mehanički rad. To je princip rada električnih motora.



Sl. 96 Pravilo desne ruke



Sl. 97 Pravilo lijeve ruke

Izvedba električnih strojeva obično se izvodi tako da su vodiči obično smješteni na obodu rotora koji može slobodno rotirati. Mehanička sila F, koja se javlja prilikom gibanja vodiča kroz magnetsko polje, suprotna je smjeru gibanja. Sila koja djeluje na vodič na obodu rotora (polumjera r) daje zakretni moment

$$M = Fr \,. \tag{294}$$

Poznato je da se kutna brzina (ω) odredi tako da se obodna brzina (v) podjeli s udaljenosti obodne brzine od osi vrtnje, dakle

$$\omega = v/r \,. \tag{295}$$

Koristeći jednadžbu (293) i jednadžbe (294) i (295) može se pretvorena energija (bilo mehanička u električnu, bilo električna u mehaničku) u generatorskom ili motornom pogonu izraziti jednadžbom:

$$dW = Fv\,dt = M\omega dt \tag{296}$$

iz čega slijedi da je pretvorena snaga:

$$P = dW/dt = M\omega \,. \tag{297}$$

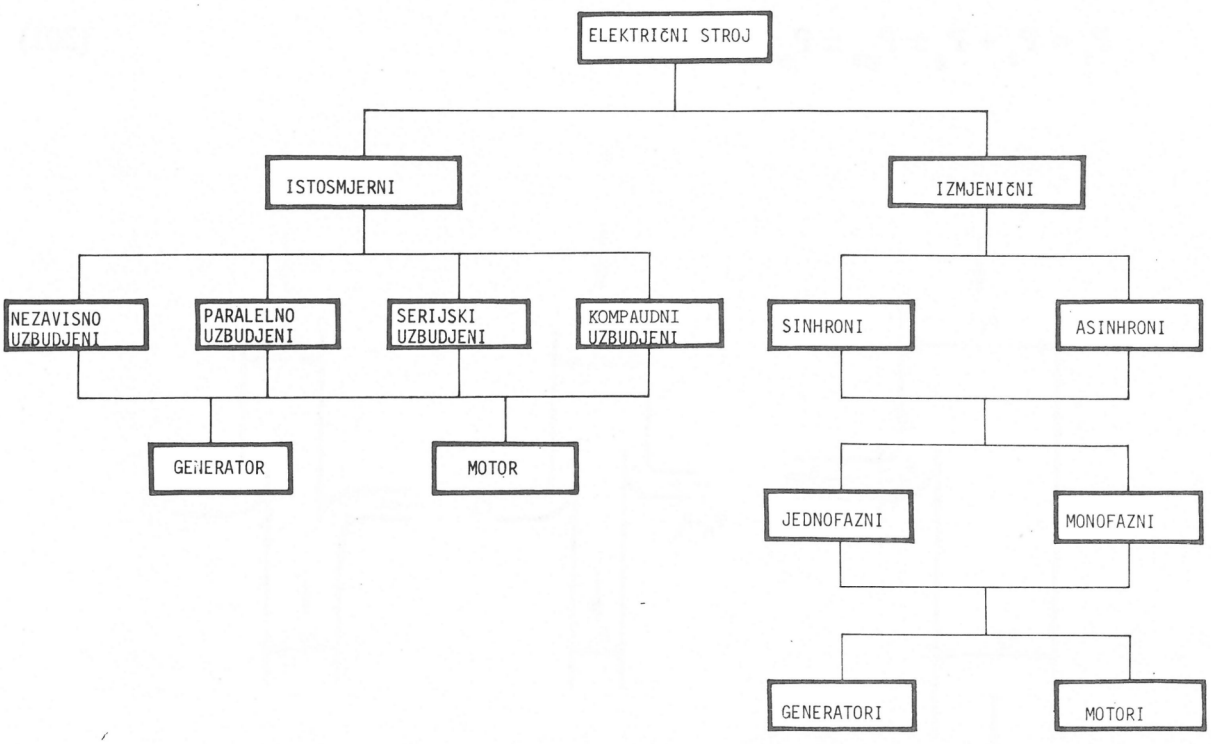
Iz navedenoga slijedi da se pri opterećenju električnog generatora pojavljuje mehanički protumoment na osovini, pa se radi toga mora generatoru dovoditi mehanička energija da bi se održao u pogonu. Obrnuto, elektromotor će pri mehaničkom opterećenju uzimati električnu energiju kako bi mogao savladati mehanički moment.

Jedna od velikih prednosti električnih strojeva (generatora i motora) leži u njihovoj sposobnosti da se voema lako mogu prilagoditi uvjetima opterećenja.

S obzirom na to kakvu struju električni stroj proizvodi (generator) ili kakvu struju troši (motor), električni strojevi se dijele na istosmjerne i izmjenične. Izmjenični električni strojevi mogu biti jednofazni ili višefazni, te sinhroni, asinhroni i kolektorski (sl. 98).

Prema zakonu protjecanja magnetski tok stvara se u svim namotima kroz koje protječe struja. U situaciji kada se radi o namotima čiji je zadatak stvaranje i održavanje magnetskog polja govori se o uzbudnim namotima, a kada se radi o namotima u kojima se inducira napon govori se o armaturnim namotima.

Kako će se kasnije vidjeti, uzbudni namoti se pojavljuju kod sinhronih i istosmjernih električnih strojeva kao namoti polova i njima protječe istosmjerna struja. Armaturni namoti nalaze se u rotoru istosmjernih strojeva i statoru sinhronih strojeva. Namot statora asinhronog stroja daje osnovnu uzbudu magnetskog polja, a u njemu se također inducira napon i protječe energija koja se pretvara u mehaničku ili električnu energiju, pa se radi toga taj namot može svrstati u uzbudni i u armaturni namot.



Sl. 98 Vrste električnih strojeva

Kod električnih strojeva vrlo često se upotrebljava rotirajuće magnetsko polje, a ono može nastati na dva načina: vrtnjom rotora na kome su elektromagneti uzbuđeni istosmjernom strujom ili višefaznim izmjeničnim strujama koje stvaraju rotirajuće magnetsko polje. U oba navedena slučaja međusobno su zavisni brzina vrtnje polja n_s, broj polova p i frekvencija napona f. Budući da se frekvencija određuje kao "broj titraja u sekundi", a broj okretaja obično se daje na minutu, to jednadžba za sinhroni broj okretaja glasi:

$$n_s = 60\, f/p. \tag{298}$$

I kod mirujućeg i kod rotirajućeg magnetskog polja kod svih strojeva u armaturnim namotima (vodičima) inducira se izmjenični napon.

Razliku između dovedene i dobivene energije kod električnih strojeva nazivamo gubicima, a ta razlika energije uvijek se pretvara u toplinu. Međutim, važno je napomenuti da postoji razlika kod određivanja gubitaka u stacionalnom stanju i gubitaka kod promjene pogonskog stanja.

U stacionarnom stanju električnom stroju dovodi se snaga P_1, a stroj predaje snagu P_2. Razlika između tih snaga (sl. 99a) su gubici, dakle:

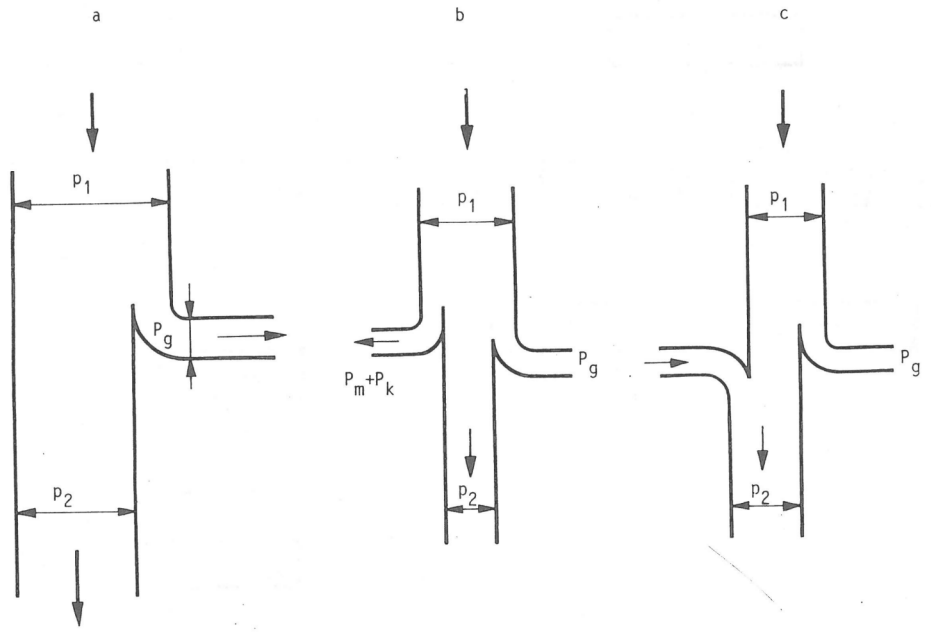
$$P_g = P_1 - P_2 \tag{299}$$

ili

$$P_1 = P_2 + P_g. \tag{300}$$

Kod promjene pogonskog stanja, bilo uslijed promjene jakosti magnetskog polja ili uslijed promjene brzine, javljaju se dodatni gubici. Ti gubici su dvojaki i to: za stvaranje (promjenu) magnetskog polja P_{gm} i za promjenu ubrzanja mase P_{gs}. Prema navedenome slijedi da je dovedena snaga P_1 jednaka:

$$P_1 = P_2 + P_g \pm P_{gm} \pm P_{gs}. \tag{301}$$



Sl. 99 Dijagram toka energije u stacionarnom stanju (a) i za vrijeme prelaznih pojava (b, zbroj $P_m + P_k$ pozitivan i c, P_m+P_k negativan)

S obzirom na to da dodatni gubici ($P_{gm} + P_{gs}$) mogu biti pozitivni (povećanje jakosti magnetskog polja, povećanje brzine) ili negativni (smanjenje jakosti magnetskog polja, smanjenje brzine), to će i potrebna dovedena snaga biti veća ili manja (sl. 99b i 99c).

Gubici u električnim stojevima nastaju na različitim mjestima, a dijele se uglavnom na:

- gubitke električne energije u namotima stroja
- gubitke u željezu koji su uzrokovani vrtložnim strujama i histerezom
- mehaničke gubitke uslijed trenja rotirajućih dijelova i pomoćnih pogona (hlađenje) električnog stroja.

Gubici u namotima električnog stroja sastoje se od gubitaka uvjetovanih omskim otporom vodiča (R) koji stvara Joulovu toplinu (I^2R), te dodatnih gubitaka u namotu uvjetovanih skin-efektom (potiskivanje struja prema rubovima presjeka vodiča odnosno od dna prema vrhu utora). Pojava skin efekta vezana je za stvaranje magnetskog polja pri prolazu izmjeničnih struja, a ima za posljedicu povećanje gubitaka odnosno povećanje Joulove topline.

Ukupni gubici električne energije u električnom stroju iznose:

$$W_e = I^2 R_i \qquad (302)$$

gdje je R_i ukupni električni otpor (omski otpor i otpor zbog skin-efekta).

Promjena magnetskog toka inducira napone ne samo u namotima struja nego i u željezu u kome se tok mijenja. Promjena magnetskog toka događa se u statoru stroja kod izmjeničnog polja, odnosno u rotoru stroja koji se vrti u mirnom polju. Veličina induciranih napona u željezu ovisi o: jakosti magnetskog polja, debljini limova i kvaliteti limova i o frekvenciji. Uz zadanu frekvenciju i magnetsko polje na gubitke u željezu može se znatnije utjecati debljinom i kvalitetom limova. Izvedbom magnetskog kruga od među sobom izoliranih tankih limova umjesto masivnog željeza postižu se manji idnucirani naponi uz veći otpor u krugu vrtložnih struja, pa se jako smanjuju vrtložne struje i od njih uzrokovani gubici u obliku Joulove topline. Gubici uvjetovani vrtložnim strujama računaju se prema jednadžbi

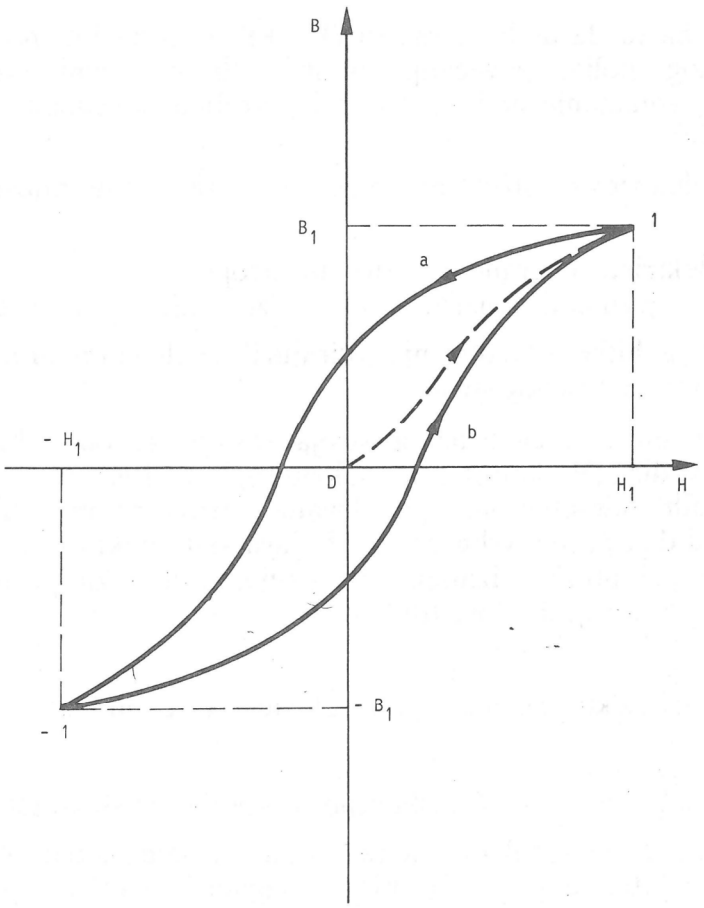
$$P_v = k_v (dfB)^2 \qquad (303)$$

gdje je k_v konstanta ovisna o vrsti lima, d debljina lima, f frekvencija i B maskimalna vrijednost magnetske indukcije.

Gubici zbog histereze jednaki su razlici između dovedene energije za izgradnju magnetskog polja i energije dobivene razgradnjom magnetskog polja. Na sl. 100. prikazana je jedna petlja histereze čija površina predstavlja gubitke histereze. Energija koja se javlja kao gubitak histereze povećava unutrašnju termičku energiju željeza, što konačno dovodi do povećanja temperature i odvođenja topline u okolinu.

Gubici zbog histereze ovisni su o obliku krivulje histereze (sl. 100), a ona o svojstvima željeza. Meko željezo normalno ima užu, a čelici širu petlju histereze. Ti gubici nisu ovisni o debljini željeza, ali ovise o broju magnetiziranja, što znači da su proporcionalni frekvenciji. Naime, jedno magnetiziranje odgovara jednom obilasku petlje histereze, pa broj obilazaka upravo odgovara broju frekvencije, pa se gubici histereze mogu izračunati prema izrazu:

$$P_n = k_n f B^2 \qquad (304)$$



Sl. 100 Petlja histereze

gdje je k_n konstanta ovisna o karakteristikama lima, B magnetska indukcija i f frekvencija.

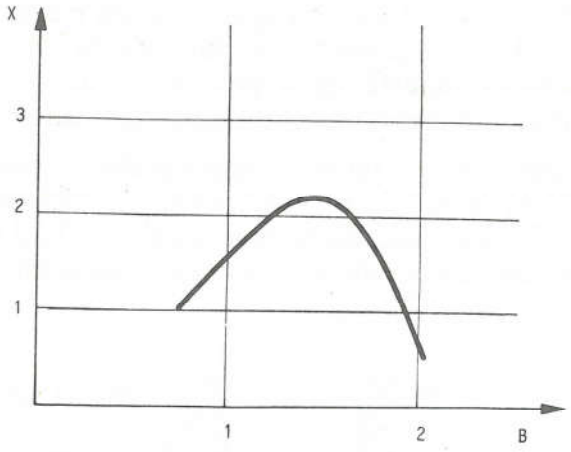
Ovisnost gubitaka zbog histereze o magnetskoj indukciji prikazana je krivuljom histereze iz koje se može zaključiti da su ti gubici ovisni o indukciji na neki eksponent (B^x). Ovisnost eksponenta x o magnetskoj indukciji prikazana je na sl. 101. pa prema toj slici može se grubo uzeti da su gubici zbog histereze proporcionalni kvadratu magnetske indukcije.

Mehanički gubici sastoje se od gubitaka nastalih zbog trenja u ležajevima, gubitaka zbog ventilacije i gubitaka zbog trenja četkica.

Gubici zbog trenja u ležajevima proporcionalni su promjeru i duljini ležaja, te obodnoj brzini osovine s eksponentom 1.5.

Ventilacija je potrebna da bi se odvodila toplina koja je posljedica gubitaka u namotu i željezu, a energija za osiguranje strujanja rashladnog medija proporcionalna je gustoći rashladnog medija, njegovu volumenu u jedinici vremena i kvadratu obodne brzine rotora.

Gubici zbog trenja četkica pojavljuju se u strojevima s kliznim kolutima i kolektoru, dodirnoj površini četkice i obodnoj brzini koluta i kolektora.



Sl. 101 Ovisnost eksponenta magnetske indukcije o veličini magnetske indukcije kod histereze

Nakon određivanja svih gubitaka može se odrediti stupanj djelovanja (faktor korisnosti) električnog stroja, a određuje se iz omjera predane (P_2) i primljene snage (P_1), dakle

$$\eta = p_2/p_1. \tag{305}$$

Kod električnih strojeva obično se stupanj djelovanja (η) računa s jednom snagom koja se može električki mjeriti (P_1 kod motora, P_2 kod generatora) i gubicima koristeći jednadžbe (301 do 304), pa se može pisati za motore

$$\eta_m = 1 - P_g/p_1 \tag{306}$$

i za generatore

$$\eta_g = 1 - P_g/(P_2 + P_g). \tag{307}$$

Veoma često su kod strojeva poznate snage i stupnjevi djelovanja pa se gubici određuju prema slijedećim izrazima za

$$P_{g_M} = (1 - \eta)P_1 \tag{308}$$

za generatore:

$$P_{g_G} = \frac{1 - \eta}{\eta} P_2. \tag{309}$$

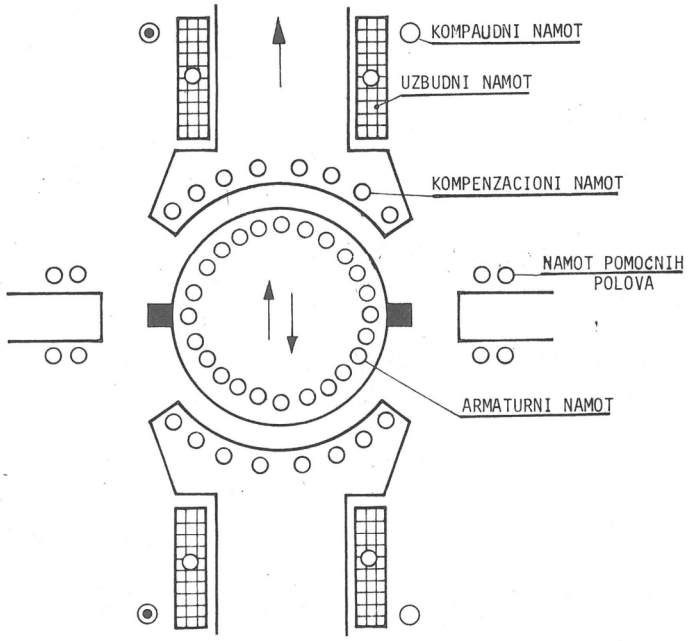
Veći stupanj djelovanja, odnosno manji gubici postižu se kod većih strojeva.

Energija koja se u električnom stroju utroši za pokrivanje svih navedenih gubitaka na kraju se pretvara u toplinu. Nastala toplina povisuje temperaturu stroju i prenosi se na okolinu i na sredstva za hlađenje. Najosjetljiviji dijelovi električnog stroja na povišenje temperature su izolacioni materijali, pa je zadatak konstruktora da se prigodnim konstruktivnim mjerama samog stroja i hlađenjem stroja održi temperatura namota i stroja ispod određene granice.

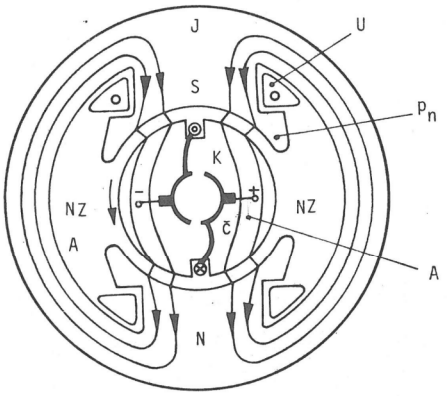
2.7.2. ISTOSMJERNI ELEKTRIČNI STROJEVI

Temeljna karakteristika istosmjernog stoja je, da mu magnetsko polje miruje, a vodiči armature ugrađeni su mu u rotor s kojim rotiraju. Magnetsko polje postiže se pomoću uzbudnog namota smještenog u polovima statora (sl. 102), dok se struja inducira u armaturnim namotima smještenim u utorima statora.

S obzirom na već kazano, da se u armaturnim vodičima inducira izmjenični napon, potrebno je, da bi se dobila istosmjerna struja, ugraditi jedan uski ispravljač, tzv. kolektor (sl. 103). Prema tome, zadatak je kolektora kod istosmjernih strojeva da induciranu izmjeničnu struju što teče u armaturnim vodičima pretvori u istosmjernu struju.

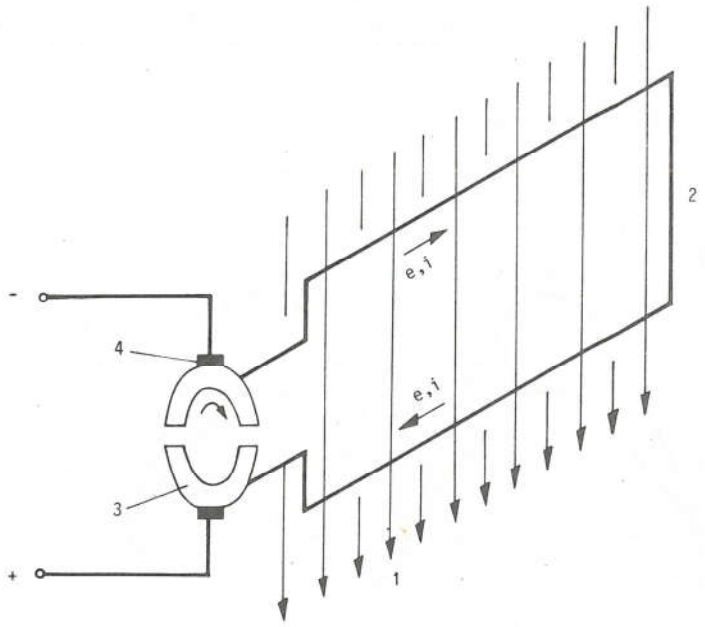


Sl. 102 Načelni raspored svih namota kod istosmjernog električnog stroja



Sl. 103 Shematski prikaz rada istosmjernog stroja J jaram, S N magentski polovi, p_n polni nastavci, U uzbudni namot, A armatura, K kolektor, Č četkice, NZ neutralna zona

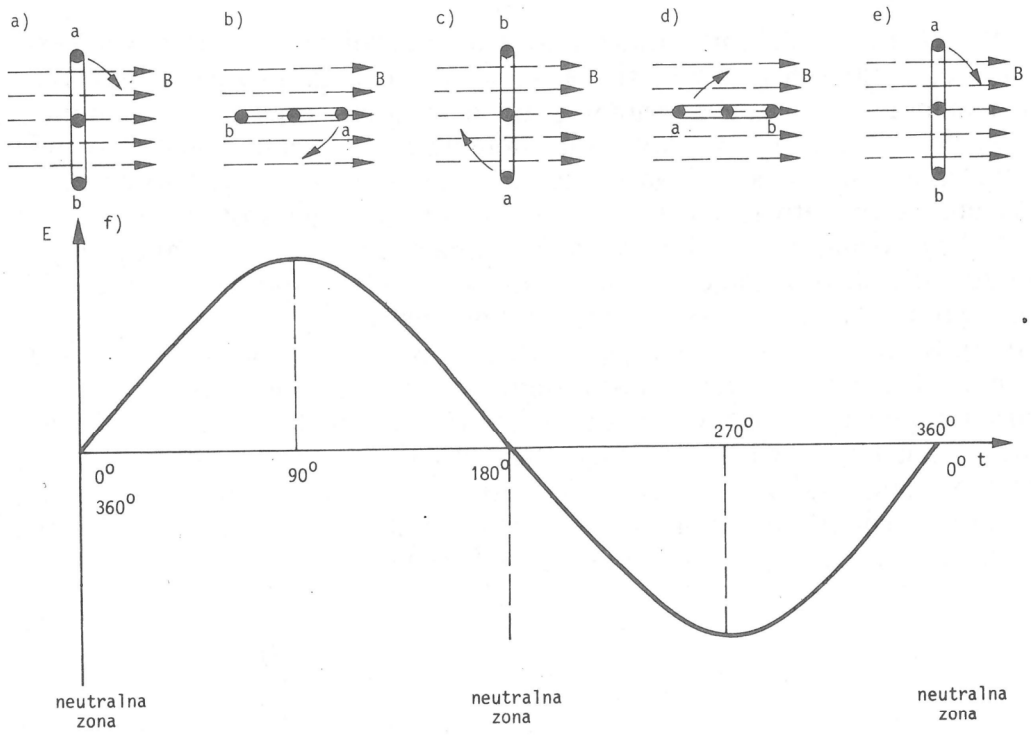
Princip rada kolektora prikazan je jednim zavojem na sl. 104. Magnetsko polje koje miruje, a vrtnjom ga zavoj siječe, te se u jednoj grani zavoja inducira napon i struja u jednom smjeru, a u drugoj grani u drugom smjeru. Promjenom položaja zavoja prema smjeru magnetskog polja mijenja se inducirani napon od nule, preko maksimuma do nule, nakon čega inducirani napon počinje mijenjati predznak i rasti do maksimalne (negativne ako je prva bila pozitivna) vrijednosti, te ponovo padati do nule (sl. 105). Armaturni zavoj na krajevima ima dvije lamele izolirane jednu od druge i od mase. Na kolektor naliježu četkice koje su izvodima spojene na plus (+) i minus (-) pol. Prema sl. 103. četkice leže u tzv. neutralnoj zoni (na simetrali među polovima). Kolektor je mehanički pričvršćen na rotor, a četkice na stator i za vrijeme vrtnje one kližu po kolektoru. Zahvaljujući ulozi kolektora (zajedno s četkicama) inducirani napon i struja neće prijeći (slijediti inducirane vrijednosti u armaturnom zavoju) u negativnu vrijednost zbog toga što se mijenja položaj grana svitka u magnetskom polju, tako da uvijek svaka četkica ima isti predznak napona. Radi toga će inducirane vrijednosti napona i struje imati oblik prikazan na sl. 106, koji se često naziva pulzirajući napon ili struja ali uvijek u istom smjeru.



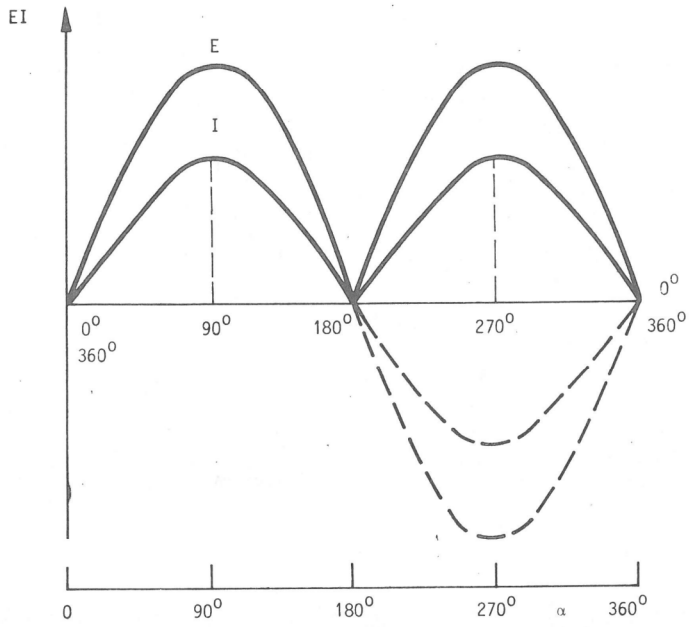
Sl. 104 Djelovanje kolektora: 1. Magnetsko polje (miruje), 2. razvoj namota armature (rotira), kolektor (rotira), 4 četkice (miruju)

Zbog različite jakosti magnetskog polja (rasipanje zbog različite vodljivosti magnetskih silnica) u praktičnoj primjeni inducirani naponi i struje neće imati pravilan oblik prikazan na slikama 105. i 106. nego će imati male deformacije. Osim toga pulzirajući oblik induciranih veličina prikazan na slici 107. može se smanjiti, gotovo eliminirati, postavljanjem više jednoliko raspoređenih armaturnih vodiča po obodu rotora pomaknutih jedan u odnosu na drugoga za mali električni kut i spojenih u seriju.

Na kolektoru se, dakle, vrši "prebacivanje" svitka u granu namota suprotnog polariteta upravo u trenutku kad svitak mijenja polaritet.

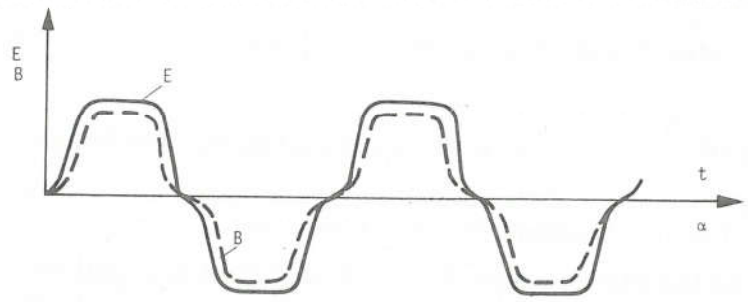


Sl. 105 Princip rada elementarnog generatora izmjenične struje



Sl. 106 Pulzirajuća struja i napon kroz otpor priključen na četkice elementarnoga istosmjernoga generatora

Istosmjerni strojevi obično imaju više pari polova (p), više vodiča (z) podjeljenih u paralelne grane namota (a) u kojima se inducira elektromotorna sila koja se pojavljuje na stezaljkama, a koja je ovisna o tim veličinama (p, z, a), magnetskom toku i brzini vrtnje.



Sl. 107. Inducirana elektromotorna sila (E) i prostorna raspodjela indukcije (B)

Elektromotorna sila koja se inducira kod istosmjernog stroja određuje se prema jednadžbi

$$E = P/a\, nz\Phi_{gl} = kn\Phi_{gl} \tag{310}$$

gdje je Φ_{gl} glavni magnetski tok koji inducira elektromotornu silu i n brzina vrtnje, te konstanta stroja $k = pz/a$.

Glavni magnetski tok kod istosmjernih strojeva ovisan je o površini kroz koju prolazi, a on prolazi kroz polove (maksimalna indukcija) i raspore (minimalna indukcija), te se radi toga računa sa srednjom vrijednošću indukcije B_{sr}

$$\Phi_{gl} = \tau_p l B_{sr} \tag{311}$$

gdje je τ_p polni korak, a l duljina vodiča.

Polni korak ovisan je o obodnoj brzini i iznosi:

$$\tau_p = v/2pn \tag{312}$$

a dobiva se iz jednadžbe za obodnu brzinu:

$$v = D\pi n = 2p\tau_p n. \tag{313}$$

Elektromotorna sila koja se inducira u jednom vodiču računa se prema jednadžbi:

$$E_1 = B_{sr} l \cdot v = B_{sr} \cdot l \cdot \tau_p \cdot 2pn = 2pn\Phi_{gl}. \tag{314}$$

Ukupna elektromotorna sila u cijelom namotu određuje se iz izraza

$$E = z/2a\, E_1 = p/a\, nz\, \Phi_{gl}. \tag{315}$$

Okretni moment koji nastaje kod istosmjernog stroja uvjetovan je silom (F) koja se inducira (uslijed narinutog napona) u vodičima smještenim na obodu rotora i razmakom među vodičima (D), dakle:

$$M = FD = BIlD. \tag{316}$$

Karakteristika momenta vrtnje je, da je uvijek istog smjera, a posljedica je kolektora koji u vodiču okrene smjer struje upravo u trenutku kad stiže magnetsko polje suprotnog smjera.

U slučaju električnog stroja sa z vodiča i a pari paralelnih grana jednadžba za moment glasi:

$$M = pz/2\pi a \; I_a \Phi_{gl} \tag{317}$$

Do gornje jednadžbe dođe se korištenjem jednadžbe (314) iz koje slijedi da je

$$lB_{sr} = 2p/D\pi \; \Phi_{gl} \tag{318}$$

te da je struja koja ulazi u stroj (Ia) 2a puta veća od struje kroz vodiče.

Svaki istosmjerni stroj može raditi i kao generator i kao motor, jer istosmjerni stroj u radu uvijek razvija i moment vrtnje i elektromotornu silu.

Kod rada električnog stroja pri konstantnoj brzini razvijeni moment i moment na osovini su praktički u ravnoteži, tako da su i narinuti napon i elektromotorna sila u ravnoteži, pa za generator vrijedi:

$$U = E - I_a R_a - \Delta U_c \tag{319}$$

a za motor

$$U = E + I_a R_a + \Delta U_c \tag{320}$$

U navedenim jednadžbama U je narinuti napon, E je elektromotorna sila, I_a je struja kroz vodiče, R_a su svi otpori koji se protive struji I_a, te DU_c pad napona na četkicama koji nastaje zbog prelaznih otpora na mjestima kontakta.

Koristeći jednadžbu (310) može se odrediti u stacionarnom stanju brzina vrtnje istosmjernog motora bez obzira na opterećenje, prema izrazu

$$n = 1/k \; E/\Phi_{gl} \tag{321}$$

Kod konstantnog napona (stacionarnog rada) inducirana elektromotorna sila računa se iz jednadžbe (320), pa glasi

$$E = U - I_a R_a - \Delta U_c \tag{322}$$

dok je glavni magnetski tok (Φ_{gl}) određen prema jednadžbi (311).

Nakon navedenoga može se utvrditi da se pri određenom magnetskom toku, istosmjerni stroj mora vrtjeti takvom brzinom da se inducira elektromotorna sila određena naponom mreže i gubicima (padovima napona) uvjetovanih proticanjem struje, dakle:

$$n = (U - I_a \cdot R_a - \Delta U_c)/k\Phi_{gl} \cdot \tag{323}$$

Broj okretaja (brzina vrtnje) istosmjernog motora u prvom redu ovisan je o narinutom naponu i o magnetskom polju. Dakle, regulacija brzine vrtnje može se postići promjenom narinutog napona (regulacija naponom) ili promjenom uzbude odnosno promjenom magnetskog polja (regulacija poljem). Jedno od osnovnih pozitivinih obilježja istosmjernih motora (u odnosu na jeftinije izmjenične motore) je relativno jednostavna i efikasna regulacija brzine vrtnje.

Kad se optereti istosmjerni stroj kroz namote njegove armature poteče struja. Ta struja svojim protjecajem stvara magnetsko polje (dodatno) kojeg nije bilo dok je istosmjerni stroj bio u praznom hodu. Novonastalo magnetsko polje stvara s postojećim (uzbudnim) magnetskim poljem zajedničko magnetsko polje. Dakle, promjenom tereta mijenja se struja kroz armaturu, a time i magnetsko polje po iznosu, po smjeru i po gustoći. Takve promjene izazivaju čitav niz fizikalnih promjena kod rada istosmjernog stroja. Cijela ta pojava sa svim posljedicama naziva se reakcijom armature.

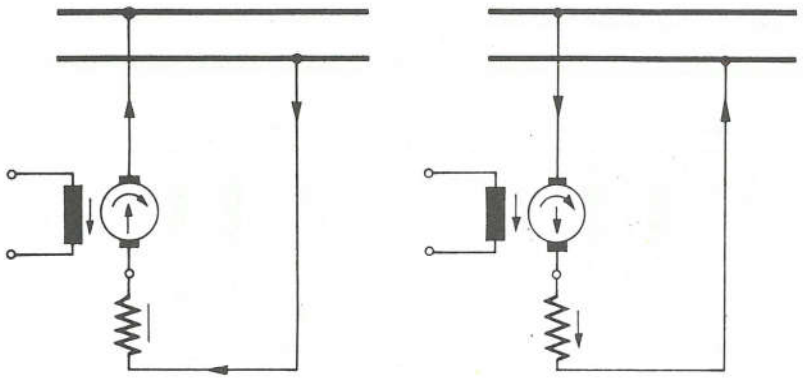
Tri su osnovne negativnosti kod istosmjernih strojeva kojima se uzrokom javlja

reakcija armature. Uslijed smanjenja glavnog toka smanjuje se elektromotorna sila, smanjuje se iskorištenje stroja i gubi dio pogonskih osobina (povećanje gubitaka u željezu, pojava iskrenja među lamelama, pomak neutralne zone itd.).

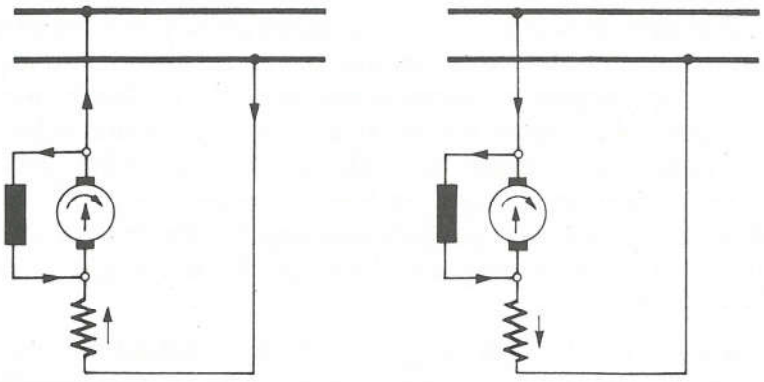
Navedene smetnje su to veće što je istosmjerni stroj veći, pa se za ograničavanje utjecaja reakcije armature (sl. 102) upotrebljava kompaudni namot (poboljšava protjecanje uzbudnog namota), kompenzacioni namot (vodiči u utorima glavnog pola sa strujom smjera suprotnog struji armature) i pomoćni polovi (suzbija reakciju armature u međupolnom prostoru).

S obzirom na vrstu uzbude istosmjerni električni strojevi dijele se na: nezavisno uzbuđene, posredno uzbuđene, serijski uzbuđene i kompaudno uzbuđene.

Nezavisno uzbuđeni električni strojevi imaju uzbudni namot priključen na vanjski izvor napona koji je potpuno neovisan o zbivanjima u stroju. Na sl. 108. prikazana je shema istosmjernog generatora (slika a) i istosmjernog motora (slika b) s nezavisnom uzbudom. Karakteristika nezavisno uzbuđenog generatora je u tome što struja armature smanjuje induciranu elektromotornu silu i pravi gubitke uspora u otporu armature i na četkicama. Kod nezavisno uzbuđenog istosmjernog motora s porastom momenta brzina vrtnje blago opada.

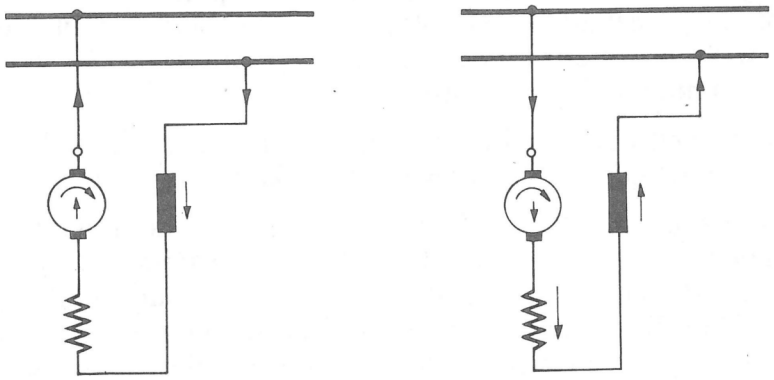


Sl. 108. Sheme spoja nezavisno uzbudjenih istosmjernih električnih strojeva: a - generatora, b - motora

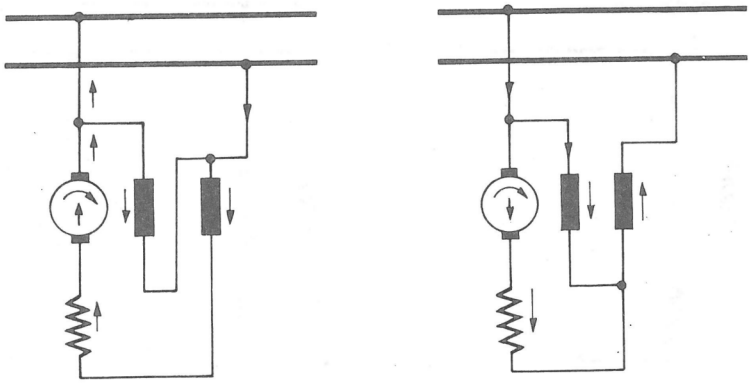


Sl. 109. Shema spoja poredno uzbudjenog istosmjernog stroja a - generator, b - motor

Posredno uzbuđeni istosmjerni strojevi (sl. 109a - generator, b - motor) veoma su slični nezavisno uzbuđenim strojevima, s tom razlikom da je nešto veći pad napona kod generatora (zbog smanjenja uzbudne struje, a kod motora nema nikakve razlike).



Sl. 110 Shema spoja serijski uzbudjenog stroja
a-generatora, b - motora



Sl. 111 Shema spoja kompandnog istosmjernog stroja
a-generator, b-motor

Shema serijski uzbuđenog istosmjernog generatora i motora prikazana je na sl. 110. (a-generator, b-motor). Iz same sheme može se zaključiti, ako je generator neopterećen, da ne daje napon na stezaljkama jer mu je struja armature a time i struja uzbude jednaka nuli. Napon mu je, prema tome, veoma ovisan o struji pa je serijski uzbuđeni generator veoma neprikladan za upotrebu. Kod istosmjernog serijskog motora pri većim opterećenjima stroja nastupa zasićenje, pa brzina vrtnje naglo opada. Još se veći problem pojavljuje kod malih opterećenja. Naime, kod malih opterećenja, malene su struje i magnetski tok, pa brzina naglo raste, što se može zaključiti prema jednadžbi (321).

Kompaudni stroj (sl. 111) ili stroj sa složenom uzbudom istovremeno radi s porednom i serijskom uzbudom na glavnim polovima. Kombinacijom ovih dviju uzbuda (njihovim odnosima) mogu se dobiti bolje karakteristike istosmjernih strojeva, a one se postižu uzimajući prednosti pojedinih uzbuda.

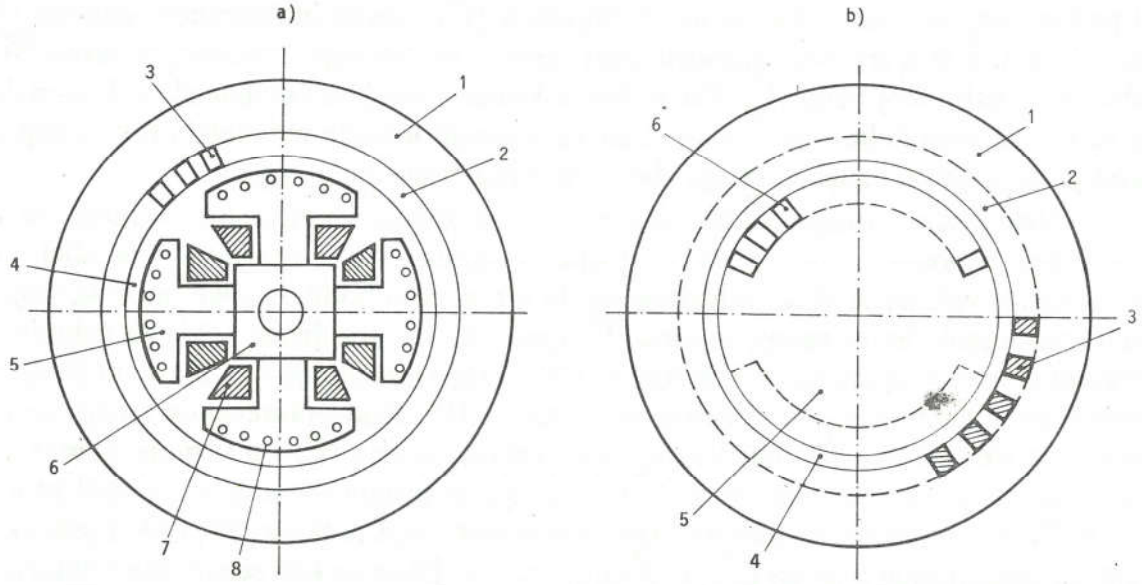
2.7.3. IZMJENIČNI ELEKTRIČNI SINHRONI STROJEVI

Osnovna podjela izmjeničnih električnih strojeva je na sinhrone i asinhrone strojeve. U sinhronom stroju magnetsko polje rotira, a vodiči armature ugrađeni su u statoru. Magnetsko polje nastaje uslijed istosmjerne struje kojom se napaja uzbudni namot (smješten u rotoru), a dovodi se u vrtnju mehaničkom rotacijom rotora. Inducirane struje u armaturi statora stvaraju okretno magnetsko polje koje ima istu brzinu vrtnje kao i polje rotora. Prema tome rotor sinhrono rotira s okretnim poljem statora, a u ovisnosti od položaja magnetskih polja jednog prema drugom razvijaju se sile i zakretni moment. U slučaju poklapanja smjerova magnetskih polja nema pojave zakretnog momenta (nema pretvorbe energije), pa se radi toga mora upotrijebiti vanjski moment pomoću kojega dolazi do pomaka među magnetskim poljima, znači do pojave zakretnog momenta. Ako je taj vanjski moment nastao djelovanjem mehaničke energije na rotor sinhronog stroja, u tom slučaju se govori o sinhronom generatoru koji proizvodi električnu energiju, a kad vanjski moment djeluje u suprotnom smjeru od smjera vrtnje (uzimanjem električne energije iz mreže) u tom slučaju sinhroni stroj radi kao motor.

Sinhroni strojevi mnogo češće se upotrebljavaju kao generatori od najmanjih do najvećih snaga, a rjeđe kao sinhroni motori (obično većih snaga). Prema konstrukciji rotora sinhroni strojevi obično se izvode kao stroj sa okruglim rotorom ili kao stroj s istaknutim polovima (sl. 112). Za sve sinhrone strojeve vrijedi osnovna jednadžba $f = np/60$ iz koje slijedi, da određeni stroj s brojem pari polova p i određene frekvencije f, treba tjerati određenom sinhronom brzinom (n).

Obično je izvedba sinhronih strojeva trofazna, a rjeđe jednofazna.

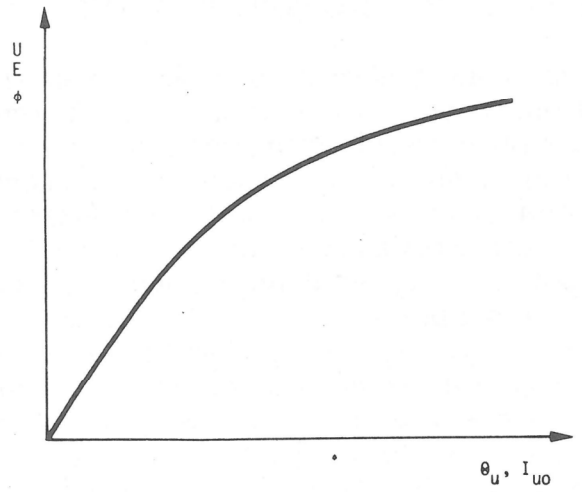
Za pretvorbu mehaničke u električnu energiju danas se upotrebljavaju gotovo isključivo trofazni sinhroni generatori frekvencije 50 Hz (u SAD 60 Hz).



Sl. 112.

a) Sinhroni stroj s istaknutim polovima. 1-jaram, 2-zona zubova, 3-armaturni namot, 4-zračni raspor, 5-pol, 6-jaram rotora, 7-uzbudni namot, 8-prigušni namot

b) Sinhroni stroj s okruglim rotorom. 1-jaram statora, 2-zona zubova i utora, 3-armaturni namot, 4-zračni raspor, 5-jaram rotora, 6-uzbudni namot



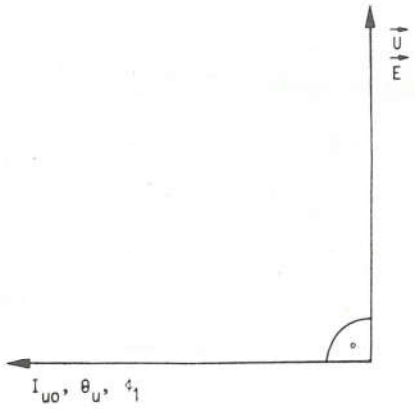
Sl. 113. Karakteristika praznog hoda sinhronog stroja

Temeljna karakteristika sinhronih strojeva je, da razmak ma koga vodiča jedne faze i odgovarajućeg vodiča iduće faze iznosi uvijek 120 električkih ili 120/p geometrijskih stupnjeva. Osim toga od sinhronih strojeva zahtjeva se da im elektromotorna sila (EM_s) bude sinusoidna, a to znači da konstrukcija polova treba biti takova da se magnetska indukcija (B) u prostoru između polnih nastavka i armature mijenja uzduž područja svakog para polova po zakonu sinusa. Isto tako je važno znati da kod trofaznih strojeva postoji fazni i linijski napon, koji je za 3 puta veći od faznog napona.

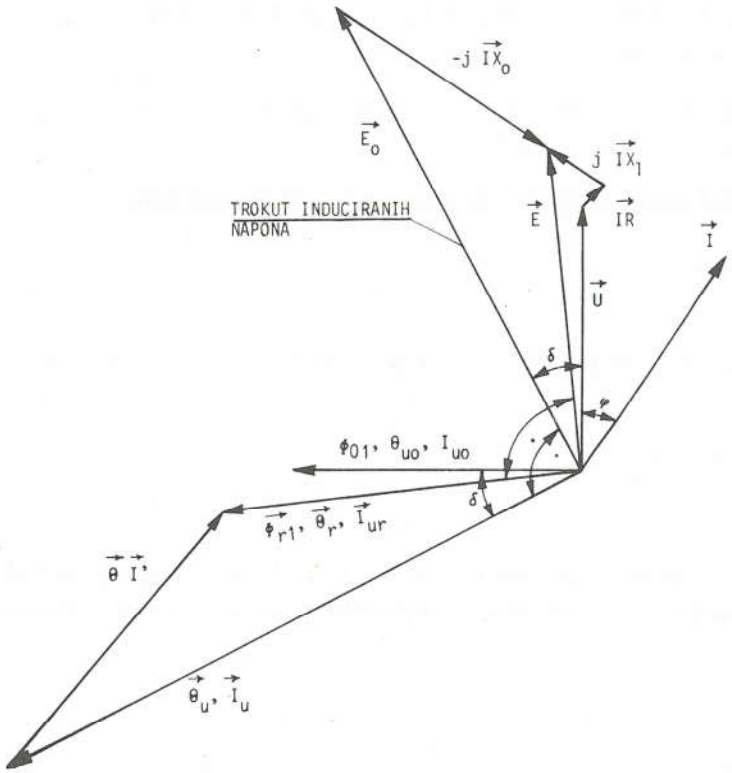
Karakteristika praznog hoda sinhronog generatora (sl. 113) prikazuje ovisnost napona stezaljki N o uzbudnoj struji I_u pri stalnoj brzini vrtnje, $N = f(I_u)$. Pri praznom hodu statorski je namot otvoren, pa u njemu ne teku struje. Čim ne teku struje nema ni padova napona, pa je napon na stezaljkama ($\vec{U}$) jednak induciranom naponu ($\vec{E}$) magnetski tok Φ u zračnom rasporu ovisi samo o protjecanju uzbudnog namota ($\vec{\Theta}_n$), odnosno o uzbudnoj struji ($\vec{I}_n$). Pri malim uzbudnim strujama magnetski tok je malen pa je i zasićenost željeza neznatna, a za veće stanje uzbude magnetski tok (i napon) raste polaganije od uzbudne struje zbog sve većeg zasićenja u željezu.

Vektorskim dijagramima obično se prikazuju međusobni odnosi među pojedinim naponima i strujama u stroju, a samim tim i snagama. Na slici 114. prikazana je vektorska slika sinhronog stroja u praznom hodu. Iz slike može se vidjeti, da je zaostajanje induciranog napona ($\vec{E}$) i napona na stezaljkama ($\vec{U}$) za uzbudnom strujom ($\vec{I}_u$) odnosno magnetskim tokom ($\vec{\Phi}$) upravo 90 stupnjeva. Vektorski dijagram opterećenog sinhronog stroja prikazan je na sl. 115. Kod opterećenog stroja postoji napon na stezaljkama ($\vec{U}$) različit od induciranog napona ($\vec{E}$) i u faznom pomaku za kut β, te struja za armaturu iznosa $\vec{I}$ u zaostajanju prema naponu na stezaljkama za kut γ. Ta struja stvara u radnom otporu armature pad napona ($\vec{IR}$ i $\vec{IX}_1$) jednak je vektoru induciranog napona ($\vec{E}$). Inducirani napon javlja se kao rezultanta unutarnjeg induciranog napona u rotoru ($\vec{E}_o$) i induciranog pada napona u armaturi ($\vec{IX}_a$). Kut između unutarnjeg napona rotora ($\vec{E}_o$) i napona stezaljki ($\vec{U}$) zove se kut opterećenja (δ).

Značenje navedenih veličina najbolje se može vidjeti iz nadomjesne sheme



Sl. 114. Vektorska slika sinhronog stroja pri praznom hodu

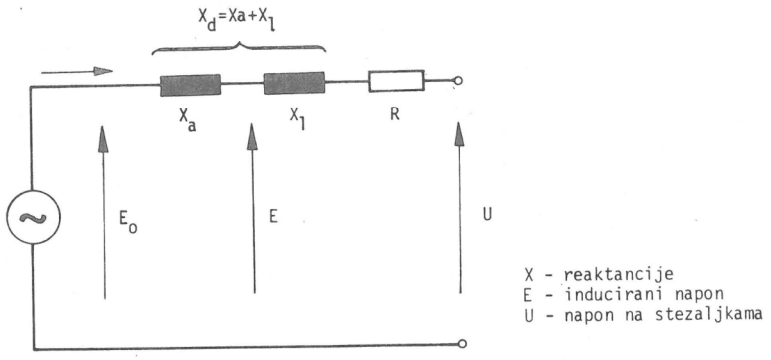


Sl. 115. Vektorski dijagram opterećenog sinhronog stroja s okruglim rotorom

sinhronog stroja (sl. 116). U toj shemi R je omski otpor namota statora, X_1 je rasipna reaktancija, a X_a je reaktancija armature. Zbroj tih dviju reaktancija čini sinhronu reaktanciju.

$$X_d = X_1 + X_a \tag{324}$$

Elektromagnetski zakretni moment u sinhronom stroju nastaje međusobnim djelovanjem magnetskog polja i struja koje teku vodičima. Ovaj je moment u ustaljenom pogonu suprotan vanjskom momentu kojim na osovinu električnog stroja



Sl. 116. Nadomjesna shema sinhronog stroja s okruglim rotorom

djeluje pogonski stroj. U radu sinhronog generatora elektroenergetski moment djeluje kao protumoment, suprotno brzini vrtnje koja ima smjer pogonskog zakretnog momenta pogonskog stroja.

Međutim, u radu sinhronog motora elektromagnetski moment pokreće osovinu, a opire mu se moment radnog stroja.

Nazivna snaga sinhronog stroja računa se prema izrazu:

$$P = \sqrt{3}\ NI \tag{325}$$

gdje su N i I vrijednosti linijskog nazivnog napona odnosno nazivne struje, ili prema izrazu:

$$P = \sqrt{P_r^2 + Q^2} \tag{326}$$

gdje je P_r aktivna snaga generatora, a Q reaktivna snaga generatora. Aktivna i reaktivna snaga mogu se odrediti iz prividne snage i kuta zaostajanja struje za naponom, dakle:

$$P_r = P \cos \varphi \tag{327}$$

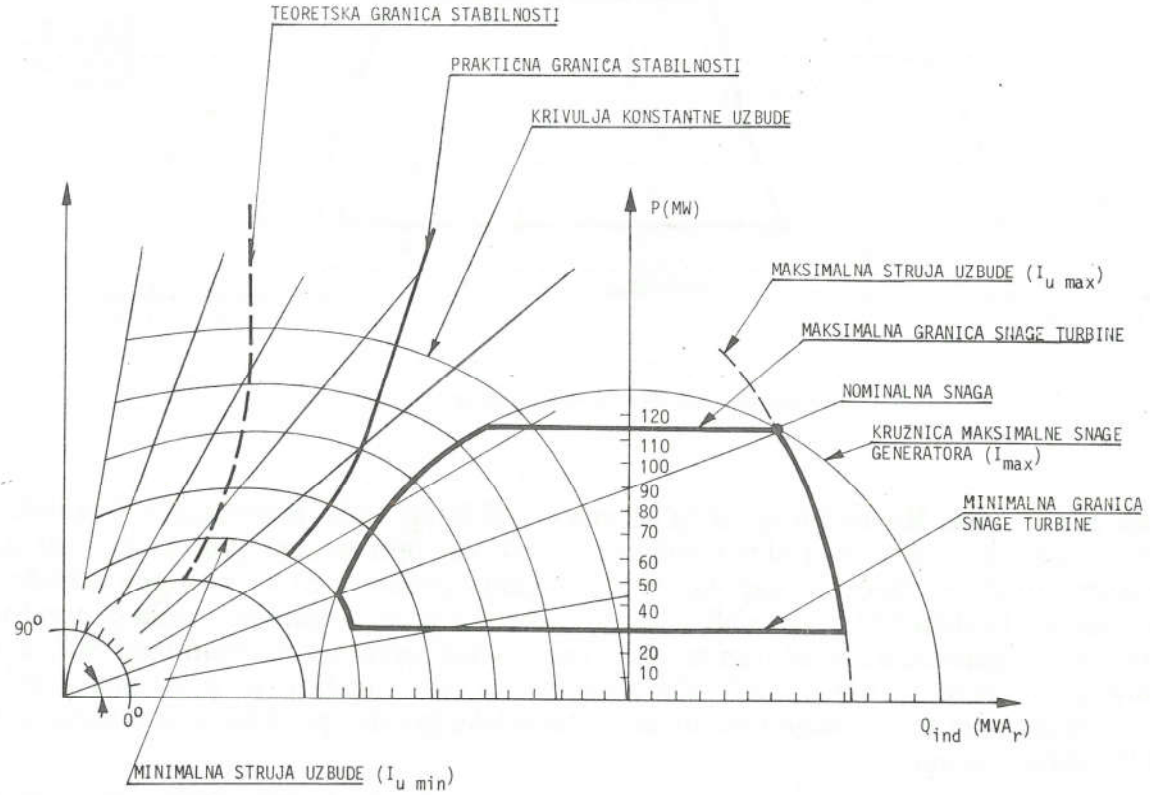
$$Q = P \sin \varphi. \tag{328}$$

U pogonu sinhronog generatora koji radi na mrežu postavlja se niz ograničenja radi sigurnosti i pogona i samog generatora i to:

- Struja armaturnog namota (I) ne smije biti veća od iznosa kod kojega dolazi do pregrijavanja.
- Za struju u uzbudnom namotu (I_u) vrijedi isto kao za struju u armaturnom namotu.
- Opterećenje turbina ne smije preći dozvoljeni najveći iznos koji je određen maksimalnom aktivnom snagom odnosno sa cos φ generatora.
- Opterećenje turbine ne smije biti ni manje od nekog opterećenja zbog održavanja stabilnog rada generatora (održavanja kuta opterećenja).
- Uzbudna struja ne smije biti manja od nekog minimalnog iznosa, što se u praksi postiže automatskom regulacijom uzbudne struje.

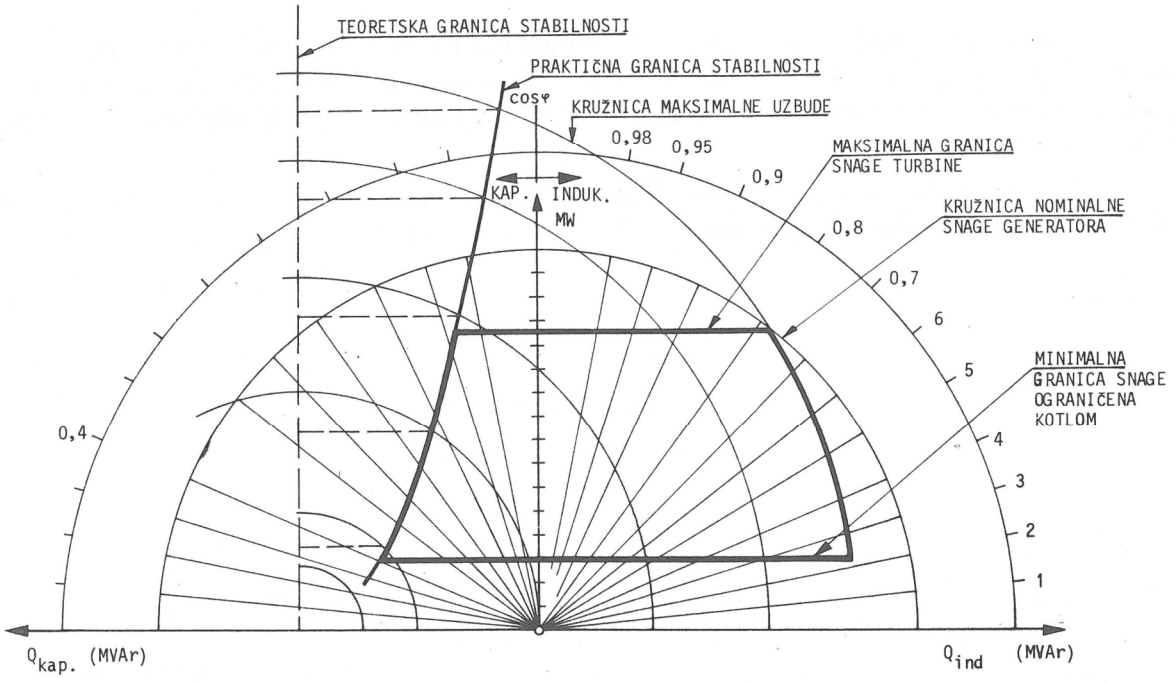
Navedena ograničenja najbolje se mogu uočiti na pogonskoj karti generatora. Konstrukcija pogonske karte dobiva se iz vektorske slike napona dijeljenjem svih njezinih reaktora napona s jX_d (j je oznaka za imaginarni broj u kompleksnom broju, a X_d uzdužna reaktanca stroja).

Na slici 117. prikazana je pogonska karta generatora s isturenim polovima, a na slici 118. pogonska karta generatora s okruglim rotorom.



Sl. 117. Pogonska karta generatora s isturenim polovima

U desnom kvadrantu nalazi se induktivno, a u lijevom kvadrantu kapacitivno područje rada. Osnovno ograničenje rada generatora proizlazi iz same maksimalne snage generatora (kružnica maksimalne snage). Slijedeće ograničenje proističe iz maksimalno i minimalno dozvoljene struje uzbude. S obzirom na to, da su generatori pokretani turbinom, proizlaze i ograničenja uvjetovana samom turbinom: maksimalnom i minimalnom snagom. Naime, maksimalna snaga turbine odabrana je za instaliranu radnu snagu generatora ($P_{r\ max}$), a minimalna snaga uvjetovana problemima rada turbine (kod vodnih turbina slab stupanj djelovanja, problem vibracija, problem kavitacije itd. Kod parnih turbina može se dogoditi da je minimalna snaga turbine manja od tehničkog minimuma kotla, pa je u tom slučaju kotao mjerodavan za pogon generatora. Ograničenja zbog dozvoljene uzbudne struje nalaze se na kružnici s ishodištem u koordinantnom sistemu za uzbudnu struju, za turbogeneratore, a na krivuljama vrlo bliskim kružnicama za generatore s isturenim polovima. Ograničenja maksimalne i minimalne radne snage su paralelni pravci s osi apscisa s ordinatama: $P_{r\ max} = P_{r\ cos\varphi}$, odnosno $P_{r\ min}$ (ovisan o pogonskom tehničkom minimumu). Osim navedenih ograničenja postoje još ograničenja vezana za stabilan



Sl. 118. Pogonska karta generatora s okruglim polovima

rad generatora. Razlikuju se dvije granice stabilnog rada generatora: teoretska i praktična. Generator će raditi stabilno sve dok kut opterećenja (kut kojega zatvara vektor uzbude s vektorom napona na stezaljkama generatora) ne postigne određenu vrijednost. Iz slika 117. i 118. vidi se da se teoretska granica stabilnog rada generatora postiže za generatore s isturenim polovima za kut opterećenja manji od 90°, a za turbogeneratore za kut od 90°. Zbog sigurnosti rada odabire se praktična granica stabilnosti, koja se određuje tako da se do teoretske granice predvidi uvijek rezerva od 10% aktivne snage.

Prekoračenjem dozvoljene granice (kuta opterećenja) dolazi do ispada generatora iz koraka.

Djelovanje svih ovih ograničenja prikazano je na pogonskim kartama na slikama 117. i 118. Radna točka generatora mora uvijek ležati na karti unutar označenog (debljim linijama izražene granice) dopuštenog područja rada. U nekim slučajevima, u ovisnosti o karakteristikama generatora i pogonskog stroja ili kotla, te zahtjeva pogona, pojedina od navedenih ograničenja ne moraju doći do izražaja.

Sinhroni motori primjenjuju se za pogone s konstantnom brzinom vrtnje.

Kompenzatori su specijalni sinhroni strojevi koji ne pretvaraju jedan oblik energije u drugi (mehaničku u električnu) nego služe za opskrbu elektroenergetskog sistema jalovom energijom.

Svi veći električni strojevi pa tako i sinhroni imaju uređaje za hlađenje različitih tehničkih i tehnoloških rješenja.

2.7.4. ASINHRONI ELEKTRIČNI STROJEVI

Dok je sinhroni generator, tipični predstavnik električnog stroja velike snage, koji se gradi pojedinačno ili u manjim serijama, asinhroni motor je tipični predstavnik

električnog stroja male snage, koji se pretežno gradi u velikim serijama. Stator asinhronog stroja je u principu isti kao stator sinhronog. Obično je trofazni, a iznimno jednofazni. Rotori asinhronih motora danas se obično grade kao kratko spojeni (kavezni rotori).

Priključi li se stator asinhronog motora na mrežu poteći će struja magnetiziranja i uzbuditi rotaciono polje koje će u svakoj fazi rotora inducirati elektromotornu silu E.

Inducirana elektromotorna sila protjerat će struju I koja će po Biot-Savart-om zakonu, zajedno s okretnim magnetskim poljem (Φ) stvoriti okretni moment

$$M = k\, I\, \Phi \cos\varphi \tag{329}$$

gdje je φ kut između okretnog toka i struje.

Pod utjecajem momenta rotor će se početi okretati i brzina vrtnje će rasti prema sinhronoj brzini odnosno brzini okretnog polja. Zaostajanje rotora za okretnim poljem naziva se klizanjem asinhronog stroja (s).

Okretni moment motora mijenja se s radnom komponentom struje i motor će se ubrzavati pri određenom klizanju (s) sve dok se ne izjednače momenti tereta s momentom motora. Kad motor nema tereta (prazni hod) on mora savladavati moment uvjetovan mehaničkim gubicima. Za savladavanje toga momenta potrebna je mala struja, mala elektromotorna sila i veoma malo klizanje (s_o), pa radi toga asinhroni motor ne može bez vanjske pomoći postići sinhronu brzinu, radi čega je dobio i ime asinhroni motor.

Snaga okretnog magnetskog polja koja se sa statora prenosi na rotor dijeli se na električnu (P_{el} - ustvari gubici Joulove topline u rotorskom namotu) i mehaničku (P_{meh} - snaga na osovini rotora). Omjer električne i mehaničke snage izgleda

$$P_{el}/P_{meh} = s/(1-s)\,. \tag{330}$$

S obzirom na činjenicu da je

$$P_{okr} = P_{el} + P_{meh} \tag{331}$$

slijedi da je:

$$P_{el} = s\, P_{okr} \tag{332}$$

$$P_{meh} = (1-s)\, P_{okr}\,. \tag{333}$$

Bilanca korištenja električne snage koju asinhroni motor uzima iz mreže prikazana je na sl. 119. Pored snage na osovini rotora asinhronog motora snaga uzeta iz mreže koristi se za pokrivanje gubitaka u statoru i rotoru (gubici u željezu i gubici u bakru), za pokrivanje mehaničkih gubitaka (trenje i ventilacija).

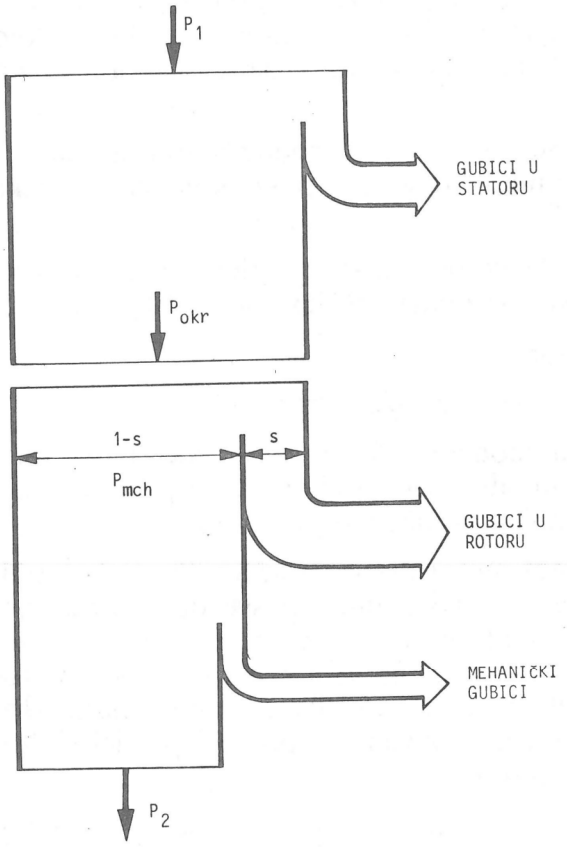
Snaga koju asinhroni motor uzima iz mreže elektroenergetskog sistema veća je od snage okretnog magnetskog polja ($P > P_{ok}$) za gubitke u armaturi i željezu statora, pa slijedi

$$P = P_{ok} + P_{cu} + P_{Fe} \tag{334}$$

odnosno

$$P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos\varphi_1 \tag{335}$$

gdje je m_1 broj faza, U_1 fazni napon, I_1 fazna struja koju stroj uzima iz mreže i φ_1 kut između faznih napona i struje.



Sl. 119. Shematski prikaz električne snage asinhronog motora

Jedna od temeljnih karakteristika asinhronih motora je "Karakteristika momenta". Okretni moment je u funkciji brzine vrtnje ili klizanja, što se može pisati

$$M = f(n) = f(s) . \tag{336}$$

Ako se moment izrazi pomoću snage na osovini motora (P_{meh}) i obodne brzine, dobiva se

$$M = P_{meh}/\omega . \tag{337}$$

Uvodeći vrijednosti za P_{meh} i za kutnu brzinu okretnog polja

$$\omega_s = 2\pi n_s \tag{338}$$

može se pokazati da je moment asinhronog motora, uz zadane otpore (radni i induktivni), ovisan o klizanju motora (s), odnosno o njegovoj brzini vrtnje (n), koja je funkcija klizanja (sl. 120).

Maksimalni moment koji se ostvaruje naziva se "pokretnim momentom". S porastom opterećenja opada brzina vrtnje. Moment raste do maksimalne vrijednosti (pokretne točke), zatim pada i motor se zaustavlja. Klizanje koje odgovara pokretnom momentu jednako je omjeru radnog i induktivnog otpora rotora, dakle:

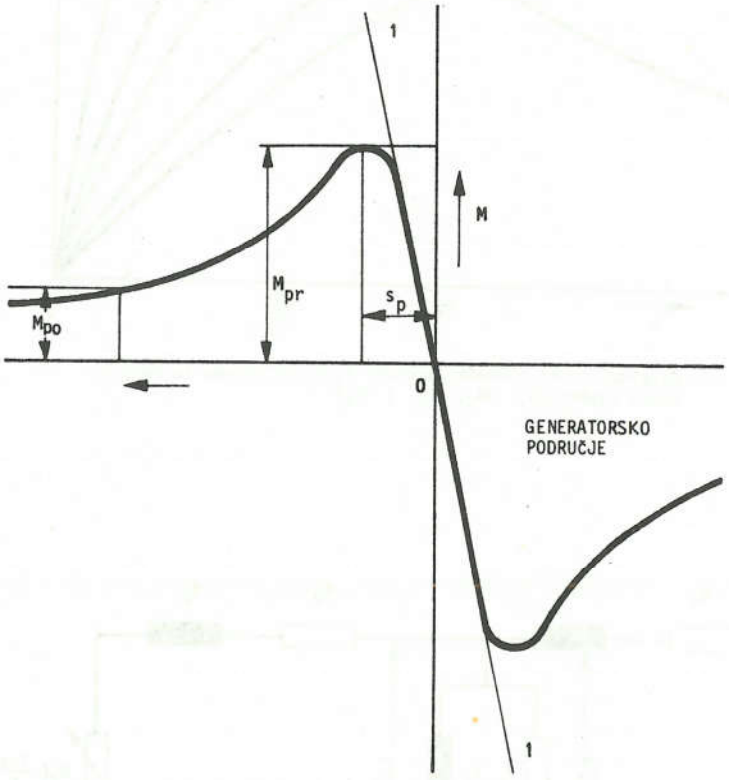
$$s_{pr} = \pm R_2/X_2 . \tag{339}$$

Ovisnost prekretnog momenta o momentu dobiva se iz jednadžbe:

$$M_{pr} = M/2 \ (s/s_{pr} + s_{pr}/s) \tag{340}$$

Navedeni izraz poznat je pod nazivom Kloss-ova jednadžba u pojednostavljenom obliku.

Koristeći navedene jednadžbe lako se može pokazati da je prekretni moment, uz konstantan napon, ovisan samo o induktivnom otporu (sl. 120). Veći prekretni moment imat će onaj motor koji će imati manji rasipni induktivni otpor.



Sl. 120. Ovisnost momenta asinhronog motora o klizanju

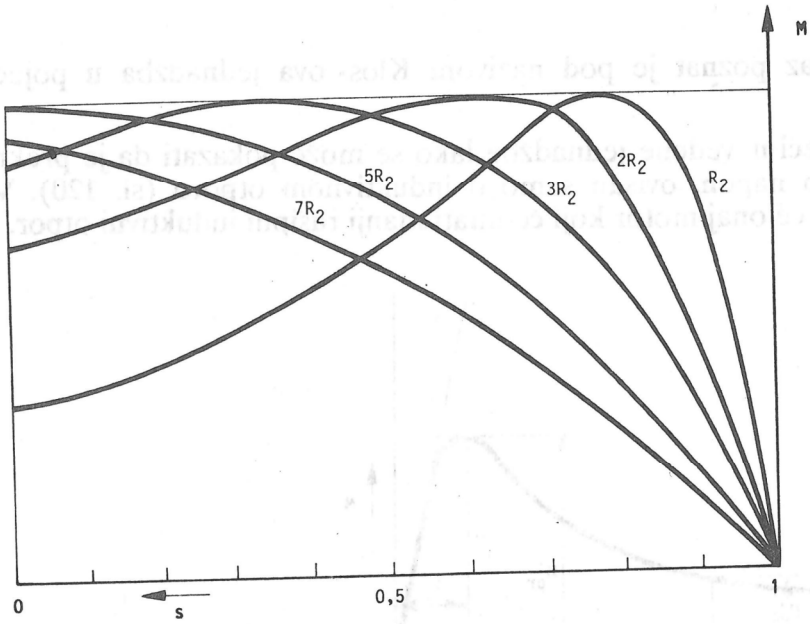
$$M_p = M_{pr} \frac{2R_2X_2}{R_2^2 + X_2^2} \qquad (341)$$

Za prosuđivanje pogonskih osobina motora važan je još i potezni moment (M_p), a on se dobiva za vrijednost s = 1 pa je:

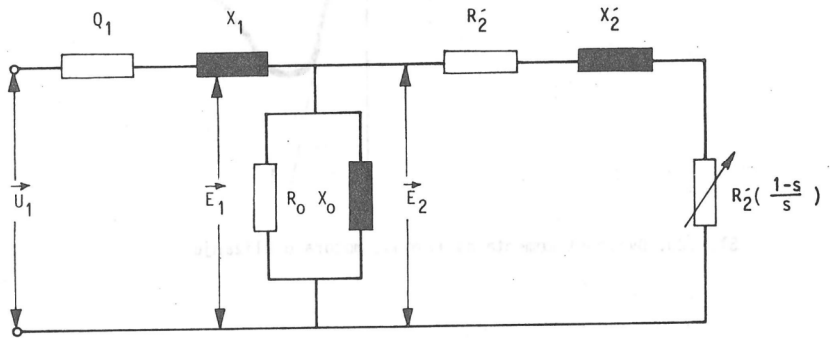
Za vrijednost $R_2 = X_2$ dobiva se najveći potezni moment koji je jednak prekretnom momentu. Što je manji radni otpor (R_2) u odnosu na induktivni otpor (X_2), to manji je pokretni moment.

Na slici 121. prikazane su karakteristike momenta za motor s omjerom radnog i induktivnog otpora 0.2, te s dodavanjem dodatnog radnog otpora tako da se otpor rotorskog kruga poveća na $2R_2$, $3R_2$, $5R_2$ i $7R_2$.

Kružni dijagram omogućava utvrđivanje pogonskih veličina asinhronog motora pri različitim opterećenjima. Budući da su u dijagramu vektorske električne veličine iste frekvencije, to će se vektorski dijagram moći načiniti tek nakon prikazivanja ekvivalentne sheme asinhronog motora (slika 122).



Sl. 121. Karakteristike momenta za omjer R_2/X_x=02 kojemu se dodaje radni otpor ($2R_2$, $3R_2$, $5R_2$ i $7R_2$)



Sl. 122. Ekvivalentna shema asinhronog motora

Asinhroni je stroj u biti transformator, pa za njega vrijedi ekvivalentna shema transformatora, uz uvjet, da rotor miruje. Iz teorije transofrmatora poznato je da se sve sekundarne veličine moraju reducirati (preračunati) na primarnu stranu. Reduciranje na primarnu stranu provodi se tako, da se sekundarne veličine preračunavaju na jedan fiktivan namot, koji ima isti broj zavoja kao i primarni namot. Međutim, kod asinhronog stroja osim broja zavoja mora se voditi računa o broju faza i broju utora, pa se sekundarne veličine preračunavaju na namot koji sve te vrijednosti jednake primarnom namotu. Iz navedenog slijedi da reducirana sekundarna elektromotorna sila mora biti jednaka primarnoj elektromotornoj sili

$$E_{20}' = E_1 . \qquad (342)$$

Budući da se u primarnom namotu po fazi inducira elektromotorna sila prema izrazu:

$$E_1 = k\, w_1 \xi_1 \tag{343}$$

a u nepomičnom rotoru

$$E_{20} = k\, w_2 \xi_2 \tag{344}$$

dolazi se do zaključka, da će reducirana elektromotorna sila biti jednaka

$$E_{20}' = w_1 \xi_1 / w_2 \xi_2 \; E_{20} \tag{345}$$

Polazeći od uvjeta da računski i stvarni gubici uslijed omskih otpora moraju biti isti, dolazi se do slijèdeće jednadžbe:

$$R_2' = (w_1 \xi_1 / w_2 \xi_2)^2 R_2 m_1 / m_2 \tag{346}$$

te da mora biti

$$x_2'/R_2' = x_2/R_2 \tag{347}$$

dobiva se

$$x_2' = x_2 m_1/m_2 \, (w_1 \xi_1 / w_2 \xi_2)^2 \tag{348}$$

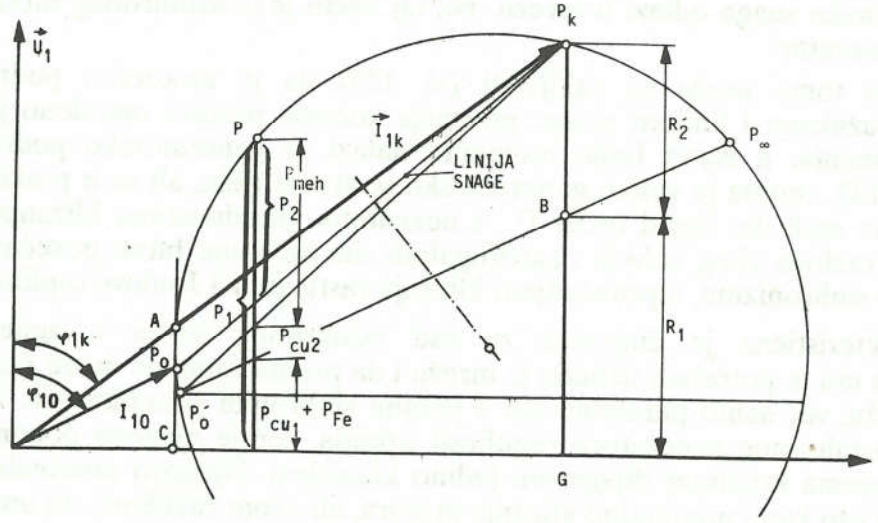
U navedenim jednadžbama w_1 i w_2 su brojevi zavoja primarnog i sekundarnog kruga, dok su ξ_1 i ξ_2 faktori namota primarnog i sekundarnog kruga, a m_1 i m_2 broj faza na primarnoj i sekundarnoj stazi.

Zbog klizanja asinhronog motora potrebno je u ekvivalentnoj shemi dodati fiktivni otpor R_{2f} koji je:

$$R_{2f} = R_2(1-s)/s \tag{349}$$

I fiktivni otpor potrebno je preračunati na primarnu stranu na isti način kao i ostale otpore.

Kružni dijagram asinhronog motora (sl. 123) može se konstruirati s pomoću podataka dobivenih pri pokusima praznog hoda i kratkog spoja. Izmjerene veličine struja praznog hoda $\vec{I}_{10}$ i kratkog spoja $\vec{I}_{1k}$ čine s narinutim naponom $\vec{U}_1$ kutova φ_{10} odnosno φ_{1k}. Vektori struja $\vec{I}_{10}$ i $\vec{I}_{1K}$ završavaju u točkama P_o i P_k koje leže na kružnici.



Sl. 123. Kružni dijagram asinhronog motora

Kad ne bi bilo mehaničkih gubitaka kod asinhronog motora točka P_o bila bi u točki P_{o1} (s=o). Zbog postojanja mehaničkih gubitaka potrebna je mala rotorska struja I_{20}, a njenim postojanjem postoji i odgovarajuće klizanje. Zbog nemogućnosti da asinhroni motor u praznom hodu postigne sinhronizam mora se na kružnici točka P_o nalaziti iznad točke P_{o1}.

Središte kružnice S mora ležati na simetrali dužine koja spaja točke P_o i P_k, jer kako je navedeno one obe leže na kružnici. Ordinata točke P_k predstavlja u izvjesnom mjerilu i gubitke u bakru rotora i statora svedene na porimarnu stranu. Ako se ta ordinata podjeli u omjeru gubitaka dobiva se točka B (sl. 123) kroz koju prolazi linija momenta. Točka iz koje polazi linija momenta je P_{o1}.Naime, struja praznog hoda $\vec{I}_{o1}$, koja bi bila u primarnom krugu je P_{o1}. Naime, struja praznog hoda $\vec{I}_{o1}$ koja bi bila u primarnom krugu kad ne bi bilo mehaničkih gubitaka, bila bi manja od struje kratkog spoja $\vec{I}_{10}$, jer se jedan dio radne komponente vektora struje troši na savladavanje mehaničkih gubitaka, što je u nekom mjerilu i dio momenta motora, pa radi toga linija momenta počinje iz točke P_{o1}. U točki P_{o1} postoji mogućnost sinhronizacije kada je s=0 a struja u sekundarnom krugu (rotorska struja) $\vec{I}_2=0$. Kad je motor zakočen, klizanje je s=1, a struja u rotorskom krugu jednaka je struji kratkog spoja ($\vec{I}_2 = \vec{I}_{2k}$). Ako bi se zamislila beskonačna brzina vrtnje ($s = \infty$), u tom slučaju bi otpor u sekundarnom krugu postao jednak nuli, pa ne bi postojala niti radna komponenta struje (točka P_∞ na slici 123). Iz navedenog proizlazi da se promjer kružnice određuje induktivnim otporom, a omski otpor rotorskog kruga određuje samo položaj točke P_k.

Prema jednadžbi (333), pokazano je kako se dijeli snaga okretnog polja na mehaničku i električnu snagu. Odnosi snaga, za neku snagu P, prikazani na kružnom dijagramu (sl. 123). Spajanjem točaka P_{10} i P_k dobiva se linija snage. Maksimalna korisna snaga asinhronog motora nalazi se u točki koja se dobiva povlačenjem tangente paralelne lilniji snage, a maksimalni moment povlačenjem tangente paralelne liniji momenta.

Ako se rotor asinhronog stroja vanjskom snagom, dovedenom preko osovine, vrti preko sinhronizma u područje negativnog klizanja, pogonska se točka pomiče po kružnici na niže od točke P_{o1}. Snaga kojom se u tom slučaju mora vrtjeti rotor daje negativnu snagu okretnog polja, suprotna je smjera i nakon odbijanja svih gubitaka, kao generatorska snaga odlazi u mrežu. Na taj način je iz asinhronog motora nastao asinhroni generator.

Prema tome može se zaključiti (sl. 123) da je motorsko područje rada omeđeno kružnicom i linijom snage, područje kočenja motora omeđeno je linijama snage i momenta, a ispod linije momenta nalazi se generatorsko područje rada. Prema slici 123. veoma je veliko generatorsko područje rada, ali se u praktične svrhe koristi veoma mali dio ispod točke P_{o1} s neznatnim vrijednostima klizanja, jer se iz mehaničkih razloga zbog velikih centrifugalnih sila ne smije bitno povećavati brzina vrtnje preko sinhronizma, a povećanjem klizanja rastu gubici Joulove topline u rotoru.

Karakteristična je činjenica za rad asinhronog stroja u generatorskom području, da mu je potrebna uzbuda iz mreže i da prema tome ne može raditi sam na vlastitu mrežu, već samo paralelno bar s jednim sinhronim generatorom. Zato se ne može kod asinhronog generatora regulirati uzbuda, već je njegovo pogonsko stanje definirano prema kružnom dijagramu jedino klizanjem. Njegovo nominalno klizanje je određeno isto kao i nominalno klizanje motora, ali s tom razlikom, da ima negativni predznak.

Prednost je asinhronog generatora, da ne treba aparature za sinhronizaciju, da pogonski stroj ne treba skupi regulator brzine vrtnje, već samo uređaj za njeno ograničenje. Ne treba ni automatski regulator napona, pa je zato oprema agregata, osobito kod malih snaga, mnogo jeftinija od opreme agregata sa sinhronim generatorima. Kako je oprema veoma jednostavna, može se lako upravljati iz daljine, pa zato primjena asinhronog generatora dolazi u obzir onda, kada se radi o iskorištenju manje količine energije od izvora udaljenih mjesta.

Asinhroni generator, odnosno svaki asinhroni stroj može se ipak i sam uzbuditi pomoću kondenzatora priključenih na stezaljke statora, jer u tom slučaju kondenzatori dobavljaju potrebnu jalovu struju za uzbudu. Međutim, to se u praksi ipak ne upotrebljava zbog vrlo visoke cijene potrebnih kondenzatora.

U kočnom području (gdje je klizanje veće od 1) rotor se okreće protiv smjera vrtnje statorskog okretnog polja i to s momentom koji djeluje u pravcu okretnog polja. Prema tome moment se protivi okretanju rotora, zbog čega se i naziva kočni moment, a područje kočnim područjem. Klizanju s = 2 odgovara sinhrona brzina vrtnje u protivnom smjeru, pa se zbog mehaničkih uvjeta ne smije znatno prekoračiti to klizanje.

Jedan od bitnih zahtjeva za asinhroni motor je mogućnost reguliranja brzine vrtnje. Ona se može ostvariti: promjenom radnog otpora u krugu rotora (promjenom napona), promjenom mrežne frekvencije i prespajanjem polova.

Povećanje radnog otpora u rotorskom krugu pomiče se točka P_k iz kružnog dijagrama prema točki P_o, a time i klizanje od s = 1 prema s = 0. Iz toga slijedi da se povećanjem radnog otpora u rotorskom krugu brzina vrtnje može regulirati od pune brzine do nule. Za različite brzine vrtnje moraju postojati i različite vrijednosti otpora, pa se takav otpor naziva regulacionim. Međutim, regulacija brzine vrtnje pomoću regulacionog otpora ima veliki nedostatak da je vrlo neekonomična, jer se regulacija postiže povećanjem gubitka Joulove topline. S povećanjem radnog otpora mijenja se i vanjska karakteristika asinhronog motora (sl. 121).

Iz do sada izloženoga jasno je, da se promjenom frekvencije mora mijenjati i brzina vrtnje asinhronih motora. Da bi se mogla izvršiti regulacija brzine vrtnje promjenom frekvencije potrebno je imati mogućnost proizvodnje različitih frekvencija struje kojom se napaja asinhroni motor. Promjenom frekvencije struje u stvari se mijenja induktivni otpor motora, dok struja i omski otpor ostaju isti, a adekvatno se mora mijenjati napon. Prema tome, promjenom induktivnog otpora mijenja se relativna vrijednost omskog otpora u ukupnom otporu. Smanjenjem frekvencije smanjuje se prekretni moment, a povećava se potezni moment. Zbog potreba posebnog izvora frekvencija i znatnih promjena u momentima, rijetko se upotrebljava regulacija brzine vrtnje asinhronih motora promjenom frekvencije.

Danas se najčešće regulacija brzine vrtnje asinhronih motora ostvaruje prespajanjem polova. Da bi se prespajanje moglo izvršiti asinhroni motor mora biti posebno građen. Znači, statorski namot mora imati mogućnosti unutarnjeg prespajanja ili mora postojati više statorskih namota koji odgovaraju različitom broju polova, a koji se mogu lako prespajati. S obzirom na to, da su namoti rađeni za različiti broj polova, to će spajanjem pojedinog namota biti ostvarene i različite brzine vrtnje. Slaba strana ove regulacije brzina vrtnje je, da je regulacija brzine vrtnie moguća samo u vrlo grubim stupnjevima.

Da bi se spriječilo povlačenje velike struje iz mreže prilikom uključivanja kaveznog ili kratkospojenog kolutnog asinhronog motora, moraju se pri pokretanju

asinhronih motora, posebno kada se radi o motorima velikih snaga, poduzeti različite mjere. Tako se npr. pokretanje kolutnih motora može vršiti pomoću regulacionog otpornika uvrštenog u krug rotora, a pokretanje kaveznih motora priključenjem na napon koji je za vrijeme pokretanja manji od nazivnog mrežnog napona. Osim toga grade se danas kavezni motori specijalne konstrukcije, koji pri pokretanju povlače manju struju.

Pri pokretanju kolutnih motora u krug rotora uključuje se regulacioni otpornik, koji s postepenim povećanjem brzine vrtnje smanjuje omski otpor. Obično se otpornici grade tako da regulacija nije kontinuirana nego stepenasta, na koji način se ipak dobiva dovoljan moment tijekom pokretanja uz što manju struju pokretanja.

Pokretanje asinhronih motora primjenom smanjenog napona upotrebljava se kod kaveznih motora. Smanjenje napona može se postići:

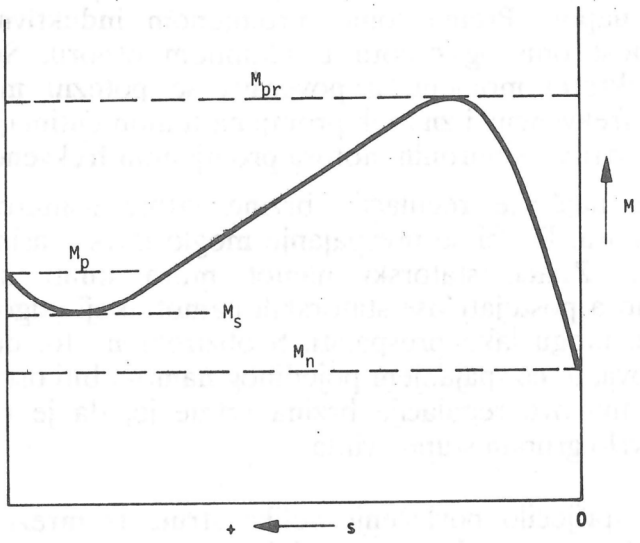
- preklapanjem trokut-zvijezda,
- s pomoću prigušnice,
- s pomoću autotransformatora.

Kod preklapanja trokut-zvijezda pri pokretanju namoti statora su priključeni u spoju zvijezda, a nakon pokretanja u spoju trokut. Na taj način se postiže da je struja i moment pri potezanju tri puta manji. Radi toga se takvo upuštanje može primijeniti kod motora kod kojih je potezni moment zbog opterećenja znatno manji od nominalnog, a to su obično mali motori koji pri pokretanju nisu jako opterećeni.

Uključivanjem prigušnica u svaku fazu također se smanjuje struja pokretanja. I ovaj se način može primijeniti samo tamo gdje nije potreban veliki potezni moment pri pokretanju.

Pokretanje asinhronih motora s pomoću autotransformatora radi na istom principu, ali motor razvija pod istim uvjetima veći potezni moment.

Kavezni motori specijalne konstrukcije imaju neugodan utjecaj struje kratkog spoja na mrežu. Karakteristika momenta kaveznog motora prikazana je na slici 124. Od kaveznog asinhronog motora traži se da ima dobar potezni moment M_p, propisani prekretni moment M_{pr}, i da minimalni moment M_s ne sprečava motor da postigne



Sl. 124. Karakteristika momenta kaveznog motora

punu brzinu vrtnje. Taj zahtjev postiže se pri projektiranju primjenom pojave potiskivanja struja (dubokim utorima ili dvostrukim kavezom).

Zbog navedenih specifičnosti trofaznih asinhronih motora, njihova primjena nije u svim slučajevima opravdana, posebno kad se radi o motorima malih snaga, pa su se radi toga razvili jednofazni asinhroni strojevi.

Mali potrošači priključuju se iz ekonomskih razloga jednofazno, jer je jednofazni priključak jeftiniji od trofaznog. U takvom slučaju potreban je jednofazni asinhroni motor. Obično se gradi za snage do 0.5 kW. Velika primjena kućanskih aparata uvjetovala je snažan razvoj proizvodnje tih motora tako da ona danas u svijetu za snage ispod 0.5 kW daleko nadmašuje proizvodnju trofaznih motora.

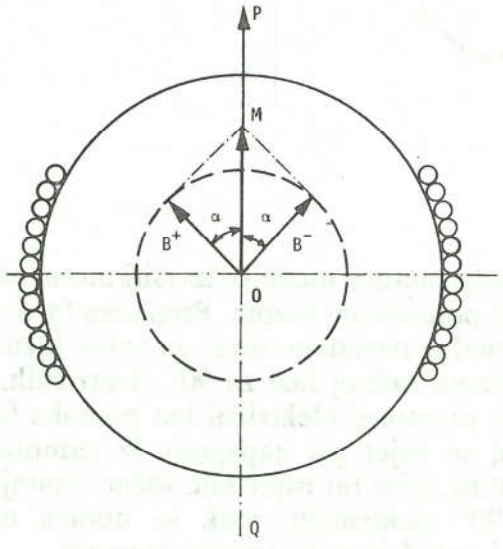
Namot statora kod jednofaznog asinhronog motora obično popunjava samo 2/3 postojećih utora, pa mu je faktor namota lošiji nego u trofaznih asinhronih motora. Zbog toga mu je snaga za 40-50% manja od snage trofaznog asinhronog motora, uz iste dimenzije željeza.

Priključenjem statorskog namota jednofaznog asinhronog stroja na mrežu, dobiva se jednofazno pulzirajuće magnetsko polje. To pulzirajuće magnetsko polje može se ipak dovesti u vezu s rotirajućim tokovima (poljima) iako se rotirajući tok može proizvesti polifaznim (trofaznim i dvofaznim) namotajima. Pulzirajući tok, s maksimalnim indukcijama (B_m) na mjestu maksimalne magnetske indukcije u momentu maksimuma struje, može se uvijek smatrati nastalim kombinacijama dvaju rotirajućih tokova stalnih amplituda $1/2\ B_m$ koji bi rotirali suprotnim smjerovima brzinom $\omega(x)$ prema jednadžbi

$$B_m \cos\omega t = 1/2\, B_m e^{j\omega t} + 1/2\, B_m e^{-j\omega t}. \qquad (350)$$

Maksimalne indukcije (+B) i (-B) ovakvih dvaju tokova ($+\Phi$) i ($-\Phi$) dale bi prema slici 125. u nekom momentu t položaja pripadajućih $+\vec{B}$ i $-\vec{B}$ indukcija (pod kutem α prema simetrali) rezultantu vremenski sinusoidno varijabilnu s kružnom frekvencijom ω između $+B_m$ i $-B_m$ kao ekstremnih iznosa.

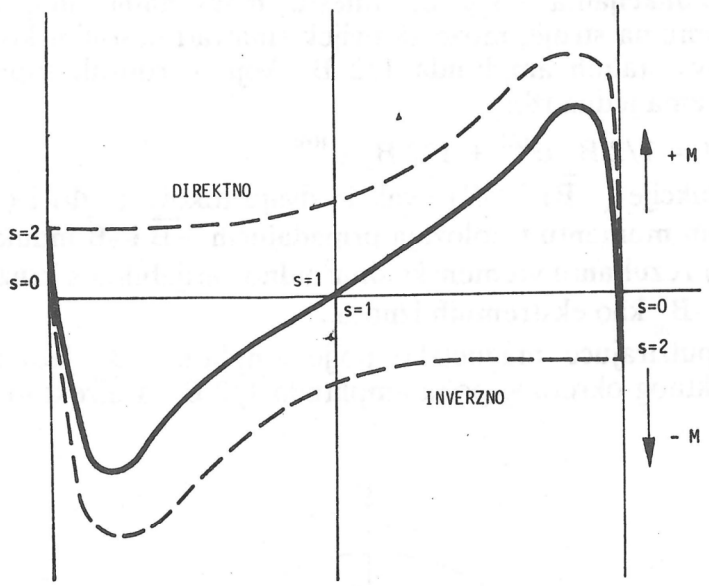
Strujno pulzirajuće magnetsko polje amplitude B_m jednako je dakle sumi inverznog i direktnog okretnog polja amplituda $1/2\ B_m$. I direktno i inverzno okretno



Sl. 125. Shema nastajanja pulzirajućeg magnetskog toka

polje stvaraju s rotorskim strujama okretne momente svako u svom smjeru. Prema tome, jednofazni asinhroni motor može se ekvivalentno zamijeniti s dva ista trofazno namotana motora (od kojih su u jednom od njih dvije faze međusobno zamjenjene) na istoj osovini, a serijski su priključcni na trofaznu mrežu sa suprotnim smjerovima vrtnje. Veličina direktnog i inverznog okretnog polja ovise o klizanju koje je za jedan motor s, a za drugi 2-s. Kad je klizanje s = 1 oba su okretna momenta jednaka. Na slici 126. prikazani su momenti direktnog i inverznog polja crtkanim linijama, dok je rezultirajući moment izvučen punom linijom. Iz navedenoga se vidi da jednofazni asinhroni motor nema poteznog momenta jer se djelovanja oba ekvivalentna motora poništavaju. Do istog zaključka dolazi se i zbog činjenice da se jednofaznim priključkom ne određuje smjer vrtnje. Radi toga jednofazni asinhroni motor može krenuti samo uz vanjsku pomoć ili uz primjenu dodatnih uređaja. Kratkospojni rotor jednofaznog asinhronog motora u principu jednak je rotoru trofaznog asinhronog motora.

Od jednofaznih asinhronih motora često se traže relativno veliki potezni i prekretni (maksimalni) momenti radi sigurnosti pokretanja i mogućnosti rada pri smanjenom naponu mreže. Ti zahtjevi veoma često imaju za posljedicu da se nominalni podaci za takve motore određuju s obzirom na momente, a ne s obzirom na zagrijavanje namota.



Pokretanje asinhronog motora može se izvršiti momentom izvana (npr. ručno), što se rjeđe upotrebljava ili pomoćnom fazom. Pomoćna faza namotava se u preskoku 1/3 slobodnih utora (naprijed je navedeno da se za jednu fazu upotrebljava 2/3 utora) s prostornim pomakom prema radnoj fazi za 90° električnih. Za simetrično okretno polje poznat je uvjet, da je prostorni električni kut pomaka faza jednak vremenskom kutnom pomaku faza. Taj se uvjet pri napajanju iz jednofazne mreže može samo iznimno zadovoljiti. Međutim, iako taj uvjet nije točno ispunjen, tj. ako je vremenski kutni pomak manji od 90° električnih, ipak se dobiva okretno polje koje nije simetrično nego eliptično, i ono daje neki potezni moment.

Vremenski pomak pomoćne faze može se postići uključivanjem dodatno

otpora između mreže i dodatne faze. Otpori mogu biti: omski, induktivni ili kapacitivni.

Pomoćna se faza u pravilu dimenzionira samo za pokretanje, pa se zato iskapčajući motor postigne približno 2/3 brzine vrtnje, da ne bi pregorila.

Danas se za pokretanje jednofaznih asinhronih motora upotrebljavaju samo omski ili kapacitivni otpori. Omski otpor predstavlja jednostavno i jeftino rješenje. Mana mu je što daje relativno mali vremenski pomak faze i što se njime ne može postići veći potezni moment od nominalnog. Potreban dodatni (manjeg presjeka ili materijala s većim omskim otporom) omski otpor se može postići samom izvedbom pomoćne faze.

Nasuprot omskom otporu, uključivanjem kapacitivnog otpora u krug pomoćne faze može se postići i točan pomak faze od 90° električnih. Veličinom kondenzatora i pravilnim dimenzioniranjem pomoćnog namota mogu se postići veći potezni momenti, i do tri i pol puta veći od nominalnog.

Ako se kondenzator dimenzionira za nominalnu snagu motora, a pri čemu je struja manja od dozvoljene (ispod vrijednosti koju može pomoćni namot trajno podnositi), pomoćna faza može ostati uključena i za vrijeme pogona. Međutim, ako se motor rasterećuje, raste induktivitet motora i može doći do rezonancije s kapacitetom kondenzatora ili se bar približimo toj rezonanciji. Na taj način struja u pomoćnoj fazi raste. Znači, kod smanjenja tereta povećava se struja u pomoćnoj fazi, pa ova može, kod trajnog pogona, izgorjeti.

Ovakvi motori s kondenzatorom za određeni teret zovu se "kondenzatorski motori". Oni se mogu upotrebljavati samo onda, kad se teret ne može mnogo mijenjati npr. kod ventilatorskih pogona. Pošto pomoćna faza ostaje stalno ukopčana dobiva se simetrično okretno polje i s time teoretski ista snaga kao kod trofaznih motora, dakako uz jednake dimenzije. Kako se ipak moraju dozvoliti izvjesne tolerancije u pogledu promjene mora se pomoćni namot dimenzionirati tako, da podnosi trajno manje promjene tereta, pa se radi toga snizuje snaga kondenzatorskog motora na oko 80-85% snage trofaznih motora.

Potezni moment ovakvih kondenzatorskih motora, čiji kondenzator je dimenzioniran za nominalni teret, a ne za pokretanje, je relativno malen, a iznosi od 25% do 60% nominalnog momenta. Ako želimo veći potezni moment, možemo kod pokretanja paralelno pogonskom kondenzatoru ukopčati još jedan dodatni kondenzator za pokretanje, i on može ostati ukupčan samo tokom pokretanja. Na taj način se povećava potezni moment kondenzatorskog motora.

U svim ostalim slučajevima upotrebljava se pomoćna faza sa kondenzatorom samo za pokretanje. Budući da se sada pomoćna faza može dimenzionirati samo za pokretanje. Za uklapanje i isklapanje pomoćne faze obično se upotrebljava posebna sklopka koja se iskapča automatski, da ne bi pregorila pomoćna faza.

2.8. PRETVORBA ELEKTRIČNE ENERGIJE U POTENCIJALNU ENERGIJU VODE

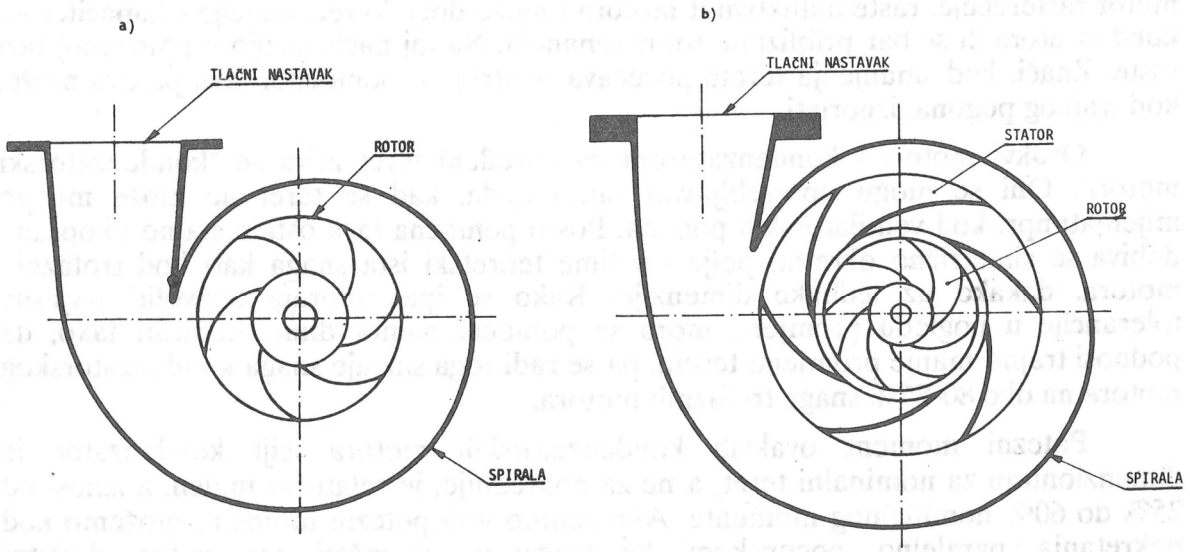
Za pretvorbu električne energije u potencijalnu energiju vode danas se uglavnom koriste centrifugalne crpke i crpke-turbine.

2.8.1. CENTRIFUGALNE CRPKE

Centrifugalne crpke koriste se za iscrpak suvišnih količina vode (tekućine) iz nekih prostora ili za podizanje vode na višu razinu radi povećanja tlaka. One se uglavnom sastoje od statora i rotora. Kroz stator se voda (ili neka druga tekućina) dovodi rotoru i uz povrišeni tlak iz njega se odvodi. Rotor je pričvršćen na osovinu, tjeranu najčešće električnim motorom ili motorom s unutrašnjim izgaranjem, dok se statori izvode s lopaticama i bez lopatica (sl. 127a. i b).

Stator ima usisni i tlačni nastavak. Kroz usisni nastavak dovodi se tekućina u rotor gdje se ubrzava i izlazi u tlačni nastavak (sl. 128).

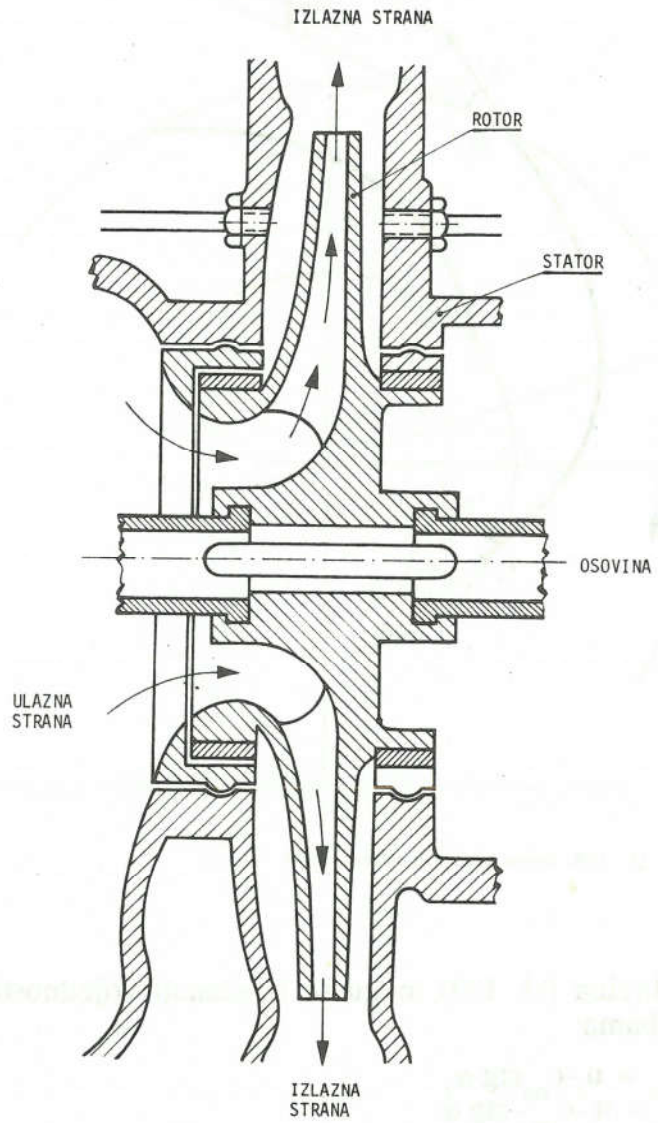
Centrifugalne crpke izvode se kao: jednostrujne ili dvostrujne (s obzirom na dotok tekućine u rotor), s vodoravnom ili okomitom osovinom, te kao jednostepene ili višestepene (više rotora spojenih u seriju).



Sl. 127. Izvedba crpki a) bez statorskih lopatica i b) sa statorskim lopaticama

Energetski odnosi kod crpki mogu se promatrati na isti način kao i odnosi kod vodnih turbina opisanih u točki 2.6. Polazeći od brzina na ulazu i izlazu iz rotora crpke (sl. 129) određuju se trokuti brzina pomoću kojih se određuje snaga na osovini crpke analogno određivanju snage na osovini turbine (202), pa jednadžba glasi:

$$P = \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} + \frac{u_2^2 - u_1^2}{2} - \frac{w_2^2 - w_1^2}{2} \qquad (351)$$



Sl. 128. Shematski prikaz jednostepene crpke

Koristeći kosinusov poučak iz trokuta brzina mogu se odrediti relativne brzine w_1 i w_2, te njihovim uvrštavanjem u jednadžbu (351) dobiva se izraz za snagu:

$$P = u_2 c_2 \cos \alpha_2 - u_1 c_1 \cos \alpha_1 = u_2 c_{2u} - u_1 c_{1u}. \quad (352)$$

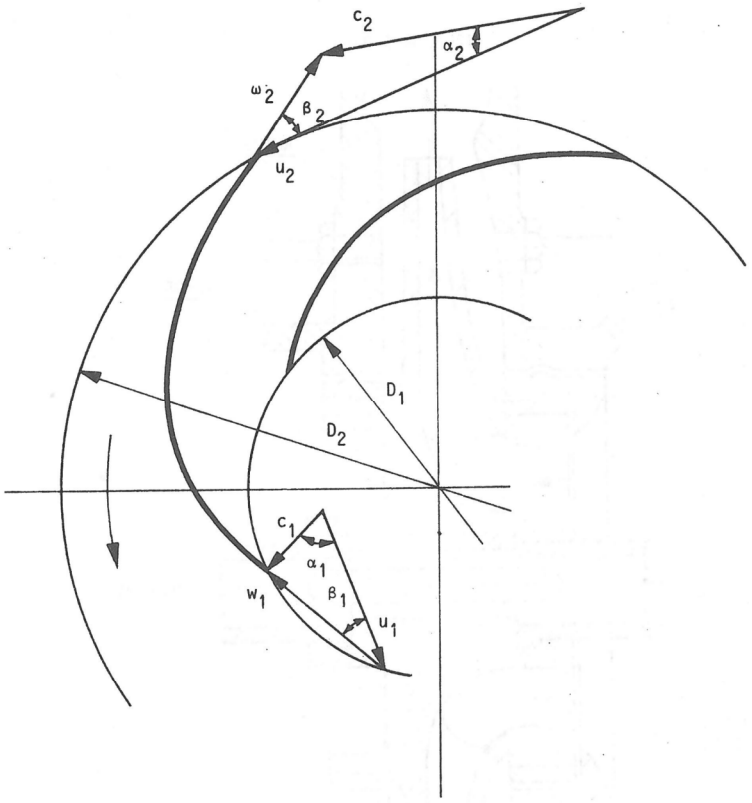
Navedene jednadžbe (351) i (352) vrijede za specifičnu snagu, što znači za protok kroz crpku 1kg/s.

Snaga potrebna da se 1 kg tekućine podigne na visinu H_p (što se obično naziva teorijska visina crpljenja) određuje se iz izraza:

$$P = g H_p.$$

Koristeći jednadžbu (352) dobiva se izraz za određivanje teorijske visine crpljenja koji glasi:

$$H_p = (u_2 c_{2u} - u_1 c_{1u})/g. \quad (353)$$



Sl. 129. Shema brzine u rotoru crpke

Iz trokuta brzina (sl. 129) mogu se izračunati vrijednosti za c_{2u} i c_{1u} prema slijedećim jednadžbama:

$$C_{2u} = u_2 - w_{2u} = u_2 - c_{2m} \operatorname{ctg} \alpha_2 \quad (354)$$

$$c_{1u} = u_1 - w_{1u} = u_1 - c_{1m} \cdot \operatorname{ctg} \alpha \quad (355)$$

gdje su brzine c_{1m} i c_{2m} okomite na presjeku kanala među lopaticama rotora. Dakle, te brzine mogu se izraziti pomoću količine protoka (Q) kroz crpku i površine presjeka među lopaticama na ulazu (A_1) i izlazu (A_2) iz rotora, pa slijedi:

$$C_{1m} = Q/A_1 \quad (356)$$

$$c_{2m} = Q/A_2 . \quad (357)$$

Uvrštavanjem vrijednosti za c_{2u} i c_{1u} (354 i 355) te vrijednosti za c_{1m} i c_{2m} (356 i 357) u jednadžbu (353), dobiva se izraz za određivanje stvarne teorijske visine crpljenja:

$$H_p = \frac{u_2}{g} \left(u_2 - \frac{Q}{A_2} \operatorname{ctg}\alpha_2\right) - \frac{u_1}{g} \left(u_1 - \frac{Q}{A_1} \operatorname{ctg}\alpha_1\right) \quad (358)$$

Za izvedenu crpku teorijska visina crpljenja je ovisna o protoku, jer su brzine (crpka rotira konstantnim brojem okretaja), kutevi i površine konstantne vrijednosti.

U narednim jednadžbama brzine su stvarne brzine čestica, a kutevi su stvarni kutevi utjecanja i istjecanja tekućina.

U crpki bez gubitaka korisna je snaga jednaka upotrebljenoj, a za bilo koju tekućinu određuje se prema izrazu:

$$P_c = \rho g Q H_p . \tag{359}$$

Ako se crpi voda (ρ = 1000) u tom slučaju se snaga dobiva u kW, a jednadžba glasi:

$$P_c = g Q H_p . \tag{360}$$

Kod rada crpke javljaju se tri vrste gubitaka i to: hidraulični, volumetrijski i mehanički. U hidraulične se gubitke ubrajaju gubici koji djeluju na visinu dizanja, a koji nastaju između usisnog i tlačnog nastavka. Sami hidraulični gubici nastaju zbog trenja tekućine duž stijenki, zatim zbog pojave vrtloga i odvajanja strujnica od lopatica. Gubici koji su posljedica trenja proporcionalni su kvadratu protoka, dakle:

$$\Delta H_t = k_1 Q^2 . \tag{361}$$

Da bi se mogli odrediti gubici zbog vrtloga i odvajanja silnica od lopatica, najprije je potrebno odrediti protok kod kojega se ti gubici ne pojavljuju (Q_s). Nakon poznavanja protoka Q_s, gubici zbog vrtloga i odvajanja silnica od lopatica određuju se prema:

$$\Delta H_v = K_2 (Q-Q_s)^2, \tag{362}$$

Prema tome ukupni hidraulički gubici bili bi:

$$\Delta H_h = \Delta H_t + \Delta H_v = k_1 Q^2 + k_2 (Q - Q_s)^2 \tag{363}$$

gdje su k_1 i k_2 konstante.

Prvi član u jednadžbi (363) je parabola s tjemenom u ishodištu, a drugi član također parabola, ali s tjemenom pomaknutim za Q_s u smjeru pozitivinih protoka. Minimalni hidraulični gubici (ΔH_{hm}) dobivaju se deriviranjem jednadžbe (363) po Q, a za protok Q_m. Minimalni protok (Q_m) ovisan je o vrijednostima konstanti (k_1 i k_2) te o protoku Q_s. Hidraulički gubici u ovisnosti o protoku (Q) prikazani su na slici 130.

Hidraulički stupanj djelovanja (η_h) jednak je omjeru između teorijske visine crpljenja (H_p) umanjene za hidrauličke gubitke (ΔH_h) i teorijske visine crpljenja, dakle

$$\eta_h = (H_p - \Delta H_h)/H_p = H/H_p . \tag{364}$$

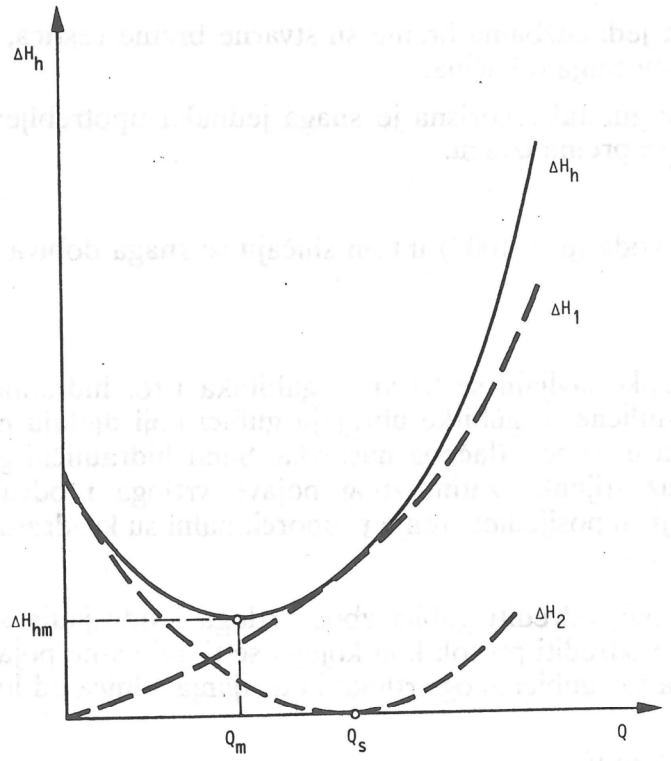
Izraz u brojniku jednadžbe (364) naziva se još i pogonska karakteristika crpke, a ona se može prikazati jednadžbom:

$$H = a_1 n^2 + a_2 nQ - a_3 Q^2 \tag{365}$$

u kojoj su a_1, a_2 i a_3 konstante ovisne o dimenzijama crpke, a n je njezin broj okretaja.

Budući da je pogonska karakteristika crpke ovisna o teorijskoj visini crpljenja i hidrauličkim gubicima, to se radi toga u jednadžbi (365) pojavljuje n^2, koji je vezan na izraz (358) za H_p u kome se obje brzine na kvadrat, a to znači da su one proporcionalne broju okretaja. Član sn i Q također se nalazi u jednadžbi (358), dok se Q^2 nalazi u jednadžbi za određivanje hidrauličkih gubitaka. Maksimalne vrijednosti visine crpljenja su na paraboli kojoj je tjeme u ishodištu koordinatnog sistema, a kojoj se os poklapa s ordinatnom osi (s. 131).

Volumetrijski gubici nastaju uslijed gubljenja tekućine kroz raspore između



rotora i statora. Prema tome, količina tekućine koja je došla u crpku (rotor) veća je od količine tekućine u tlačnom nastavku. Ako se gubitak tekućine označi s ΔQ, u tom slučaju volumetrijski stupanj djelovanja crpke glasi:

$$\eta_v = Q/(Q+\Delta Q) . \tag{366}$$

Ovisnost volumetrijskih gubitaka o specifičnom broju okretaja prikazana je na slici 132.

Mehanički gubici nastaju uslijed trenja u ležajevima i brtvenicima, te trenja tekućine na vanjskim stjenkama rotorskog kola. Mehanički stupanj djelovanja određuje se iz izraza

$$\eta_m = (P_o - \Delta P_m)/P_o \tag{367}$$

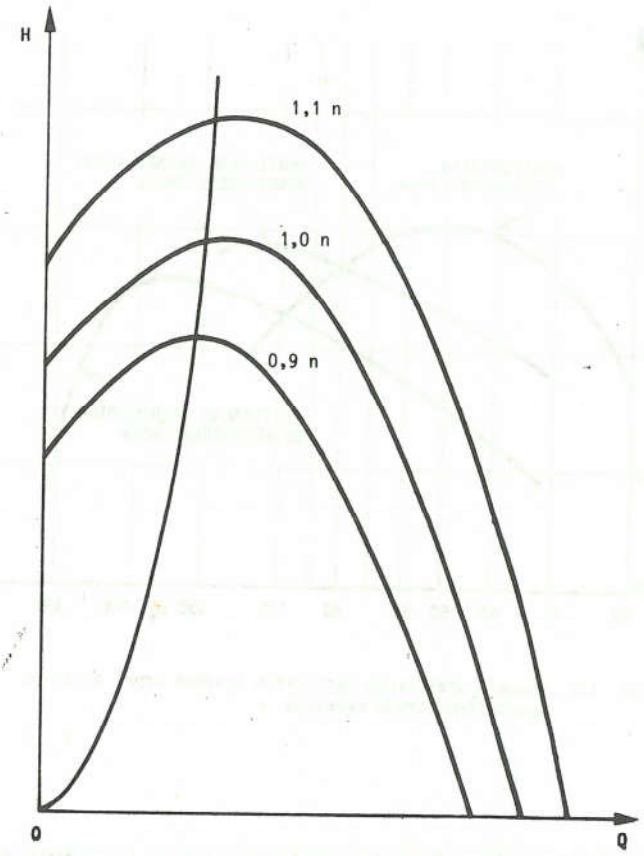
gdje je P_o snaga pogonskog stroja na osovini crpke, a ΔP_m mehanički gubici.

Ukupni stupanj djelovanja crpke je:

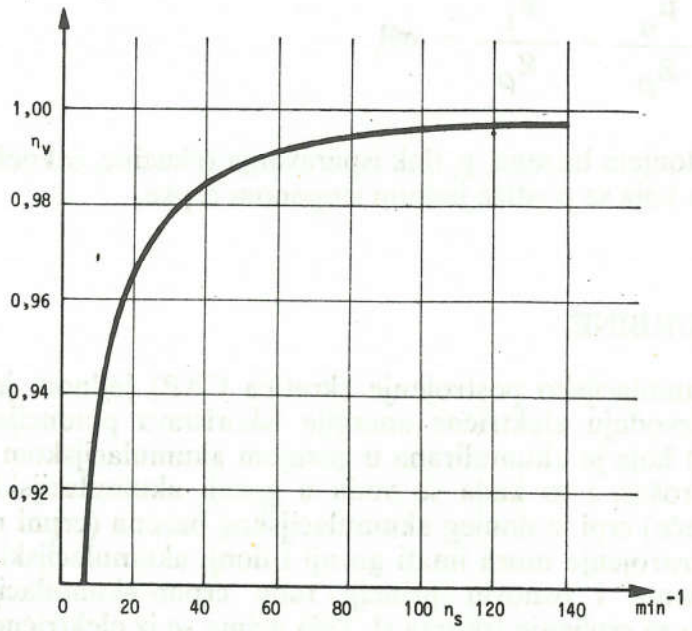
$$\eta_c = \eta_h \eta_v \eta_m \tag{368}$$

a ovisnost je o hidrauličkom, volumetrijskom i mehaničkom stupnju djelovanja. Budući da su hidraulični i volumetrijski gubici ovisni o broju okretaja, to će i ukupni stupanj djelovanja ovisiti o broju okretaja i o izvedbi crpki (slika 133).

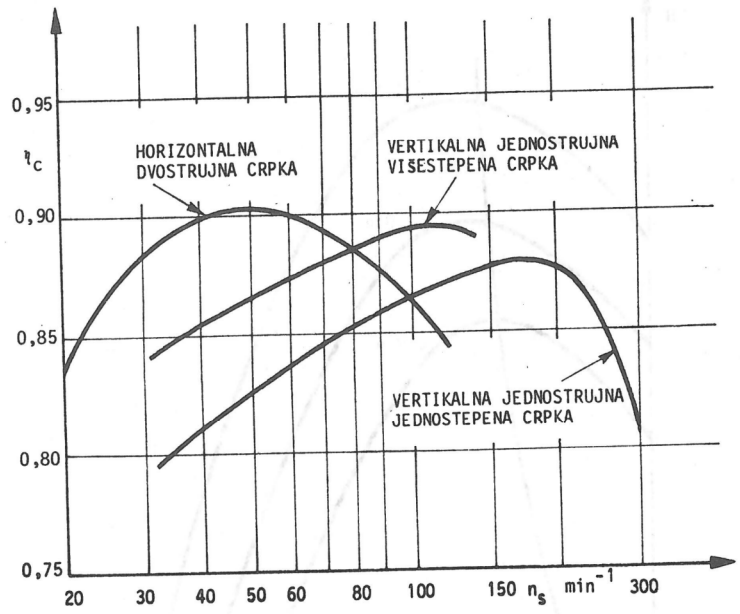
U slučajevima kada se centrifugalne crpke koriste za iscrpak tekućine, u tom slučaju je potrebno poznavati usisnu visinu crpke. Određivanje usisne visine crpke ovisno je o izvedbi crpke. Naime, kod horizontalne crpke usisna visina je visinska razlika između središta njezine osovine i razine hlapljevine u donjem bazenu.



Sl. 131. Pogonske karakteristike crpke za različite brojeve okretaja



Sl. 132. Volumetrijski stupanj djelovanja u ovisnosti o specifičnom broju okretaja crpke



Sl. 133. Stupanj djelovanja različitih izvedba crpki ovisno o specifičnom broju okretaja

Međutim, kad je osovina crpke okomita, usisna je visina razlika između najviše ulazne točke rotorske lopatice prvog stepena crpke i razine u donjem bazenu.

Maksimalna usisna visina određuje se na isti način kao i maksimalno dopuštena visina izlaznog presjeka turbine iznad razine donje vode (jednadžba 234), dakle:

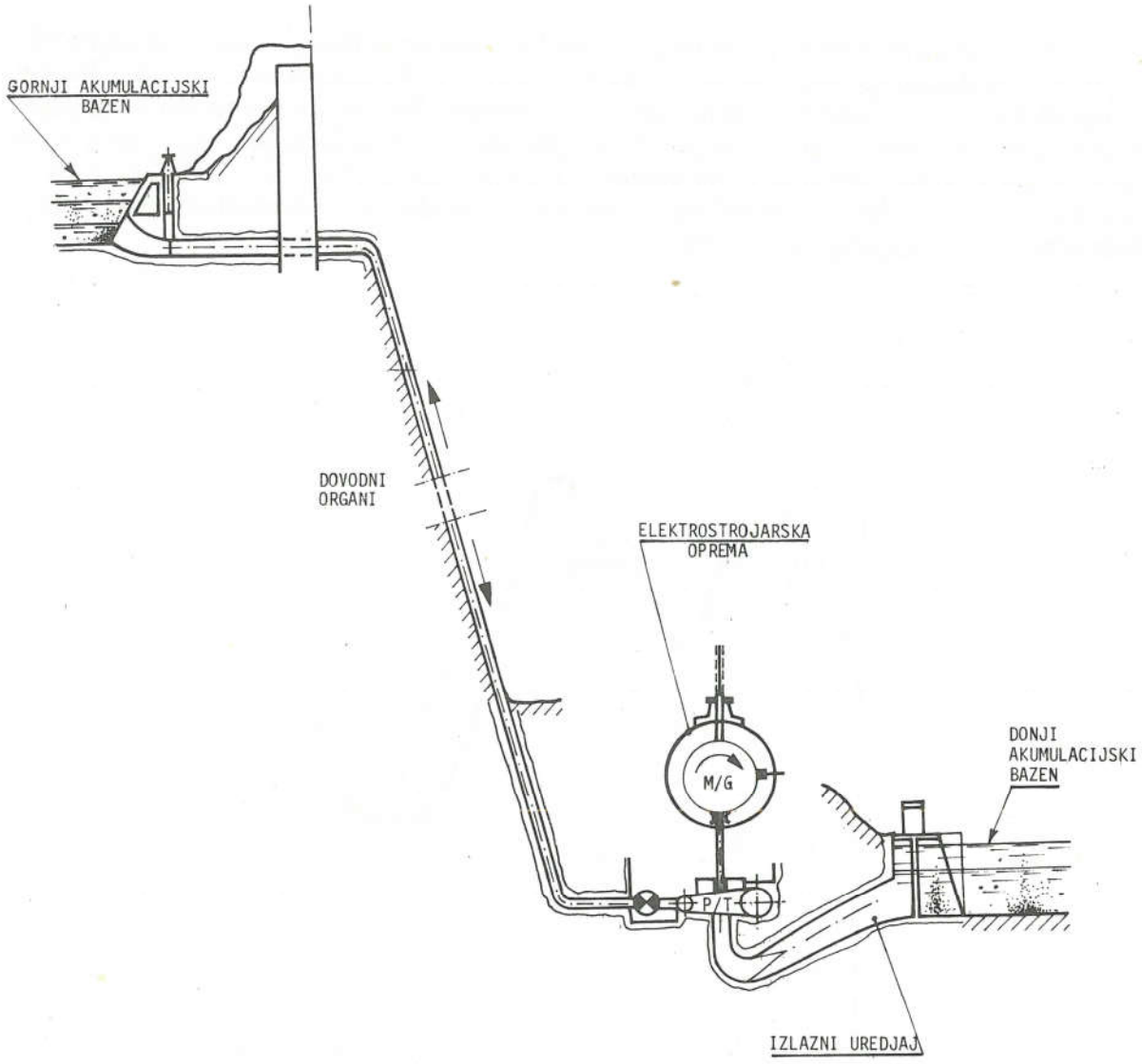
$$H_{smax} = \frac{p_u}{g_\rho} - \frac{p_i}{g_\rho} - \sigma H \qquad (369)$$

gdje je p_u tlak u donjem bazenu, p_i tlak isparavanja tekućine, σ koeficijent kavitacije, a H visina crpljenja koja se postiže jednim stepenom crpke.

2.8.2. CRPKE-TURBINE

Crpno-akumulacijsko postrojenje (kratica CAP) jednom je hidroelektrana u kojoj se za proizvodnju električne energije iskorištava potencijalna energija vode (turbinski pogon) koja je akumulirana u gornjem akumulacijskom bazenu (s. 134), a drugi put je potrošač, i to kada se voda u gornji akumulacijski bazen (u pravilu prirodno ne dotječe) crpi iz donjeg akumulacijskog bazena (crpni rad). Dakle, crpno-akumulacijsko postrojenje mora imati gornji i donji akumulacijski bazen. Na sl. 134. prikazana je shema i osnovni princip rada crpno-akumulacijskog postrojenja. Potrebna energija za crpljenje (prema sl. 135) uzima se iz električne mreže.

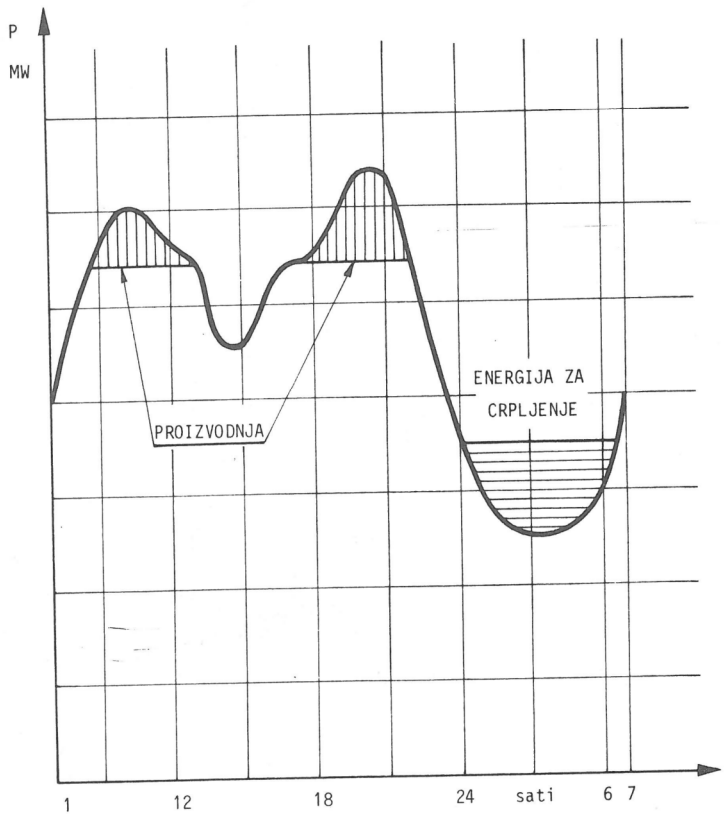
Kad ne bi bilo gubitaka vode (zbog iskhlapljivanja u gornjem i donjem akumulacijskom bazenu i gubitaka vode zbog propuštanja brtvenica itd.), cijeli bi se



Sl. 134. Shema crpno-akumulacijske elektrane

proces mogao trajno ponavljati bez dodavanja nove vode. Budući da postoje gubici vode, prijeko je potrebno dodavati vodu, u donji ili u gornji akumulacijski bazen. Energetski je povoljnije ako se voda dodaje (dotiče) u gornji akumulacijski bazen. S druge strane, kad ne bi bilo gubitaka energije u crpki, vodnoj turbini, motor-generatoru, dovodu i cjevovodu, u turbinskom pogonu proizvodilo bi se upravo onoliko električne energije koliko je utrošeno električne energije za crpljenje. Međutim, u stvarnosti se više troši električne energije za crpljenje nego što se proizvodi u turbinskom pogonu. Promatrajući, dakle, bilančno, crpno-akumulacijsko postrojenje jest potrošač električne energije, ali u krajnjoj liniji takvo postrojenje može biti vrlo korisno u elektro-energetskom sustavu ako se voda crpi u razdobljima malih opterećenja (sl. 135) kad postoje neiskorišteni kapaciteti za proizvodnju električne energije i kad se crpljenjem akumulirana voda iskorištava za turbinski pogon u razdobljima velikih opterećenja. Takvim pogonom, ako se crpno-akumulacijsko postrojenje koristi na najpovoljniji način, mogu se postići dvojake koristi u elektroenergetskom sustavu: smanjenje potrebne izgradnje termoelektrana uz sigurnost opskrbe potrošača i bolje iskorištenje termoelektrana.

Smanjenje potrebne izgradnje termoelektrana temeljna je korist od izgradnje crpno-akumulacijskog postrojenja, i ono je u prvom redu mjerodavno za određivanje ekonomske opravdanosti izgradnje takvih postrojenja. Bez obzira na to što je za crpni pogon potrebno više energije nego što se dobiva u turbinskom pogonu, može se u nekim slučajevima ostvariti i smanjenje troškova za gorivo, što svakako ovisi o prilikama u elektroenergetskom sustavu (strukturu termoelektrana, udio hidroenergije u ukupnoj proizvodnji i dr.).



Sl. 135. Primjer rada crpno-turbinskog postrojenja u dnevnom dijagramu opterećenja

Zbog takvih energetskih odnosa nije opravdano u svim situacijama (hidrološkim) iskorištavati crpno-akumulacijska postrojenja, jer u sustavu postoje situacije kad se potražnja za električnom energijom može zadovoljiti nižim troškovima, bez stavljanja u pogon crpno-akumulacijskih postrojenja. To je, na primjer, slučaj kad je omjer između troškova za gorivo u termoelektranama, u kojima se smanjuje proizvodnja zbog proizvodnje u turbinskom pogonu i troškova za gorivo u onim termoelektranama koje je potrebno angažirati za crpljenje vode manji od omjera između energije za crpljenje i energije proizvedene u turbinskom pogonu.

Osim toga, u nekim je slučajevima opravdano, s gledišta troškova za gorivo samo relativno kratko iskorištenje snage, odnosno angažiranje samo dijela snage crpno-akumulacijskog postrojenja. Dakle, način iskorištavanja crpno-akumulacijskog postrojenja ovisi o odnosima u sustavu kao cijelini: o sezoni (o njoj ovisi potrebna količina energije i maksimalno opterećenje), o mogućnosti proizvodnje svih hidroelektrana u sustavu kao i njihovoj snazi, o strukturi termoelektrana i njihovu

tehničkom minimumu kao i termoelektranama ili nuklearnim elektranama koje će se u budućnosti graditi za opskrbu potrošnje električne energije.

Iz svega proizlazi da je, kad se razmatra opravdanost izgradnje crpno-akumulacijskih postrojenja, nužno odrediti najpovoljniji način iskorištavanja takvih postrojenja, uzimajući pri tome u obzir sve potrebne karakteristike elektroenergetskog sustava koje mogu utjecati na rad i način pogona crpno-akumulacijskog postrojenja. Dakle, jedino sveobuhvatnom energetsko-ekonomskom analizom, uz uvažavanje svih relevantnih faktora, može se odrediti najpovoljniji rad crpno-akumulacijskog postrojenja, kao i uloga i doprinos u sustavu, što olakšava i donošenje odluke o njegovoj izgradnji.

Prilikom uključivanja crpno-akumulacijske hidroelektrane u elektroenergetski sustav potrebno je ukupnu potrošnju električne energije korigirati (povećati) za prosječnu mjesečnu potrošnju crpnog postrojenja (W_{uc}) odnosno korigirati konstantnu potrošnju (W_{kp}).

Danas se crpno-akumulacijska postrojenja izvode s jednim hidrauličnim strojem (crpka-turbina) i jednim električnim strojem (motorgenerator).

Centrifugalna crpka sa suprotnim smjerom strujanja može raditi kao vodna turbina. Pri idealnom strujanju (bez trenja i vrtloga) u takvom su stroju trokuti brzina - zanemarujući smjer strujanja - međusobno jednaki. U praksi se te prilike ne mgou ostvariti, pa su svojstva crpki-turbina nešto nepovoljnija od onih u posebno izvedenim crpkama i turbinama.

Nedostatak crpno-akumulacijskih postrojenja, kod njihovih prvih izvedbi, bio je da je crpka imala veću negativnu vrijednost usisne visine (prema 369) nego za turbinu (prema 234). Vrijednost usisne visine ovisila je uglavnom o koeficijentima kavitacije, čiji utjecaj je bio dominantan kod crpno-akumulacijskih postrojenja malih protoka (snaga), te o razini ukopavanja crpno-akumulacijskog postrojenja.

Znatnije eliminiranje navedenih nedostataka rješeno je s izgradnjom crpno-akumulacijskih postrojenja većih snaga (većeg protoka), upotrebom kvalitetnijih materijala (nehrđajućih čelika) i znatnijim ukopavanjem (sl. 134).

Naprezanja koja nastaju zbog titranja, te velika osjetljivost na kavitaciju ukazuju na to da je potrebno pri konstrukciji crpka-turbina pristupiti od problema u crpnom radu, znači od crpke.

Pomoću usporedbe energetskih odnosa u turbini i crpki dadu se prikazati specifičnosti crpke-turbine. Gubici u crpki moraju se pokriti pogonskom snagom proizvedenom u pogonskom stroju (npr. električnom motoru), a nasuprot tome, gubici u turbini smanjuju snagu na osovini, koja se predaje električnom generatoru. Ako se od bruto-pada (H_b) hidroelektrane, odbiju gubici u dovodu cjevovoda i odvodu (h_{RT}) te unutrašnji gubici u turbini (H_{iT}), dobiva se pad, nazvan teorijski iskoristivi pad u turbini H_{pT}, a koji iznosi

$$H_{pT} = H_b - h_{RT} - h_{iT}. \qquad (370)$$

U crpki se, međutim, teorijska visina crpljenja H_{pC} postiže ako se geodetskoj visini pumpanja H_g dodaju gubici u usisnoj i tlačnoj cijevi h_{RC} i unutrašnji gubici u crpki h_{iC} pa je

$$H_{pC} = H_g + h_{RC} + h_{iC}. \qquad (371)$$

Uračunavši stupanj djelovanja turbinskog η_T i crpnog η_C postrojenja, može se postaviti

$$H_{pT} = \eta_T H_b \tag{372}$$

$$H_{pC} = H_g/\eta_C . \tag{373}$$

Kad je to postrojenje u kojem je crpka-turbina, mora biti

$$H_b \cong H_g \tag{374}$$

jer se načinom pogona ne može znatnije izmijeniti razlika u razinama vode u gornjem i donjem akumulacijskom bazenu.

Zbog različitih visina i raznih stupnjeva djelovanja snaga se crpke razlikuje od snage turbine. Snaga je crpke:

$$P_C = gQ_p H_g/\eta_C \tag{375}$$

a snaga turbine

$$P_T = gQ_T H_b \eta_T . \tag{376}$$

Uz optimalni pogon crpke i turbine, a uz navedene jednadžbe, može se zaključiti da je snaga crpke veća od snage turbine ($P_C > P_T$).

Kod analize rada vodnih turbina (točka 2.5) dokazano je da se s povećanjem pada smanjuje specifični broj okretaja (n_s). Agregati za crpno-akumulacijska postrojenja izvode se sa specifičnim brojem okretaja, u ovisnosti o geodetskoj visini crpljenja, prema jednadžbi

$$n_s = \frac{550 \text{ do } 750}{\sqrt{H_g}} \tag{377}$$

Područje izbora specifičnog broja okretaja u zavisnosti od geodetske visine crpljenja prikazano je na slici 136, dok je na slici 137. prikazana ovisnost stupnja djelovanja crpno-turbinskog agregata u crpnom pogonu o specifičnom broju okretaja.

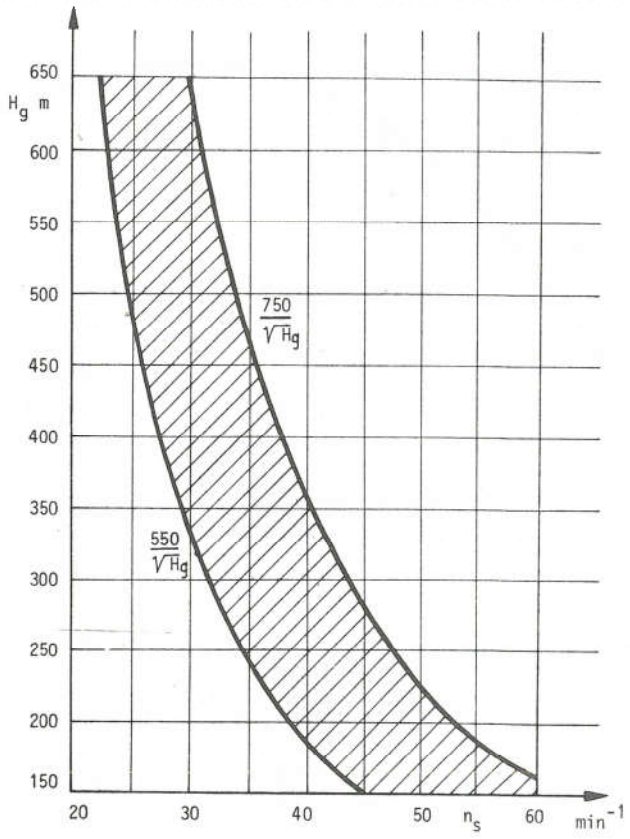
Iz navedenih slika vidljivo je da se s povećanjem pada smanjuje specifični broj okretaja (sl. 136), a sa smanjenim brojem okretaja smanjuje se i stupanj djelovanja agregata (sl. 137). Zbog toga se za padove veće od 600 m gradi višestepana crpka - turbina izvedena na istom principu kao višestepena crpka. Danas se vrlo mnogo radi na višestepenim agregatima i otklanjaju se njihovi nedostaci i to u prvom redu mogućnost regulacije snage u turbinskom radu.

Jedan od većih i značajnijih problema kod korištenja crpno-akumulacijskih postrojenja, je dovođenje agregata do sinhronog broja okretaja.

Korištenje crpno-turbinskih agregata nameće ugradnju posebnih strojeva ili uređaja potrebnih za dovođenje grupe do sinhronog broja okretaja u crpnom pogonu, pošto korištenje glavne turbine za ovo nije moguće.

U posljednje vrijeme razrađene su i primijenjene različite metode za pokretanje agregata u crpnom pogonu. Izbor metode ovisi o mnogim elementima i utječe kako na osnovu koncepcije postrojenja tako i na troškove pokretanja. Radi toga se u fazi planiranja i projektiranja postrojenja ovom pitanju treba posvetiti puna pažnja.

Bez obzira na izbor metode za pokretanje fizikalni uvjeti su uvijek isti: potrebno je rotirajući dio agregata u smjeru crpnog pogona dovesti do nazivnog broja okretaja.



Sl. 136. Ovisnost specifičnog broja okretaja crpno-turbinskog agregata o geodetskoj visini crpljenja

Nakon sinhronizacije na mrežu motorgenerator radi dalje kao sinhroni motor.

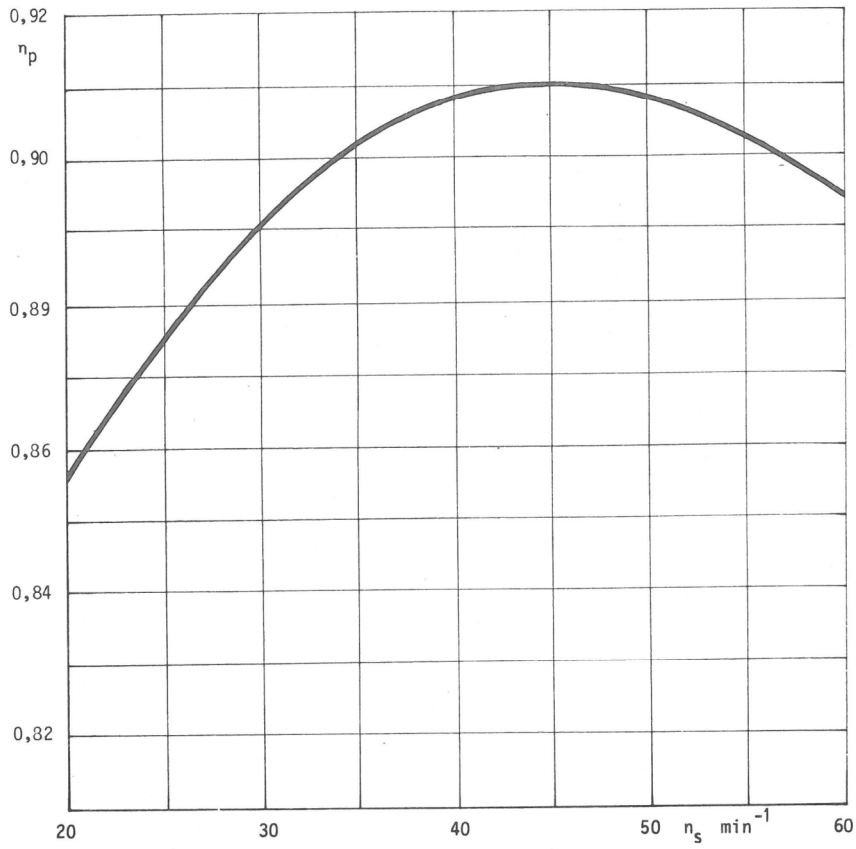
Da bi se rotirajući dijelovi stroja (rotor generatora - međuosovina - rotor turbina) relativno velikog momenta tromosti doveli kroz određeno vrijeme do sinhronizma potrebno je osim svladavanja gubitaka trenja i ventilacije stroj dodatno ubrzavati.

Vrijeme trajanja operacije pokretanja agregata uvjetovano je ekonomskim kriterijima. Znatno kraće vrijeme od ekonomskog traži neopravdano povećanje snage uređaja za pokretanje, a dulje vrijeme stvara dodatne gubitke koji su nesrazmjerni povećanju snage agregata.

Pokretanje agregata u crpnom pogonu vrši se uvijek sa zatvorenim predturbinskim zatvaračem. Gubici kod pokretanja, koji se odnose na hidraulički stroj, znatno ovise o tome da li se radno kolo pokreće u vodi ili u zraku.

U slučaju pokretanja u vodi gubici iznose do 30% nazivne snage stroja kod nazivnog broja okretaja, dok kod odvodnjenog stroja (u zraku) oni iznose do 3%.

Posebnim tehničkim rješenjima gubici se nastoje smanjiti npr. inicijalnim podmazivanjem nosećeg ležaja, smanjenjem gubitaka ventilacije i sl., čime se dolazi do danas prihvatljive vrijednosti od cca 1-2% za dio koji otpada na hidraulički stroj. Ovome treba dodati gubitke sinhronog stroja od cca 1%.



Sl. 137. Ovisnost stupnja djelovanja crpno-turbinskog agregata u crpnom pogonu o specifičnom broju okretaja

Ako se gornjem doda i snaga potrebna za ubrzavanje stroja dolazi se do značajnijih vrijednosti snage uređaja za pokretanje agregata u crpnom pogonu.

Najčešće se upotrebljavaju slijedeći načini pokretanja agregata u crpnom pogonu:

a) pokretanje posebnom turbinom
b) pokretanje posebnim asinhronim motorom
c) asinhrono pokretanje glavnim strojem
d) sinhrono pokretanje pomoću drugog stroja (back-to-back).

Pokretanje agregata posebnom turbinom ostvaruje se na način da se prigradi posebna turbina na osovinu glavnog agregata sa smjerom vrtnje crpnog pogona, a pokretanje asinhronim motorom odgovarajuće snage ostvaruje se prigradnjom motora na glavnu osovinu.

Asinhrono pokretanje glavnim strojem ostvaruje se na taj način da se motor - generator pokreće kao asinhroni motor pri čemu su rotorski zavoji kratko spojeni. Za vrijeme pokretanja stroj je izložen izuzetnim mehaničkim i termičkim naprezanjima. Radi velikog okretnog momenta vrijeme zaleta je vrlo kratko. Asinhrono pokretanje može biti direktno i indirektno. Kod direktnog pokretanja dolazi do vrlo velikih padova napona (vrijeme pokretanja je vrlo kratko) i može se primjeniti u izuzetno jakim visokonaponskim mrežama. Najčešće indirektno asinhrono pokretanje agregata ostvaruje se ugradnjom prigušnice sa svrhom smanjenja pada napona u

visokonaponskoj mreži, ali uz produženje vremena zaleta. I ostala tehnička rješenja za indirektno asinhrono pokretanje imaju za cilj smanjenje pada napona.

Kod sinhronog pokretanja s pomoću drugog agregata poznatnog pod imenom "back to back", stroj koji treba pokrenuti od samog početka radi kao sinhroni motor. Motorgenerator pokreće sinhroni generator koji se nalazi u istom ili obližnjem postrojenju. Strojevi su električki povezani od početka zaleta i uzbuđeni.

Ova metoda je pogodna jer ne uzrokuje dodatna termička i dinamička naprezanja motorgeneratora. Malo je međutim, postrojenja u kojima postoje preduvjeti za navedeno. U elektrani s više (n) jedinica od kojih se jedna upotrebljava za pokretanje ostalih samo (n-1) jedinica može raditi u crpnom pogonu, budući da se poslijednja ne može pokrenuti ili se pokreće na neki drugi način, što znatno poskupljuje postrojenje.

Sve do sada nabrojene metode služile su se hidrauličkim ili električkim rotacionim strojem kao sredstvom za dovođenje agregata do nazivnog broja okretaja kada je omogućena sinhronizacija električnog stroja na mrežu i daljni rad kao sinhroni motor.

Statički pretvarač frekvencije za sinhrono pokretanje agregata je statički uređaj u kome se trofazna izmjenična struja iz mreže stalne frekvencije pretvara u trofaznu izmjeničnu struju promjenjive frekvencije i za vrijeme zaleta dovodi na statorski namot sinhronog stroja. Motor-generator se pokreće sinhrono od stanja mirovanja do kraja zaleta, a sinhronizam stroja i frekventnog pretvarača je trajno osiguran. Napon na izlaznoj strani izmjenjivača (ujedno statorski napon pokretanog stroja) raste proporcionalno frekvenciji do nazivne vrijednosti.

Vrijeme zaleta kod ove vrste pogona ovisi o snazi uređaja, ali je općenito duže od ostalih metoda.

Među ostalim prednostima ove metode treba posebno istaknuti da nema dodatnih termičkih ni dinamičkih opterećenja sinhronog stroja, nema udaraca na mrežu, a održavanje uređaja za pokretanje je na nivou sličnih statičkih uređaja u elektrani.

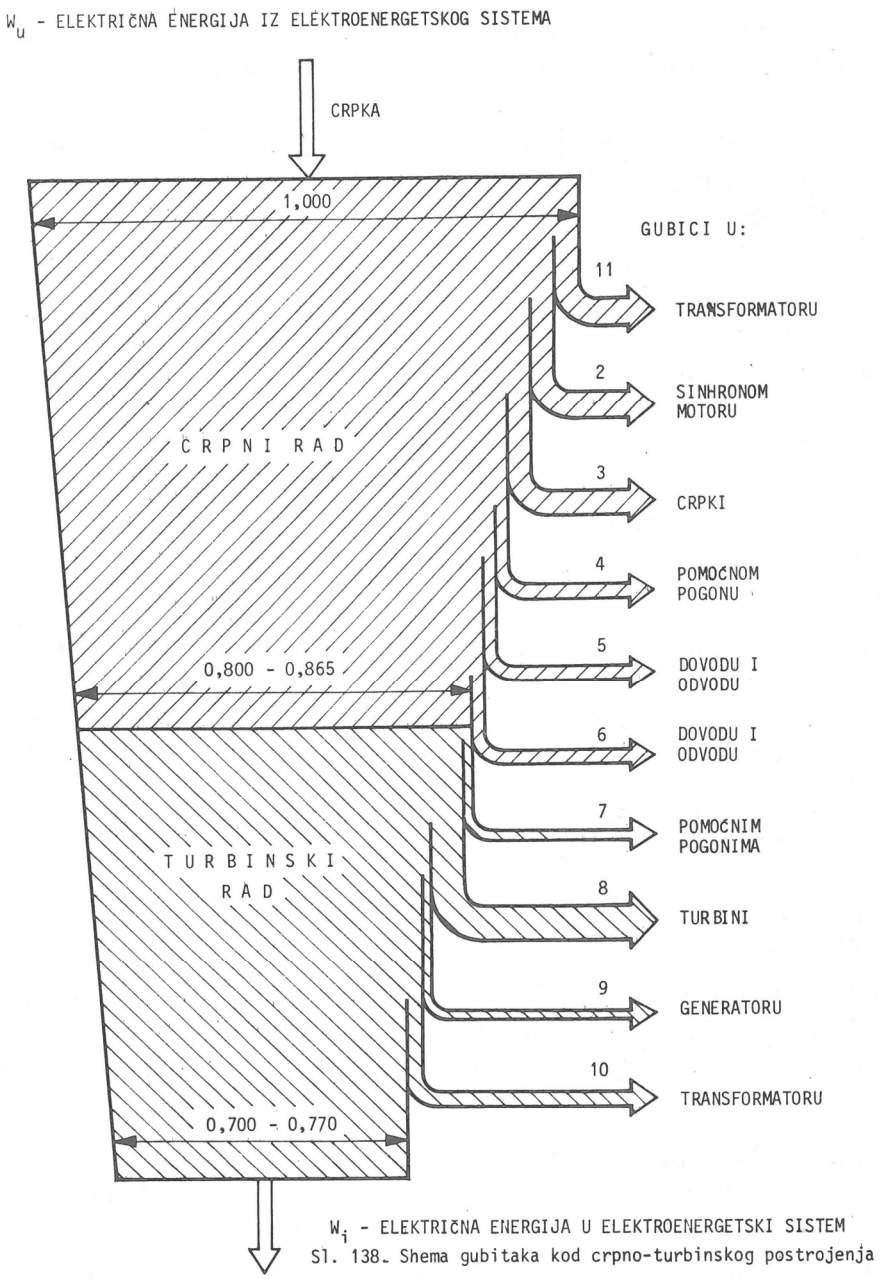
Jedan uređaj služi za pokretanje svih strojeva u elektrani. U ovom slučaju redovito se kao rezervno pokretanje predvidi i "back - to back" metoda. Time je sigurnost (gledajući ukupno elektranu) svedena na nivo ostalih metoda.

Pokretanje statičkim pretvaračima našlo je primjenu najprije kod pokretanja velikih plinskih elektrana i kompresora a tek u posljednjih nekoliko godina i kod velikih crpnih postrojenja.

Određivanje ukupnog stupnja djelovanja crpno-turbinskog postrojenja prikazano je na slici 138, a određuje se kao omjer između isporučene električne energije u elektroenergetski sistem (W_i) i uzete električne energije iz elektroenergetskog sistema (W_n), dakle:

$$\eta = W_i/W. \qquad (378)$$

Razlika između isporučene i uzete električne energije su gubici koji se pojavljuju kod crpnog rada (gubici u: transformatoru, sinhronom motoru, crpki, dovodnim i odvodnim organima i pomoćnim pogonima) i gubici koji se pojavljuju kod turbinskog rada (gubici u: dovodu i odvodu, pomoćnim pogonima, turbini, generatoru i transformatoru).



Sl. 138. Shema gubitaka kod crpno-turbinskog postrojenja

2.9. NEPOSREDNE PRETVORBE OBLIKA ENERGIJE U ELEKTRIČNU ENERGIJU

2.9.1. OPĆENITO

Opisane energetske pretvorbe u točkama 2.1. do 2.8. veoma često se ostvaruju u većem broju etapa, a u svakoj etapi pretvorbe energije nastaju gubici. Pored nastajanja gubitaka u postrojenjima za pretvorbe oblika energije, sama postrojenja za pretvorbe (često i pojedini strojevi) su veoma složena, skupa, teška za održavanje, ograničenog vijeka trajanja itd. Zbog svega toga je stupanj djelovanja postrojenja, za energetske pretvorbe često veoma mali.

Nedostaci klasičnih postrojenja za energetske pretvorbe (osobito težina i veličina) došli su naročito do izražaja kada su se trebale osigurati energetske pretvorbe u astronautici, gdje se od postrojenja za pretvorbe traži da budu: pouzdana, jednostavnija, lakša i sigurnija. Zbog toga su se tražila rješenja neposrednih pretvorbi jednog oblika energije u drugi oblik, a najčešće je to direktna pretvorba oblika energije u električnu energiju.

Danas su poznate i najčešće korištene slijedeće neposredne pretvorbe oblika energije u električnu energiju:

I neposredna pretvorba toplinske energije u električnu energiju

a) termoelektričnim postupkom
b) termoionskim postupkom
c) magnetskohidrodinamičkim generatorima.

II neposredna pretvorba sunčeve energije u električnu - fotoelektrična pretvorba

III neposredna pretvorba kemijske energije u električnu energiju - gorivi elementi (gorive ćelije)

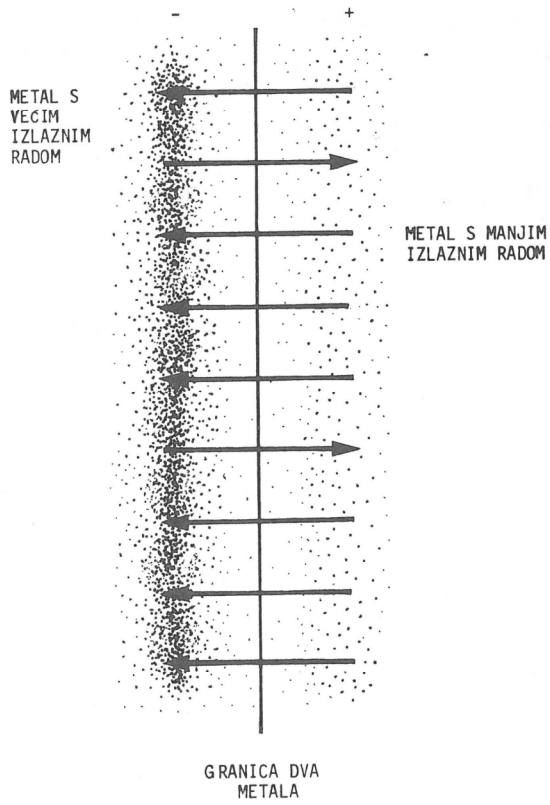
IV kombinacija pretvorbi fotoelektrične i kemijske - fotoelektrokemijska pretvorba.

2.9.2. NEPOSREDNA PRETVORBA TOPLINSKE ENERGIJE U ELEKTRIČNU ENERGIJU

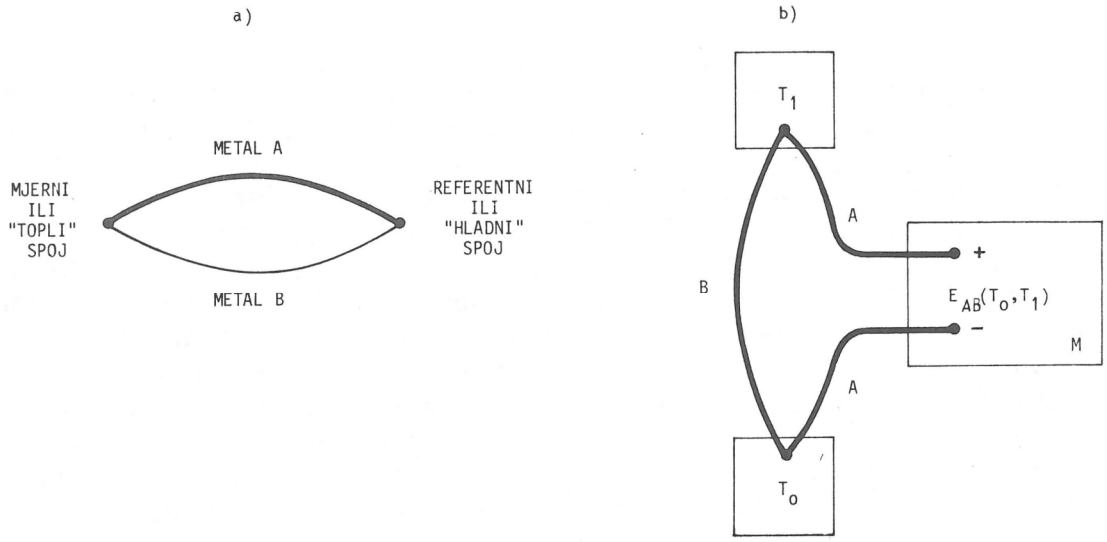
2.9.2.1. Termoelektrična pretvorba

Temeljni princip termoelektrične pretvorbe zasniva se na postojanju kontaktnog napona između dva, po izlaznom radu različita, metala koji su dovedeni u međusobni dodir, odnosno prelasku slobodnih elektrona iz metala u metal i ovisnosti tog prelaska o temperaturi. Prolaz slobodnih elektrona kroz kontaktni sloj metala (ili oksida) ne odvija se potpuno slobodno. Naime, slobodni elektron ne može napustiti površinu metala sve dok se ne svladaju sile koje ih vuku prema unutrašnjosti, odnosno dok se ne uloži određeni rad, tzv. izlazni rad. Veličine izlaznog rada različite su za različite metale i okside, odnosno tanke slojeve oksida na metalima. Slobodni elektroni teže će napuštati površinu metala i oksida s većim izlaznim radom i obrnuto, lakće onih s manjim izlaznim radom. Kao posljedica toga, dodirom dva metala slobodni elektroni lakše će prelaziti iz metala s manjim izlaznim radom u metal s većim izlaznim radom nego obrnuto, pa će se u metalu s većim izlaznim radom skupiti određeni višak slobodnih elektrona, i on će postati negativno nabijen. U metalu s manjim izlaznim radom nastat će manjak slobodnih elektrona, i on će onda postati pozitivno nabijen (sl. 139).

Dakle, kao posljedica dodira (kontakta) dva metala s različitim izlaznim radovima uspostavit će se kontaktni napon. Kontaktni napon je malen i uspostavlja se samo na kontaktnoj površini. Ovisan je o izlaznom radu metala i temperaturi kontakta. S porastom temperature slobodni elektroni u metalu izvode sve intenzivnije termičko gibanje, tj. imaju sve veću kinetičku energiju, odnosno sve veću sposobnost za svladavanje izlaznog rada. Na višoj temperaturi u metal s većim izlaznim radom preći će više slobodnih elektrona, iz metala s manjim izlaznim radom, tj. povećat će se njihov kontaktni napon.



Sl. 139. Princip termoelektrične pretvorbe



Sl. 140. Termopar i spoj za mjerenje termoelektrične elektromotorne sile

Najjednostavniji uređaj čiji se rad zasniva na prije opisanom principu, tj. na principu termoelektrične pretvorbe je termopar (termočlanak) (sl. 140).

Termopar čine dvije žice od dva različita metala sa spojenim krajevima. Jedan spoj (mjerni ili topli spoj) postavljen je u sredini gdje se treba mjeriti temperatura,

dok je drugi (referentni ili hladni spoj) u sredini poznate, tj. referentne, temperature. Nastali napon između dva spoja približno je proporcionalan razlici između temperatura dvaju spojeva i može se mjeriti uključivanjem pogodnog mjernog instrumenta u strujni krug (sl. 140a). Dakle vrijedi

$$V_{AB} = k(T_1 - T_o) \qquad (379)$$

gdje je

k - termoelektrični koeficijent ovisan o materijalima koji čine termopar, a neovisna o njihovim dimenzijama.

Veličina k dakle ovisi o termoparu i predstavlja upravo onaj napon koji se uspostavi uz razliku temperatura 1 K. Za najčešće upotrebljavane termoparove vrijednosti te konstante su

- konstantan - željezo	5.2×10^{-5} V/K
- bakar - konstantan	4.1×10^{-5} V/K
- nikal - željezo	3.2×10^{-5} V/K
- platina - platinarodij	0.6×10^{-5} V/K.

Napon termopara koji nastaje pri razlici temperatura $\Delta T = 1K$ naziva se termoelektrična sila termopara. Termopar silicij - bizmut ima najvišu poznatu termoelektričnu silu koja iznosi 5.2×10^{-4} V.

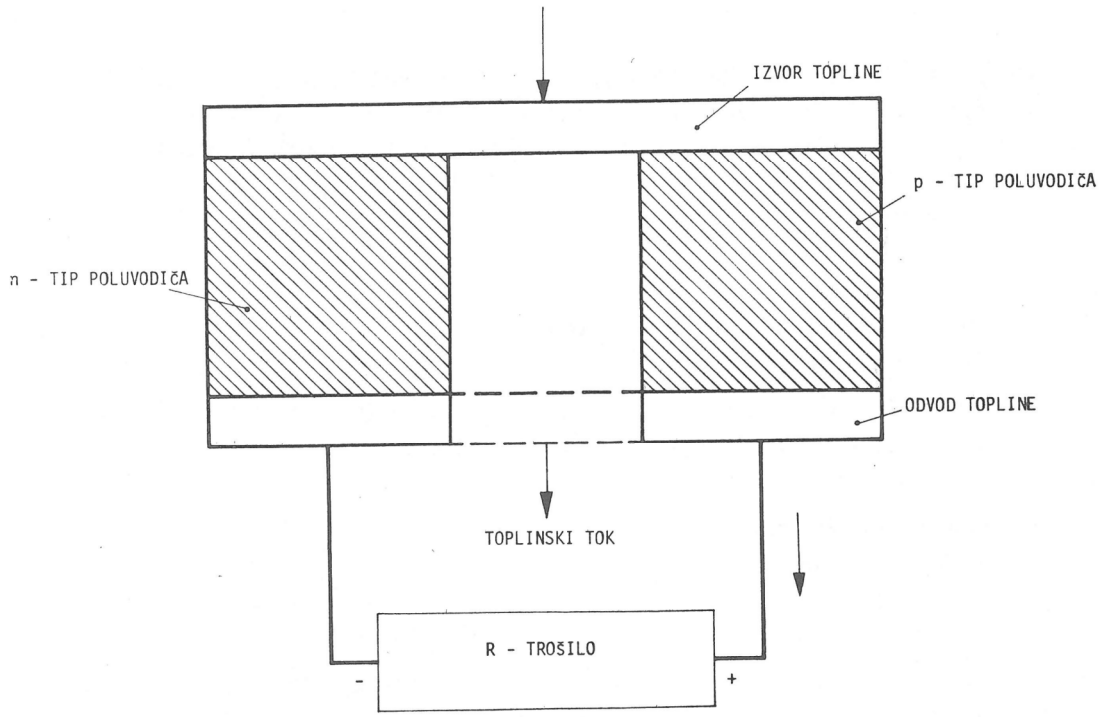
Ako se umjesto mjernog instrumenta u krug termopara uključi električno trošilo, nastali napon potjerat će električnu struju. Dakle, dobiven je izvor električne energije u kojem se toplinska energija neposredno pretvara u električnu energiju. Pri tome se toplinska energija uzima iz spremnika višeg temperaturnog nivoa da bi se dijelom pretvorila u električnu energiju, a dijelom predala okolini, tj. spremniku s nižim temperaturnim nivoom.

Svojstva koja određuju pogodnost upotrebe određenih metala ili kombinacije metala u uređajima za termoelektričnu pretvorbu su: a) stabilnost i obnovljivost elektromotorne sile, tj. njena nepromjenjivost s vremenom; b) konstantnost sastava ili sastav koji se može kontrolirati (male nečistoće ili promjene u sastavu mogu rezultirati značajnim promjenama u izlaznim karakteristikama); c) otpornost na koroziju; d) osjetljivost elektromotorne sile po stupnju promjene temperature; e) širina temperaturnog područja; f) robusnost, tj. pogodnost primjene i uz niži nivo obrade; i g) visina troškova.

Odnosom temperature i proizvedene elektromotorne sile homogenog termopara određeno je fizikalno svojstvo neovisno o dimenzijama termopare, tako da se ista elektromotorna sila dobiva za različite kontaktne površine. Upotrebom tankih žica uz smanjenja mase postiže se i vrlo mala toplinska inertnost "toplih" slojeva. Međutim, zbog ograničene mehaničke čvrstoće takve spojeve nužno je ugrađivati u zaštitne cijevi koje negativno utječu na prenos topline do samog spoja metala.

Svi termoelektrični efekti vezani su za prenosna svojstva nosioca naboja u materijalima. Najvažniji prenosni parametar za analizu termoelektričnih pojava je napon otvorenog kruga po jedinici temperaturne razlike između toplog i hladnog spoja, tzv. Seebeckov koeficijent ili termoelektrična snaga. Naročito dobra termoelektrična svojstva ostvarena su materijalima s malom električnom vodljivošću odnosno poluvodičkim materijalima.

Princip rada termoelektričnosti puluvodiča prikazan je na sl. 141. Jedan broj termopara čini poluvodič n - tipa a drugi poluvodič p - tipa. Zajednički parametri tog



Sl. 141. Poluvodički termopar

termopara su ukupna termoelektrična snaga (Seebeckov koeficijent) spoja S, ukupni unutarnji otpor r, ukupna toplinska vodljivost K. Termoelektrične snage izvoda (poluvodičkih dijelova) su S_n i S_p, njihova električna otpornost ρ_n i ρ_p, a toplinska vodljivost k_n i k_p. Ako su sve te veličine neovisne o temperaturi onda su ukupna termoelektrična snaga, te električna i toplinska vodljivost:

$$S = S_p - S_n = |S_p| + |S_n| \tag{380}$$

$$r = \frac{\rho_n l_n}{A_n} + \frac{\rho_p l_p}{A_p}, \quad \text{i} \tag{381}$$

$$k = \frac{k_n A_n}{l_n} + \frac{k_p A_p}{l_p} \tag{382}$$

gdje su l_n i A_n - dužina i površina n-tipa poluvodiča;
l_p^n i A_p^n - dužina i površina p-tipa poluvodiča.

Stupanj djelovanja termopara iznosi:

$$\eta = \frac{P_{izl}}{Q_{ul}} = \frac{I^2 R}{ST_h I + K(T_h - T_c) + \frac{1}{2} I^2 r}, \tag{383}$$

gdje su P_{izl} - električna energija trošila u vanjskom krugu, tj. izlazna snaga ($P_{izl} = I^2R$);
P_{ul} - ulazna toplina koju čine:
ST_hI - Pelfierova toplina,
$K(T_h-T_c)$ - toplina prijenosa, i
I^2r - Jouleovi gubici odvoda.

gdje su T_h - temperatura "toplog" spoja (izvora topline);
T_c - temperatura "hladnog" spoja (hlađenja).

Tako određeni stupanj djelovanja ne uključuje gubitak izvora topline.

Napon otvorenog kruga iznosi

$$V_o = S\,(T_h - T_c) \tag{384}$$

Struja je, dakle

$$I = V_o\,(R+r). \tag{385}$$

Prikaže li se odnos otpora opterećenja R prema unutarnjem otporu r kao

$$m = R/r, \tag{386}$$

izraz za stupanj djelovanja dobiva oblik

$$\eta = \frac{T_h - T_c}{T_h}\left[\frac{\frac{m}{m+1}}{1 + \frac{m+1}{ZT_h} - \frac{1}{2}\frac{T_h - T_c}{T_h}\left(\frac{1}{m+1}\right)}\right] \tag{387}$$

gdje je $Z = S^2/Kr$ - faktor dobrote (Q - faktor). (388)

Da bi se dobilo optimalno opterećenje termopara, potrebno je optimirati odnos otpora m (jed. 386). Izraz za stupanj djelovanja za optimalni odnos otpora je:

$$\eta = \frac{T_h - T_c}{T_h}\left[\frac{M-1}{M + \frac{T_c}{T_h}}\right] \tag{389}$$

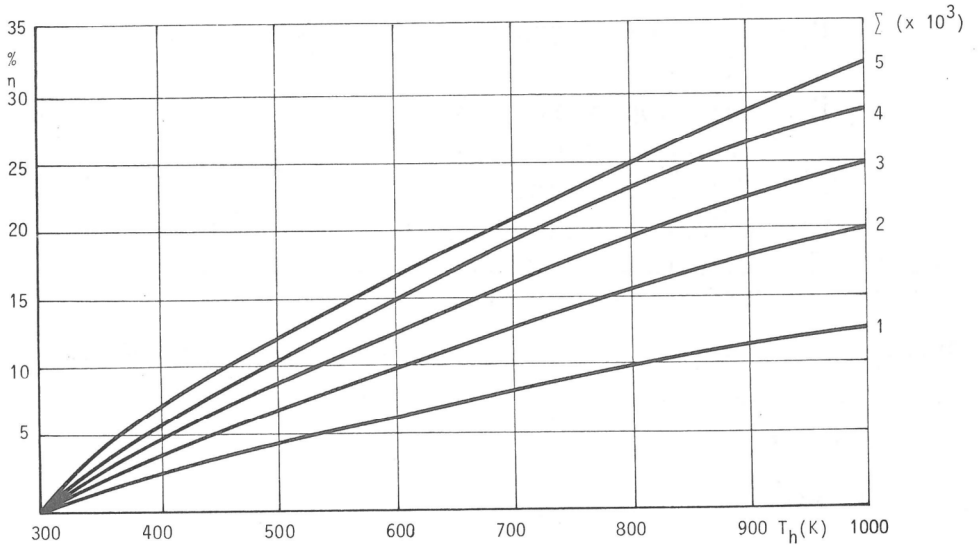
$$\text{gdje je } M = m = \sqrt{\frac{Z(T_h - T_c)}{2}} \quad \text{uz uvjet} \quad \frac{d\eta}{dm} = 0. \tag{389a}$$

Iz izraza za stupanj djelovanja pri optimalnom odnosu otpora (jed. 389) vidljivo je da se on zapravo sastoji od Carnotova stupnja djelovanja

$$\eta_c = (T_h - T_c)/T_h, \text{ i} \tag{390}$$

stupnja djelovanja samog uredjaja

$$\eta_d = \frac{M-1}{M + \frac{T_c}{T_n}} \tag{391}$$



Sl. 142. Odnos stupnja djelovanja prema temperaturi izvora topline

Stupanj djelovanja samog uređaja (η_d) bit će tim veći što je M veći, a uz stalne T_h i T_c, što je faktor dobrote Z veći. Na sl. 142. prikazan je utjecaj faktora dobrote na stupanj djelovanja uz temperaturnu neovisnost parametara. Međutim, općenito ukupni parametri su ovisni o temperaturi. Uz to, temperaturne ovisnosti izvoda p i n-tipa mogu se značajno razlikovati. Sve je to razlog zbog čega je općenito rješenje termopara s temperaturno ovisnim parametrima vrlo teško potpuno određeno prikazati čak i ako su karakteristike ovisnosti poznate. Zbog toga su razvijene približne metode obrada sa srednjim i aproksimiranim vrijednostima. Tu treba dodati i utjecaj titranja rešetke, odnosno, nečistoća na tokove nosioca električnog naboja, itd.

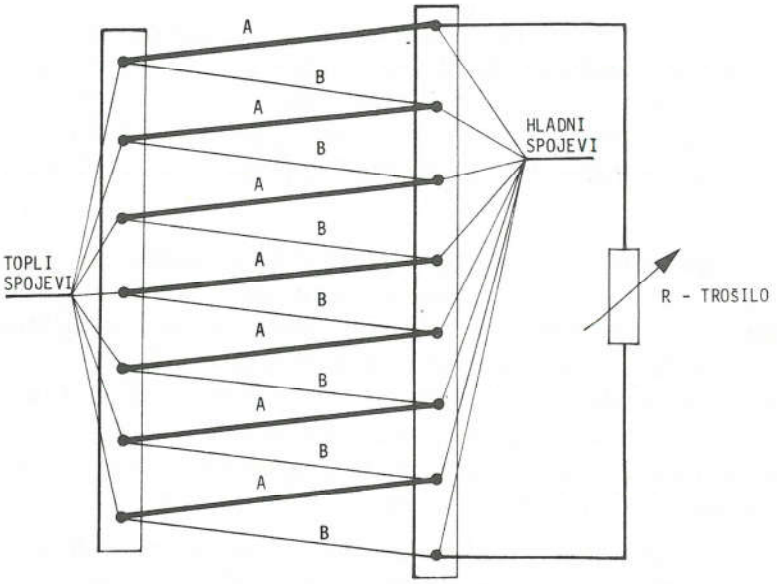
Termoelektrični sistemi u kojima se koriste čak najbolji dostupni materijali još uvijek imaju nedostatak u relativno niskom stupnju djelovanja uz istovremeno visoke troškove po jedinici izlazne snage. Njihova upotreba u proizvodnji električne snage, odnosno grijanju i hlađenju, ograničena je zbog toga na slučajeve u kojima su ti nedostaci manje važni od prednosti kao što su mala veličina, lagano održavanje, nepostojanje potrebnih dijelova, bešuman rad, mala težina i dugi životni vijek.

Mjera iskorištenja termoelektričnog materijala kod proizvodnje snage, hlađenja ili grijanja za datu temperaturu određena je bezdimenzionalnim parametrom ZT, definiranim jednadžbom

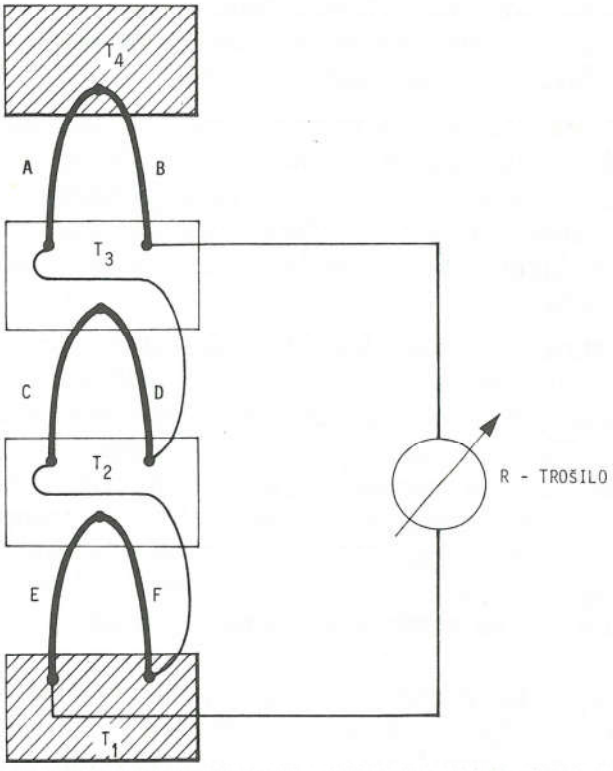
$$ZT = S^2\sigma T/K, \tag{392}$$

gdje je σ - specifična električna vodljivost materijala;
Z - faktor dobrote.

Najveće vrijednosti faktora ZT postižu se kod polumetala i jako dopiranih poluvodiča, što je bio razlog njihove primjene u termoelektričnim uređajima u praksi. Međutim, za većinu materijala faktor dobrote Z jako se mijenja (pada) s temperaturama, višom i nižom. Kombiniranje materijala u termoparove rezultira vrijednostima Z koje su prosječno manje od $1\times10^{-3}K^{-1}$ za temperaturno područje korištenja. Takve vrijednosti faktora dobrote odgovaraju stupnjevima djelovanja pretvorbe od samo nekoliko postotaka. Za komercijalno prihvatljivi stupanj djelovanja oko 30% nužno je, međutim, ostvariti konstantnu vrijednost faktora dobrote jednaku $5\times10^{3}K^{-1}$ za temperaturno područje od 300 do 1000 K.



Sl. 143. Termoćelija - baterija termopara vezanih serijski



Sl. 144. Trostepena kaskada od tri različita termopora

Upravo kao što se faktor dobrote za pojedine materijale mijenja s temperaturom, tako se i faktori dobrote materijala koji čine termoparove mijenjaju s temperaturom. To znači da jedan termopar može biti bolji od drugog - pri jednoj temperaturi, a lošiji pri drugoj. Zbog toga se termoparovi pored često primjenjivanog serijskog spoja (radi dobivanja većeg izlaznog napona) (sl. 143) povezuju i u lokalni spoj (sl. 144).

Kaskadno spajanje omogućuje proizvodnju snage u stupnjevima. Više temperature svakog stupnja određene su toplinom oslobođene od prethodnog stupnja. Najviša i najniža temperatura T_5 i T_1 određene su vanjskim rezervoarima (spremnicima) topline, dok su međutemperature T_4, T_3 i T_2 određene karakteristikama materijala, tj. njihovom toplinskom vodljivošću. Kaskadni spoj omogućuje istovremeno korištenje nizova termoparova u temperaturnim područjima u kojima su njihovi faktori dobrote najveći. Sistemima kaskadno vezanih termoparova postignuti su stupnjevi djelovanja pretvorbe od 10% do 15%.

Uprkos do sada ostvarenim niskim stupnjevima djelovanja i visokim troškovima proizvodnje, od kraja pedesetih godina stavljeni su u upotrebu termopretvarači koji su koristili toplinu oslobođen i raspadom radioaktivnih izotopa ili cijepanjem teških jezgara u reaktorima, energiju Sunčeva zračenja, energiju sadržanu u kemijskim gorivima, itd. Njihova snaga varirala je od nekoliko vata (W) do nekoliko kilovata (kW). U razvoju su sistemi termopretvarača iznad nekoliko megavata (MW). Svi oni uglavnom uključuju poluvodičke materijale kao što su teluridi ili selenidi i ostvaruju stupnjeve djelovanja oko 10%.

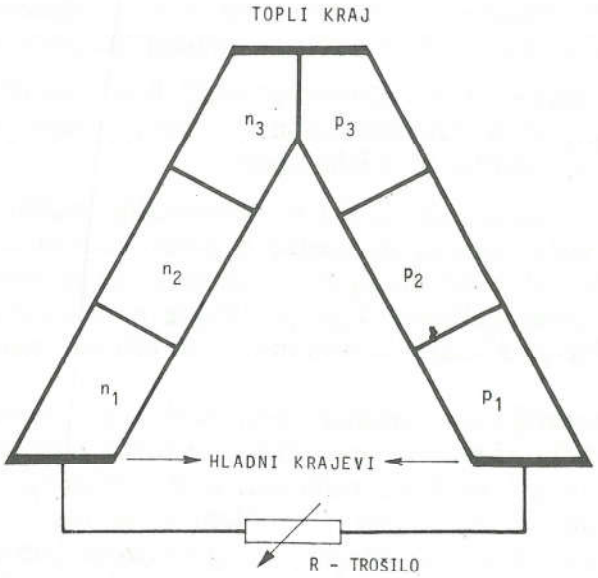
Važan nedostatak termoćelija (serijski vezanih termoparova ili termoelemenata) je taj što njihov unutarnji otpor raste s povećanim brojem serijski povezanih termoparova, postavljajući time gornju granicu izlazne snage. Pokušaj dizanja napona na vanjskim stezaljkama tog izvora snage dao je suprotan rezultat od željenog zbog redukcije izlazne snage iz izvora.

Jedan od pravaca razvoja primjene termoelektričnih pretvorbi su konstrukcije termopretvaračkih poluvodičkih sistema visokih temperatura. Naime, pored toga što poluvodiči daju četrdesetak puta veću elektromotornu silu od metala pri istim temperaturnim razlikama, oni su i dobri toplinski izolatori, i dobro podnose visoke temperaturne gradijente. To je ujedno i osnova za proizvodnju velikih toplinskih elektromotornih sila.

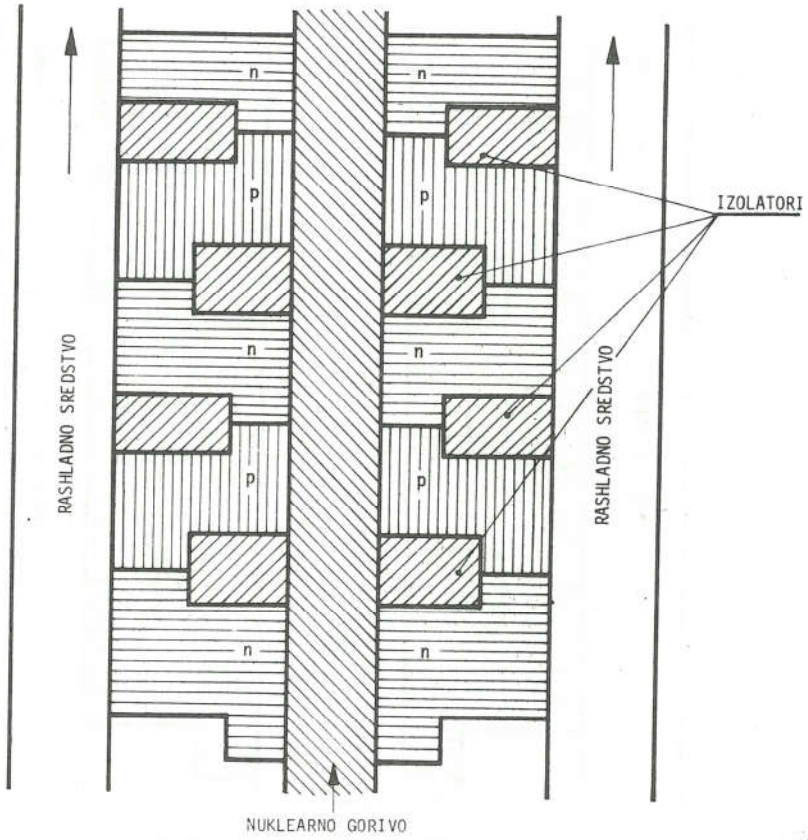
Temperaturna ovisnost karakteristika poluvodiča s druge strane uvjetuju korištenje svake pojedine klase poluvodiča u približno uskom području optimalnih radnih temperatura, dok je toplinska elektromotorna sila direktno proporcionalna toplinskoj razlici. Za visok napon potrebne su nužno i visoke temperature. Poteškoće uzrokovane potrebom za visokim radnim temperaturama i uskim temperaturnim granicama mogu se prevladati konstrukcijom termopretvarača u lokalnoj ili segmentiranoj konstrukciji (sl. 145). Segmenti su odabrani za optimalne karakteristike unutar odgovarajućih radnih temperatura. Segmenti n_3 i p_3 su izvedeni za rad na maksimalnim, a n_1 i p_1 na minimalnim temperaturama.

Najviša radna temperatura koju postojeći poluvodiči mogu izdržati je 808 K, a komercijalno korisno djelovanje termopretvarača traži temperature blizu 1273 K, kod kojih poluvodiči teže inrinstičnosti, tj. izjednačavanju broja pozitivnih i negativnih nosioca naboja, kada se ne proizvodi nikakva toplinska elektromotorna sila.

Termoelektrične pretvorbe topline dobivene u reaktorima cjepanjem jezgri



Sl. 145. Segmentirana konstrukcija termoćelije



Sl. 146. Termopretvarač s nuklearnim gorivom

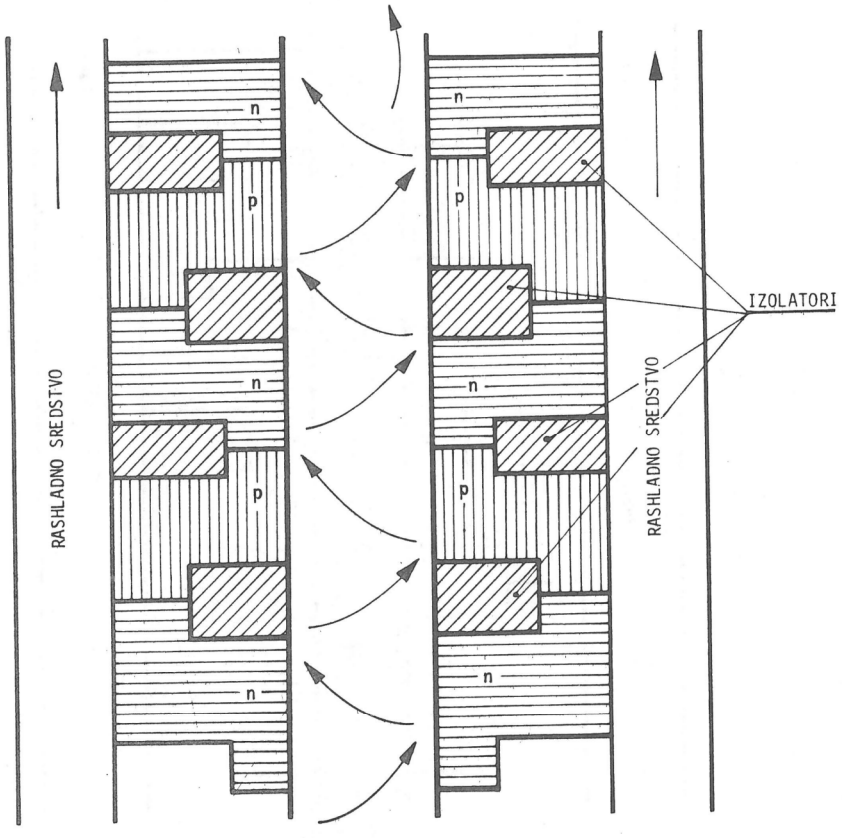
teških elemenata traže dodatno da se riješe problemi negativnog djelovanja visoke radijacije na poluvodičke materijale u dodiru s nuklearnim gorivom (sl. 146).

Na slici 147. prikazan je termopretvarač koji koristi toplinu oslobođenu izgaranjem kemijskog goriva. Ovakav način korištenja vezan je s velikim gubicima ukoliko se upotrebljavaju obična kemijska goriva.

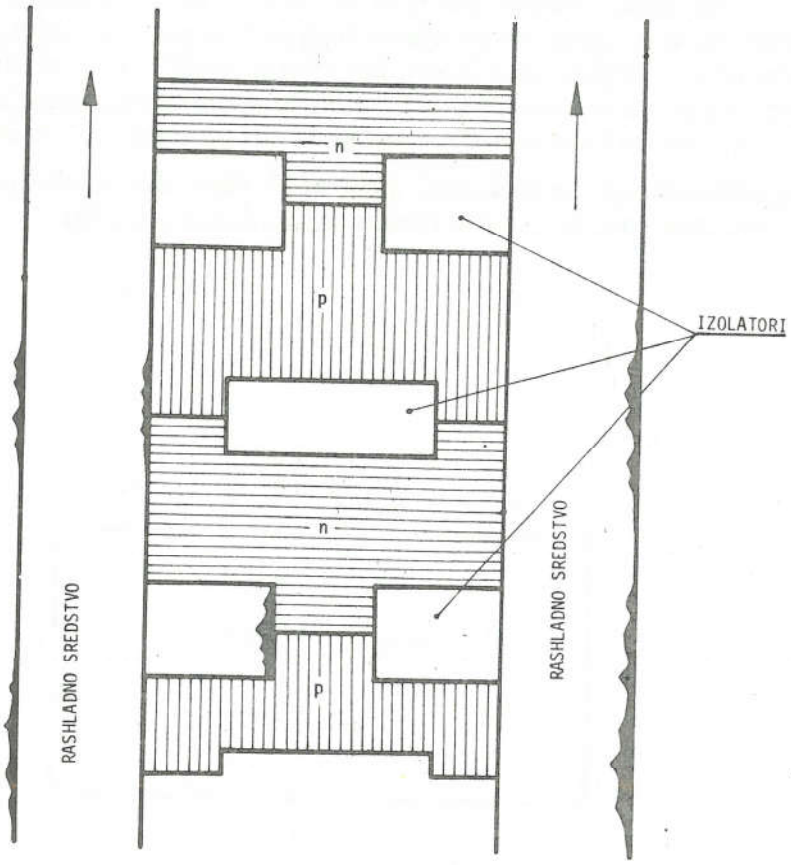
Jedan od načina korištenja je da se termoćelije načine od termoelektričnih elemenata koji su u stvari fisioni materijali s poluvodičkim svojstvima, kao što su uranovi i torijevi sulfidi (sl. 148). Za tipični reaktor snage potrebno je 40 do 50 tisuća gorivih elemenata. S termoćelijama koje proizvode napon od 1V, a u elementu su spojene serijski, rezultirajući izlazni napon mogao bi biti vrlo visok.

Mogućnost komercijalne primjene termopretvarača najviše ovisi o tome da li će se pronaći poluvodički materijali sposobni da zadrže povoljne karakteristike kod visokih temperatura, ili pri visokom radioaktivnom zračenju. Kod termopretvarača koji koriste tekuće poluvodiče dodatni je problem taj što iznos prenešene topline od toplog na hladni spoj raste sa strujanjem (prevozom materijala). Kod čvrstih termopretvarača uzrok prenosu topline je titranje atomske rešetke.

Do sada su izgrađene termopretvaračke jedinice izlazne snage do 5 kW (s nuklearnim gorivom izgrađen je termopretvarač izlazne snage 500 W). Najviše upotrebljavani materijali generatora do sada su bili olovni i bizmutni - teluridi i



Sl. 147. Termopretvarač s kemijskim gorivom



Sl. 148. Termoelektrični pritvarač od fisionog poluvodičkog materijala

njihove legure, i to za temperaturna područja od 300 do 700 K. Kao primarni energetski izvori korištena su ugljikovodična goriva, radioizotopi i solarna energija. Međutim, još uvijek nisu postignuti zadovoljavajući stupnjevi djelovanja. Maksimalno postignuti toplinski stupanj djelovanja je približno 18% i ukupni stupanj djelovanja pretvorbe 5%.

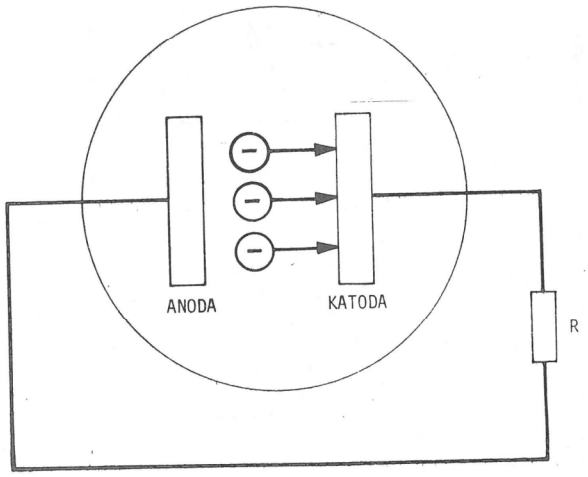
Za komercijalnu upotrebu bit će potrebno riješiti i probleme kao što su: niska električna i toplinska otpornost spojeva, niska mehanička čvrstoća i podnošenje toplinskih i mehaničkih udara, toplinski gubici radi slaganja termoelemenata, niska efikasnost izgaranja goriva, prenos topline duž termoelemenata, način ulaganja radi smanjenja težine, dugoročna kontaminacija termoelemenata difuzijom, itd.

2.9.2.2. Termoionska pretvorba

Termoionska emisija je jedan od najjednostavnijih oblika neposredne pretvorbe toplinske energije u električnu energiju. Zasniva se na principu da se pri zagrijavanju metala dovođenjem toplinske energije iz metala oslobođaju elektroni. Naime, zagrijavanjem se povećava kritična energija slobodnih elektrona. Kada ta energija postane dovoljna za svladavanje izlaznog rada, elektroni se oslobađaju iz metala.

Pri normalnim temperaturama određeni broj elektrona napušta površinu svakog vodljivog materijala, samo njihov broj je zanemarivo malen, čak tako malen da je elektrone teško i registrirati. Međutim, ako se vodljivi materijali zagriju na visokim temperaturama (od 1000 do 2500 K), veliki broj elektrona napušta njihovu površinu. Kod većine metala do termoionske emisije dolazi na temperaturi 2000 K.

Najjednostavniji termoionski pretvarač čine dva metalna elementa, emiter (katoda) i kolektor (anoda), dakle termoionska dioda (sl. 149).



Sl. 149. Termoionski pretvarač

Da bi se iz emitera (katode) oslobodio elektron, potrebno je emiteru dovesti energiju. Jedan njezin dio troši se za oslobađanje elektrona iz metala, a drugim se elektronom daje neka početna brzina (kinetička energija). Dakle vrijedi

$$E = \varphi + mv^2/2, \tag{393}$$

gdje je

E - dovedena toplinska energija;
φ - izlazni rad metala, ili energija potrebna za "izvlačenje" elektrona iz metala;
$mv^2/2$ - kinetička energija elektrona izvan metala.

Za pretvorbu toplinske energije u električnu energiju upotrebljavaju se elektrode otpornih metala, koji imaju veći izlazni rad, prevučene tvarima koje imaju male izlazne radove. Najčešće se kao takve tvari upotrebljavaju zemno-alkalni oksidi, jer oni imaju najmanje izlazne radove.

Zadovoljavajuće emisije elektrona takvih elektroda ostvaruju se već pri temperaturama crvenog sjaja.

Kolektor, odnosno anoda, je elektroda na znatno nižoj temperaturi od emitera i to takvoj da je njegova emisija elektrona zanemariva. Elektroni koje je emitirala katoda prelaskom na anodu dio kinetičke energije predaju anodi, što izaziva njezino

zagrijavanje, a dio se troši za tok elektrona od anode kroz vanjski strujni krug, trošilo i natrag na katodu.

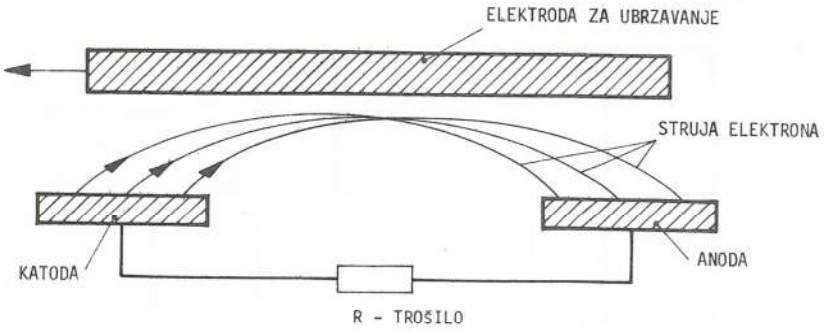
Anoda se nikada ne smije temperaturno izjednačiti s katodom, jer bi se tada uspostavila i ravnoteža emisije elektrona, odnosno pretvorba bi prestala. Dio toplinske energije koji se pretvara u električnu energiju raste s povećanjem temperaturne razlike između elektroda.

Prostor između elektrode (pretvarača) mora biti dovoljno evakuiran (vakumski termoionski pretvarač), tako da preostali plin ima zanemarivi utjecaj na tok elektrona od emitera prema kolektoru. Naime, elektroni nastali u prostoru između elektroda, kao i oni nastali sekundarnom emisijom s površine anode, stvaraju barijeru prostornog naboja blizu katode koja smanjuje ili sprečava prelazak elektrona s katode na anodu, odnosno smanjuje gustoću struje u vanjskom strujnom krugu.

Djelovanje barijere prostornog naboja može se smanjiti: smanjenjem razmaka elektroda, ubrzavanjem elektrona ili upotrebom pozitivnih iona, odnosno ioniziranog plina u prostoru između elektroda.

Prvi način smanjenja negativnog djelovanja barijere prostornog naboja zasniva se na konstrukciji termoionskog pretvarača u kojem su elektrode postavljene veoma blizu (u 5×10^{-6} m, ili maksimalno 12.7×10^{-6} m). Osnovni problem toga rješenja je taj što se elektrode grijanjem iskrivljuju, što može dovesti do njihovog fizičkog kontakta. Međutim, već su ostvareni termoionski pretvarači - volumenske diode za specijalne namjene s vrlo malim razmacima elektroda.

Drugi način smanjenja barijere zasniva se na ubrzanju elektrona koji napuštaju katodu upotrebom elektrode za ubrzanje koja se drži na visokom pozitivnom potencijalu i magnetskog polja za ispravljanje putanje elektrona (sl. 150).



Sl. 150. Ubrzanje elektrona u termoionskom pretvaraču

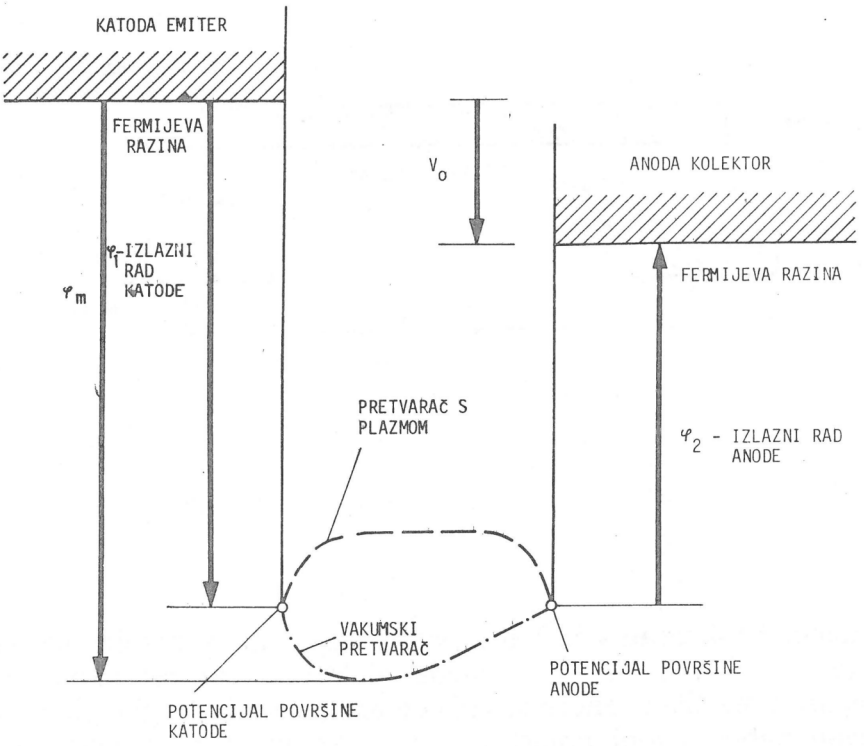
Treći način poništavanja barijere prostornog naboja zasniva se na uvođenju brzo ionizirajućeg plina u prostor između elektroda. Atomi plina se ioniziraju sudarima s elektronima čija je energija veća od ionizacione energije plina. Ionizacijom nastali pozitivno nabijeni ioni poništavaju barijeru prostornog negativnog naboja. Gustoća plina koji se uvodi mora biti jednaka ili na mjestima veća od gustoće prostornih elektrona koji čine barijeru da bi se neutralizirao cjelokupni negativni naboj. U tu svrhu najčešće se koristi cezijeva para koja ima ionizacioni potencijal 1.89

V, s tim da je katoda izrađena od volframa koji ima izlazni rad 4.50 eV. Zbog prisustva pozitivnog naboja ioniziranog plina neto električni naboj u prostoru između elektroda ne postoji. Termoionski pretvarači koji koriste takav način poništavanja barijere imaju dobru vodljivost kroz tu sredinu, tzv. plazmu, u kojoj je neto električni naboj jednak nuli. Kako je prije navedeno, broj emitiranih elektrona, odnosno gustoća struje u termoionskom pretvaraču ovisna je o temperaturi emitera i njegovom izlaznom radu odnosno temperaturnoj razlici emitera i kolektora. Izlazni rad emitera određuje se kao razlika energija između Fermijevog nivoa vodiča i potencijalne energije elektrona koji miruju upravo izvan vodiča (sl. 151). Kod termoionskog pretvarača kod stvarnih uvjeta rada Fermijev nivo kolektora mora biti negativan u odnosu na Fermijev nivo emitera da bi se električna snaga dovela u vanjski strujni krug. Očito je da izlazni rad kolektora mora biti što manji, kako bi se dobila što veća razlika potencijala, a time i snaga na trošilu u vanjskom krugu. Radi ilustracije, na sl. 151. potencijali površina elektroda postavljeni su na istu energetsku vrijednost, što u stvari odgovara radnim uvjetima. Na priključcima pretvarača pojavit će se izlazni napon V_o, kao razlika između potencijala Fermijevih nivoa, odnosno izlaznih radova emitera i kolektora.

Na istoj slici prikazana je i razlika u uvjetima rada između pretvarača s plazmom i vakumskog pretvarača. Kod pretvarača s plazmom struja koja se prenosi kroz prostor između elektroda može biti skoro jednaka raspoloživoj struji na emiteru uz maksimalnu gustoću struje datu jednadžbom:

$$J = 120\, T_1^2 e^{-(\varphi_1 q/kT_1)}\ [A/cm^2], \tag{394}$$

gdje je:



Sl. 151. Energetski odnosi u termoionskom pretvaraču

T_1 - temperatura emitera;
φ_1 - izlazni rad emitera;
q - naboj elektrona;
k - Boltzmanova konstanta.

Uz prisutnost prostornog naboja, kao što je slučaj kod vakumskog pretvarača, u jednadžbu (394) potrebno je umjesto φ_1 uvrstiti φ_m da bi se odredila maksimalno raspoloživa gustoća struje. Naime, dok kod pretvarača s plazmom nema zaprečnog djelovanja prostornog naboja i struja može dostići maksimalnu struju emitera, kod volumskog pretvarača prisutan je negativni utjecaj prostornog naboja (koji se može predstaviti i kao odgovarajuće povećanje izlaznog rada).

Izlazna snaga predstavlja umnožak izlaznog napona i struje, pa, prema jednadžbi (394) odnos φ_1/T_1 mora biti što manji da bi se postigla visoka gustoća struje. Da se ne bi žrtvovao izlazni napon, traženi odnos može se postići podizanjem temperature, a to znači upotrebu vatrostalnih materijala kao što su volfram, molibden i tantal koji mogu podnijeti vrlo visoke temperature. Kako su to materijali s relativno visokim vrijednostima izlaznog rada nužno ih je koristiti tako da su pokriveni elektropozitivnim metalima s malim izlaznim radom.

Tako npr., iz spremišta cezija koje se drži u temperaturnom području od 650 do 650 K može se osigurati dovoljno cezija na površini emitera da se ostvari ukupni izlazni rad oko 3 eV. Ujedno, cezijevi ioni stvoreni na grijanoj površini emitera u dovoljnoj mjeri vrše neutraliziranje prostornog naboja vakumskih pretvarača povećavajući njihovu konkurentnost u odnosu na pretvarače s plazmom. Adsorpcija cezija na hladnoj površini kolektora dodatno snizuje njegov izlazni rad na vrijednosti oko 1.8 eV, a u dobro kontroliranim uvjetima čak i niže.

Kako je već navedeno, problem predstavlja i povratna emisija elektrona s kolektora koja može izazvati smanjenje struje. Da bi se ona smanjila, kolektor, koji uz to ima i nizak izlazni rad, mora se držati na niskoj temperaturi. Procjenjuje se da bi zadovoljavajuća temperatura kolektora T_2, pri kojoj bi se povratna struja smanjila ispod 2%, struja koja odgovara gustoći prema jednadžbi (394), trebala biti

$$T_2 = T_1 \frac{\varphi_2}{\varphi_1 + 2.6 \times 10^{-4} T_1} \qquad (395)$$

gdje je

φ_2 - izlazni rad kolektora.

Termoionska emisija koristila se do sada za provođenje električne struje kroz vakumske cijevi. U konvencionalnim vakumskim cijevima snaga koja se troši za grijanje katode iznosi oko 10 W, dok je izlazna raspoloživa snaga s anode 1×10^{-6} W. Rezultirajući stupanj djelovanja energetske pretvorbe iznosi dakle 1×10^{-5}%. To je zanemariva vrijednost, čija i milion puta veća vrijednost još uvijek ne bi termoionsku pretvorbu učinila komercijalnom pretvorbom.

Međutim, nagli suvremeni razvoj novih materijala i tehnologija omogućili su da moderni termoionski pretvarači s vakumskim cijevima podignu korisnost na 20%.

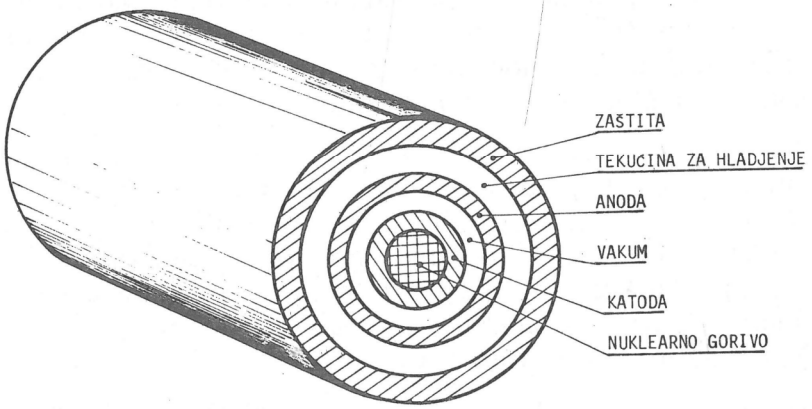
Očekuje se da će uskoro visokotemperaturni pretvarači s plazmom biti sposobni da u vanjski strujni krug daju snagu koja odgovara gustoći snage na emiteru od 10 do 40 W/km^2, što bi značilo stupanj djelovanja pretvorbe blizu 20%, mjereno prema stvarno datoj toplini emiteru.

Izvori topline za grijanje katode (emitera) mogu biti različiti.

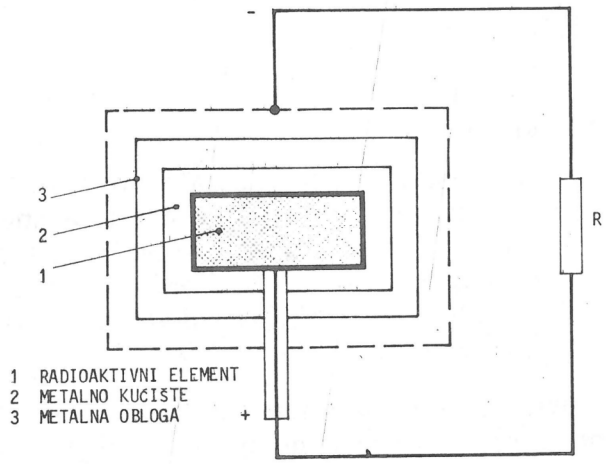
Na svemirskim brodovima i na Zemlji to je solarno zračenje prikupljeno i koncentrirano na pogodan način.

U nuklearnim termoionskim pretvaračima to je nuklearno gorivo (sl. 152). Stupanj djelovanja prvih pretvarača tog tipa je oko 15%, a očekuje se da on može biti podignut na iznos oko 40%.

Do sada, u termoionskim pretvaračima elektroni su emitirani od katode kao rezultat dovođenja topline katodi. Međutim, zahvaljujući prirodnoj radioaktivnosti nekih elemenata, s njihovim radioaktivnim raspadom emitiraju se elektroni (β - čestice), što se može iskoristiti za direktnu pretvorbu nuklearne energije u električnu energiju (sl. 153).



Sl. 152. Termoionski pretvarač s nuklearnim gorivom

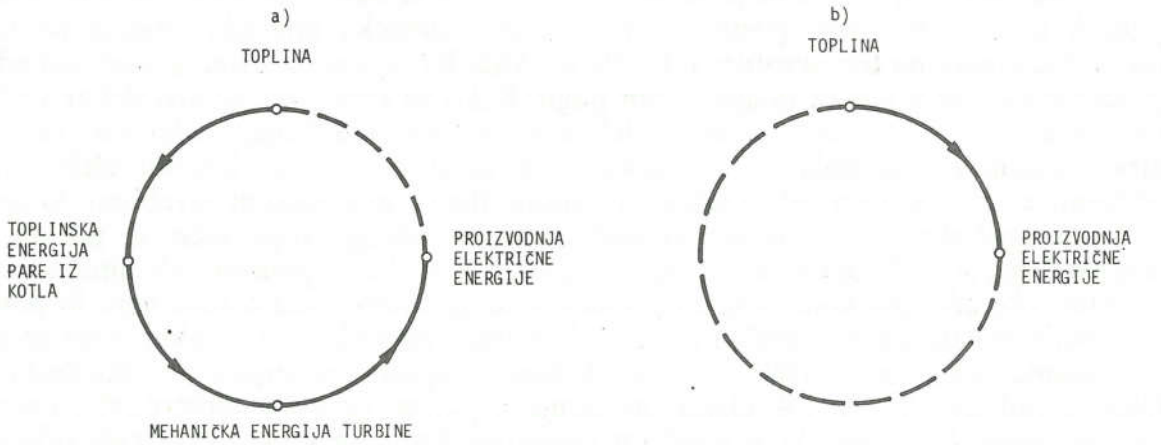


Sl. 153. Direktna pretvorba nuklearne energije u električnu energiju

2.9.2.3. Magnetohidrodinamički generator (MHD generator)

Magnetohidrodinamički generator je uređaj koji toplinsku energiju nastalu izgaranjem goriva direktno pretvara u električnu energiju (sl. 154b), dakle bez posrednih pretvorbi u unutrašnju energiju pare i mehaničku energiju turbine, odnosno generatora (sl. 154a) koje neizbježno uključuju nove gubitke i snizuju ukupni stupanj djelovanja kružnog procesa energetskih pretvorbi u klasičnim termoelektranama. Kod MHD generatora kružni proces je znatno kraći i odvija se na znatno višim temperaturama, što se može iskoristiti za povećanje stupnjeva korisnog djelovanja kružnih procesa postojećih postrojenja za energetske pretvorbe. Naime, temperature izgaranja u ložištima kotlova (generatora pare) modernih termoelektrana prelazi 2250 K, ali se zbog ograničene toplinske otpornosti materijala lopatice parnih turbina ne smiju zagrijati iznad 1050 K. Uzevši u obzir da je stupanj djelovanja Carnatova teoretskog kružnog procesa ovisan o maksimalnoj i minimalnoj temperaturi djelatne tvari, tj. temperaturama između kojih se odvija kružni proces, maksimalno mogući stupanj djelovanja manji je od 0.6. Kako u praksi nema savršenih kružnih procesa, maksimalni stupnjevi djelovanja koji se postižu s danas tehnički izvedivim procesima niži su od teoretske vrijednosti i iznose 0.45. Da bi se ti stupnjevi djelovanja povećali u postojećim tehničkim procesima i tako ostvarila maksimalna mehanička energija, trebalo bi postići vrlo visok omjer tlakova p_{max} i p_{min} (p_{max}/p_{min}). Međutim, za temperature što ih materijali lopatica toplinskih strojeva danas mogu izdržati, te vrijednosti nije moguće praktički ostvariti.

Vodljivi materijali kod MHD generatora su ionizirani plinovi, a da bi se plinovi učinili električki vodljivi koliko je to potrebno, uvjeti rada zahtjevaju temperature iznad 2250 K (3000-3300 K). Prema tome, zajedničkim radom MHD generatora i parnih turbo-generatorskih jedinica stupnjeve djelovanja bilo bi moguće podići na vrijednosti od 0.5 do 0.6. Toplinska energija plinova izgaranja najprije bi se u MHD generatoru direktno pretvarala u električnu energiju, a zatim bi se preostala toplinska energija plinova koji napuštaju kanal MHD generatora, a koji još uvijek imaju visoke temperature, koristila u klasičnim turbogeneratorskim jedinicama. Time bi se znatno unaprijedile postojeće energetske pretvorbe, odnosno povećalo iskorištenje goriva. To je danas jedan od osnovnih ciljeva na području energetske tehnologije.

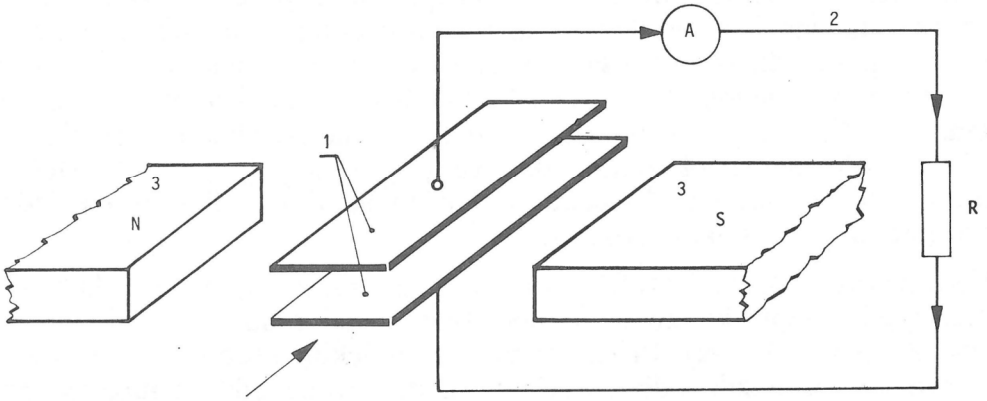


Sl. 154. Shema pretvorbe oblika energije
a) ciklus snaga-para
b) magnetohidrodinamski ciklus

Osnovni je problem pronaći materijale sposobne da podnesu uvjete tako visokih temperatura, a da uz to budu i komercijalno povoljni. Današnja saznanja i dostignuća u nuklearnoj fizici i fizici plazme, te metalurgiji i drugim granama znanosti i tehnologije nude realne osnove za rješenje toga problema.

Princip rada MHD generatora temelji se na Faradayevom zakonu elektromagnetske indukcije koji kaže da se elektromotorna sila inducira u vodiču koji se kreće u magnetskom polju, neovisno o agregatnom stanju vodiča.

Da bi se plin učinio električki vodljiv koliko je to potrebno, mora se zagrijati na temperature iznad 2250 K. Problemom dinamike električnog vođenja plinova koji su podvrgnuti djelovanju magnetskog polja bavi se posebna grana znanosti - magnetohidrodinamika.



Sl. 155. Princip rada MHD generatora

R-vanjska trošila
1-elektrode
2-vanjski vodič
3-polovi magneta

Na slici 155. prikazan je temeljni princip rada MHD generatora. Ionizirani plinovi, tzv. plazma, koji posjeduju vrlo veliku kinetičku energiju gibanja čestica (plinovi zagrijani na temperature od 3000 do 3300 K) prolaze u istom smjeru između ploča smještenih u jakom magnetskom polju. Kako su ionizirani plinovi dobar vodič električne struje, prema zakonu elektromagnetske indukcije, inducirat će se elektromotorna sila, koja će uzrokovati tok električne struje između elektroda, odnosno unutar kanala generatora, a samim tim i u vanjskom strujnom krugu. Elektromagnetske sile, nastale međudjelovanjem struje koja teče u plazmi i magnetskog toka, djeluju tako da usporavaju tok ioniziranih plinova, oduzimajući im dio kinetičke energije koju posjeduju, dakle analogno kao i kod čestica pare ili plina na lopaticama parnih ili plinskih turbina. Kinetička energija čestica plina troši se za svladavanje elektromagnetskih sila koje djeluju u suprotnom smjeru od toka čestice. Uloženi rad troši se na tok električne struje u plazmi (između elektroda) i preko vanjskih vodiča, odnosno kroz trošilo u vanjskom strujnom krugu. Prikazani princip osnova je na kojoj se toplinska energija električki vodljivih (ioniziranih) plinova koji prolaze kroz kanal (cijev) MHD generatora direktno pretvara u električnu energiju.

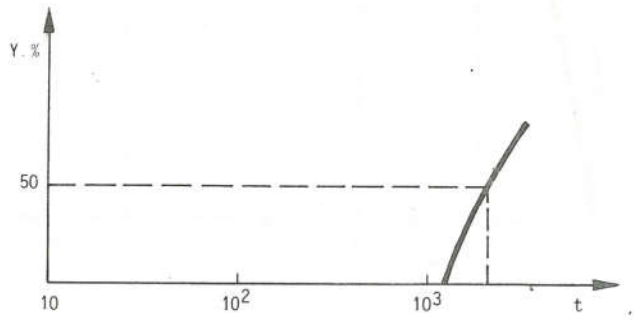
Ovdje je potrebno reći nešto više o ioniziranim plinovima, odnosno plazmi.

Plazma je četvrto stanje materije u kojem su elektroni potpuno odvojeni od jezgara, oko kojih tvore zajednički oblak tzv. slobodnih elektrona.

Kada se plin zagrije, vanjski elektroni se odvajaju od atoma (molekula) kao rezultat višestrukih sudara među atomima, pa tako plin, koji je na temperaturama ispod 2250 K električki neutralan, postaje vodljiv.

Kod još viših temperatura (3300 K i višim) neki plinovi prelaze u stanje tzv. nisko-temperaturne plazme koju čine slobodni atomi, ioni nastali disocijacijom i elektroni. Nisko-temperaturna plazma ima svojstvo električne vodljivosti, koja je ovisna o temperaturi i stupnju ionizacije (sl. 156. i 157). Kod 3300 K, kada je stupanj ionizacije nizak (oko 0.1%), vodljivost je oko 50%. Poveća li se stupanj ionizacije na 1%, vodljivost se poveća na 80%. Da bi se postigla potpuna ionizacija plina potrebne su vrlo visoke temperature, tj. vrlo velike količine energije, a doprinos vodljivosti je tek 20%. Prema tome, za praktične svrhe nije potrebno ići na visoke stupnjeve ionizacije jer je potrebno mnogo više energije uložiti za relativno mali doprinos vodljivosti.

Jedan od osnovnih problema rada s nisko-temperaturnom plazmom, a samim time i MHD generatora, je održavanje i upravljanje procesa i toka ioniziranih plinova (plazme) zbog gubitaka snage i vrlo jake korozije prostora za loženje, kanala i mlaznica. Gubici snage i korozije uglavnom ovise o vrsti plina, te o temperaturama i trajanju zagrijavanja i ekspanzije, odnosno o prirodi i brzini reakcije.

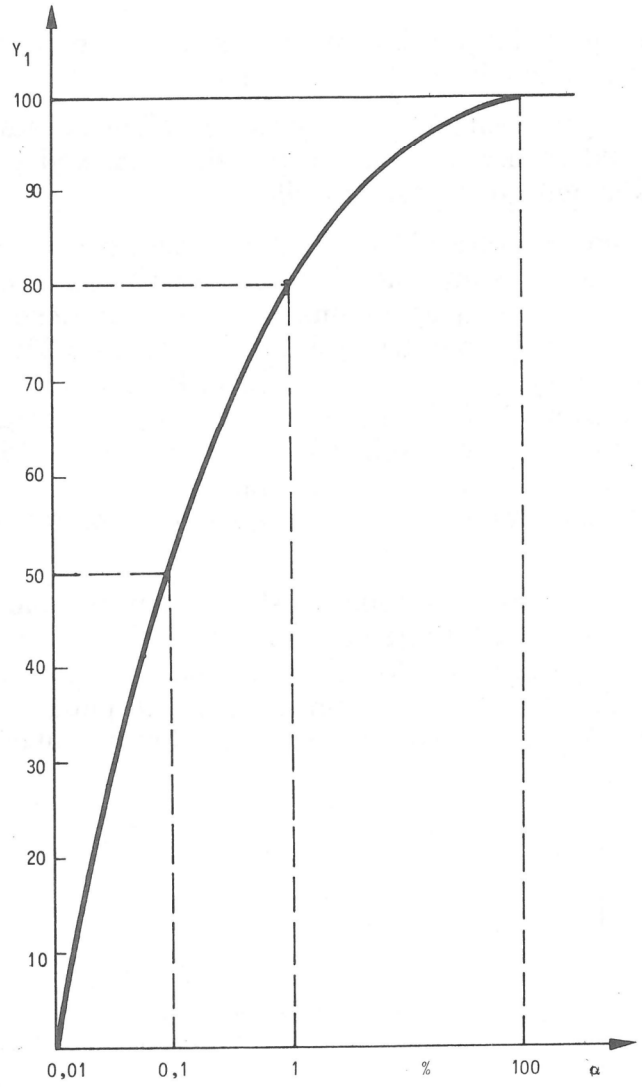


Sl. 156. Vodljivost plazme ovisno o temperaturi

Veliki napredak predstavljalo je otkriće da se dodatkom brzo ionizirajućih alkalnih metala (kalij i natrij) električna vodljivost plina višestruko povećava (~ 10^4 puta), uz istovremenu mogućnost snižavanja temperatura na vrijednosti od 2750 do 2950 K. Međutim, još uvijek je ostao nerješen problem materijala koji bi imao dovoljnu otpornost prema koroziji i agresivnosti radnog medija, tj. plazme.

Shema MHD generatora u spoju s normalnim procesom pare prikazana je na sl. 158.

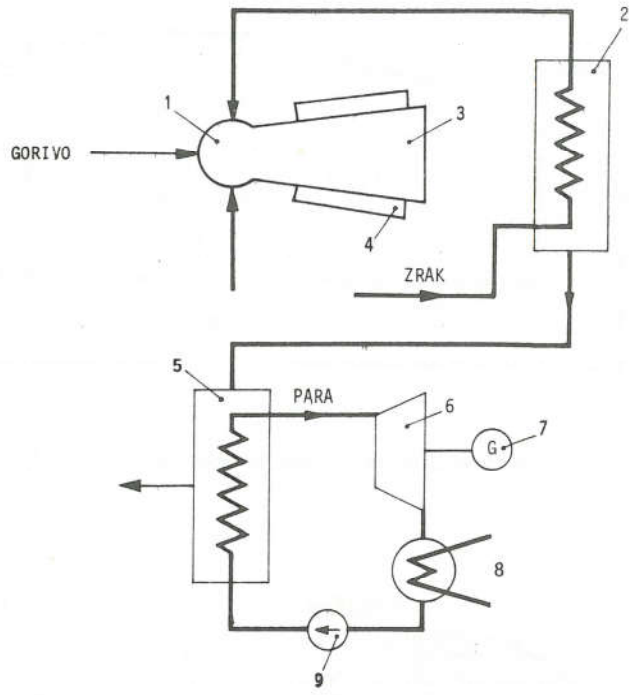
Izgaranjem goriva u komori za sagorjevanje oslobađa se velika količina toplinske energije koja produkte izgaranja (ionizirane plinove) dovodi u stanje plazme. Ovi se zatim usmjeravaju u divergentnu cijev (mlaznicu) MHD generatora, gdje prolaze kroz jako magnetsko polje kojeg stvaraju elektromagneti postavljeni oko cijevi (mlaznice). Plinovi izgaranja na ulazu u cijev moraju biti na temperaturi od 2750 do 3050 K, dok temperatura plina koji napušta cijev ne smije biti ispod 2250 K. To



Sl. 157. Vodljivost plazme ovisno o stupnju ionizacije

ograničenje uvjetovano je vrlo slabom električnom vodljivošću, odnosno slabim ili zanemarivim magnetohidrodinamičkom interakcijom s magnetskim poljem za temperature ispod navedenih.

Plinovi izgaranja, kojima je dio energije oduzet u MHD generatoru, nakon izlaska iz cijevi koriste se za zagrijavanje zraka koji se dovodi u komoru za sagorjevanje. Time se povećava stupanj djelovanja izgaranja goriva. Preostala toplina plinova izgaranja koristi se u generatoru pare za proizvodnju pare odgovarajućih parametara tlaka i temperature. Iako je temperatura plinova izgaranja na izlazu iz cijevi MHD generatora oko 2250 K, izmjenjivači toplilne ne mogu podnijeti temperature iznad 1050 K, zbog čega se dio topline gubi hlađenjem plina. Osnovni problem i zapreka izgradnje MHD elektrana prema postavljenom principu su, kako je već prije navedeno, nemogućnost materijala da duže izdrže takve agresivne sredine na visokim temperaturama, odnosno uvjete s kojima se susreće raketna tehnologija, ali sada u znatno dužem trajanju. Osim toga, nužno je da proizvodnja električne energije bude i komercijalna (ekonomski opravdana).



Sl. 158. MHD generator u spoju s normalnim procesom pare

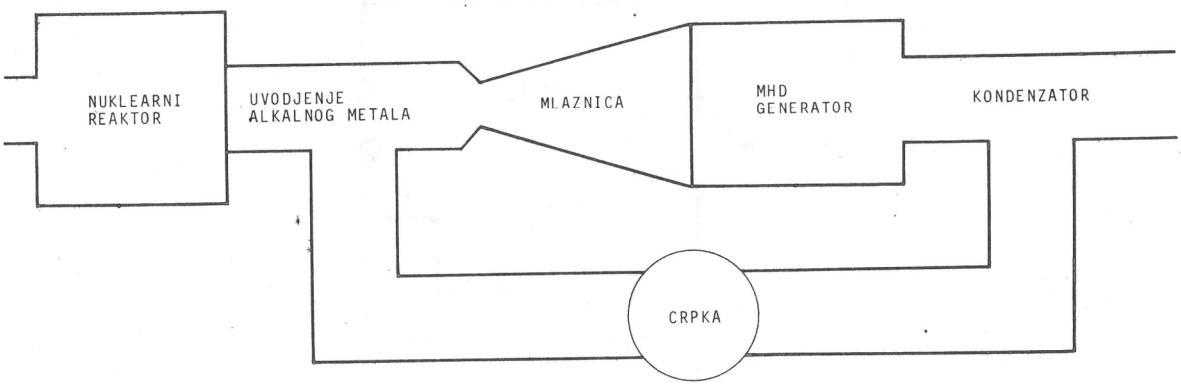
1-komora za izgaranje, 2-izmjenjivač topline, 3-MHD generator, 4-elektromagnetska zavojnica, 5-generator pare, 6-turbina, 7-električki generator, 8-kondenzator i 9-crpka

Temperaturna otpornost materijala ovisi ne samo o svojstvima samog materijala, nego i o tvari koja ga okružuje. Uvođenjem u plazmu alkalnih metala ta se temperatura snizuje, pa se u tom pogledu postavljaju blaži zahtjevi na svojstva materijala, ali s druge strane znatno se pojačava korozivno djelovanje, što unosi nova, dodatna, ograničenja.

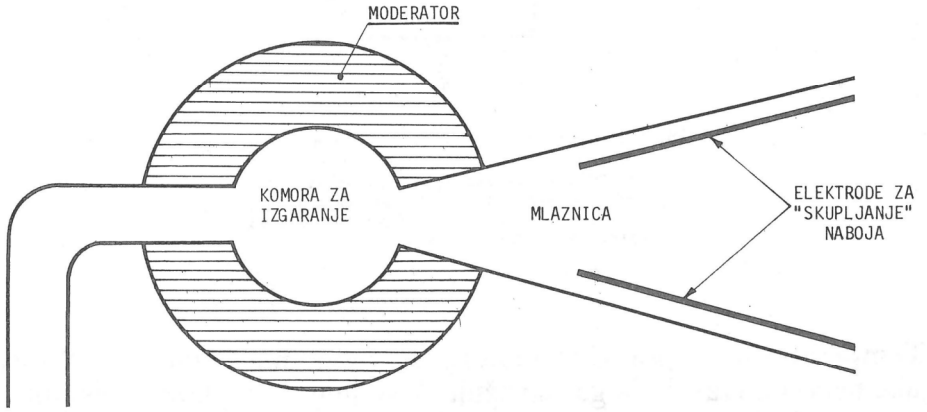
Postoje materijali koji mogu podnijeti i takve uvjete radnih temperatura oko 2750 K (npr. profit i magnezijev oksid), ali oni imaju vrlo malu sposobnost da podnesu mehaničke udare. Osnovni problem, odnosno cilj je da se dobre i odgovarajuće karakteristike koje su svojstvene različitim materijalima objedine u jednom materijalu koji bi se koristio u izgradnji MHD generatora. Istraživanja se vrše i u smjeru da se što više snize temperature koje osiguravaju zadovoljavajuću električnu vodljivost. Tako npr., helij s malim dodatkom cezija na 2250 K ima istu električnu vodljivost kao produkti izgaranja fosilnih goriva kod 2750 K. Kao rezultat, razvijeni su MHD generatori sa zatvorenim krugom, s helijem koji neprestano kruži u sistemu.

Dodatni problem kod MHD generatora predstavlja i potreba da se u cijevi kroz koju prolazi plazma izgradi jako magnetsko polje. Za izgradnju takvog polja potrebne su vrlo velike električne struje, što ujedno znači i velika zagrijavanja i gubitke energije u namotajima. Da bi se oni smanjili, otpor vodiča mora biti vrlo nizak, pa tehnologija MHD generatora tu neizbježno uključuje dostignuća i rezultate tehnologije supravodljivih materijala.

MHD generator s nuklearnim gorivom koristi nuklearni reaktor za zagrijavanje plina i njegovu toplinsku ionizaciju (sl. 159). Osnovni problem u konstrukciji takvog generatora je u tome što se današnji gorivi elementi nuklearnog goriva (urana) oblažu magnezijem koji može podnijeti temperaturu tek nešto iznad 870 K, dok je za



Sl. 159. Shematski prikaz MHD generatora s nuklearnim gorivom



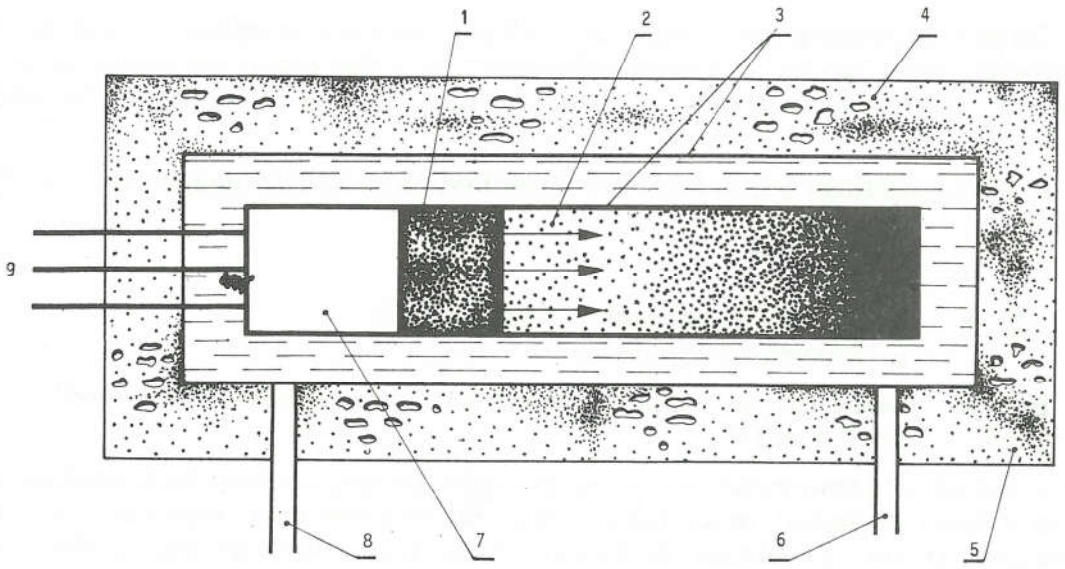
Sl. 160. Shema MHD generatora s reaktorom komornog tipa

ionizaciju plina potrebno 2250 K i više. Bit će, dakle, potrebno unaprijediti reaktorske sisteme u smislu dizanja njihovih radnih temperatura. Visoko-temperaturnim nuklearnim reaktorima mogle bi se najbolje izboriti prednosti koje nude MHD generatori, jer bi se time ostvarilo grijanje plinova s dobrim termodinamičkim i kemijskim svojstvima, a da se pri tom izbjegnu ograničenja koja predstavljaju produkti izgaranja kemijskog goriva.

Jedan od mogućih izvedbi MHD generatora s nuklearnim gorivom je generator s reaktorom komornog tipa (sl. 160). Kod te vrste MHD generatora u komoru za izgaranje dovodi se smjesa vodika i izotopa radioaktivnog urana pod pritiskom od 12.2 MPa. U takvim uvjetima u komori nastaje lančana reakcija i smjesa se zagrijava na 5750 K. Nastala plazma ekspandira kroz mlaznicu uz naglo povećanje brzine toka.

Procjenjuje se da bi se generator toga tipa mogao proizvoditi neuporedivo veće snage u odnosu na klasične termoelektrane s procesom pare iste veličine.

Druga moguća ivedba MHD generatora s nuklearnim gorivom je MHD generator koji radi na principu vala plazme (sl. 161). Kada je radioaktivni plin ravnomjerno raspoređen u komori za sagorjevanje, tj. kada se nalazi u subkritičnom



Sl. 161. MHD generator s valom plazme

1-plazma, 2-komora za izgaranje, 3-aluminijska kućišta, 4-rashladna tekućina-moderator, 5-betonski zaštitni zid, 6 i 8-ulaz i izlaz rashladne tekućine-moderatora, 7-natkritični volumni prostor, 9-kontrolne šipke

stanju, nema lančane reakcije. Međutim, ako se plin komprimira tako da zauzima matrični volumen prostora komore, započima lančana reakcija koja izaziva udarni val plazme prema suprotnom kraju komore, gdje plazma ponovo zauzima natkritični volumen, i gdje se ponovo dešava lančana reakcija. Sve se sada ponovo odvija prema suprotnom, tj. početnom broju komore, i tako redom.

Danas se u svijetu posvećuje velika pažnja i ulažu značajna sredstva u razvoj komercijalno iskoristivih MHD proizvodnih sistema. Njihovim radom povećala bi se ekonomičnost postojećih elektrana i značajno smanjilo zagađivanje okoline zahvaljujući potpunijem iskorištenju goriva u proizvodnji električne energije.

Iskustva iz razvoja i konstrukcija eksperimentalnih jedinica ukazuju da bi se MHD generatori mogli koristiti za unapređenje postojećih sistema za energetske pretvorbe, i to s periodima opterećenja kratkog trajanja, tj. za pokrivanje vršnih opterećenja u sistemu. U takvim uvjetima MHD generatori mogli bi se koristiti sa ili bez dodatnih parnih postrojenja, jer njihov stupanj djelovanja ne bi bio od primarne važnosti.

Do sada izgrađeni MHD generatori velikog kapaciteta uglavnom se koriste za znanstvena istraživanja, te unapređenje konstrukcije i razvoj budućih komercijalnih MHD generatora.

2.9.3. NEPOSREDNA PRETVORBA SUNČEVE ENERGIJE U ELEKTRIČNU - FOTONAPONSKA (FOTOELEKTRIČNA) PRETVORBA

Fotonaponska pretvorba je oblik neposredne pretvorbe energije solarnog zračenja (svjetlosti) u električnu energiju. Rad uređaja za fotonaponsku pretvorbu temelji se na pojavi fotoelektriciteta, tj. na oslobađanju elektrona iz metala ili poluvodiča koji su obasjani svjetlošću.

Da bi se iz nekog metala oslobodio elektron, odnosno manjinski nosilac naboja iz poluvodiča, potrebno im je dovesti neku energiju. Jedan dio te energije troši se za oslobađanje elektrona, a drugim se elektronu daje neka početna brzina (kinetička energija).

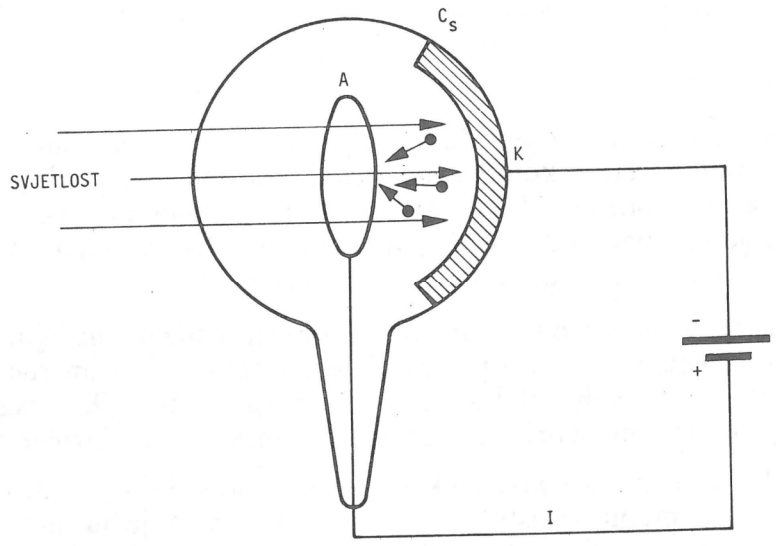
Iz izvora svjetlosti izlaze fotoni, tj. kvanti svjetlosti (elektromagnetski valovi), s energijom

$$E = h\nu \tag{396}$$

gdje je h - Planckova konstanta (6.625×10^{34} Js);
ν - frekvencija svjetlosti.

Energija fotona pri oslobađanju elektrona (fotonaponski efekt) dijeli se na način određen jednadžbom (393).

Svjetlost, odnosno kvant svjetlosne energije (foton), s većom frekvencijom ν (i manjom valnom dužinom) može lakše osloboditi elektron nego svjetlost s manjom frekvencijom (i većom valnom dužinom). Zbog toga ultraljubičaste zrake lakše oslobađaju elektrone nego vidljiva svjetlost, odnosno ostali elektromagnetski valovi s manjim frekvencijama.

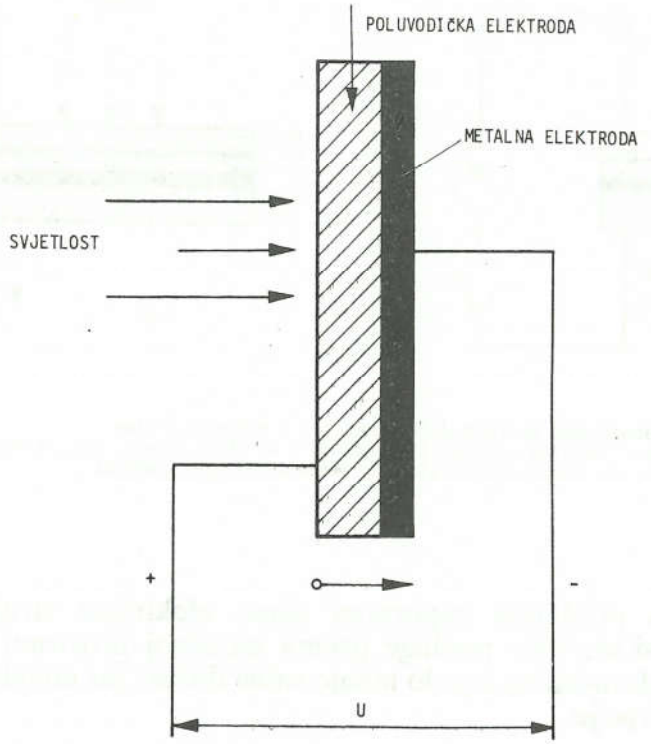


Sl. 162. Shema rada vakumske fotoćelije

Dva su osnovna tipa uređaja za dobivanje električne energije i to fotoćelija i fotočlanak (fotoelement). Princip fotoćelija prikazan je na sl. 162.

U prozirnu vakumsku cijev smještene su katoda i anoda. Katoda je izrađena od metala malog izlaznog rada (najčešće presvučenog tankim slojem cezija), i ima veliku površinu. Anoda ima oblik mreže ili obruča, a smještena je nasuprot katoda. Katoda i anoda spojene su u strujni krug s izvorom električne energije. Kada svjetlost pada na katodu u strujnom krugu teče električna energija koja je ovisna o intenzitetu same svjetlosti. Fotoćelija se ubraja u grupu pasivnih fotoemisionih pretvarača jer je za gibanje oslobođenih elektrona potrebno električno polje koje daje vanjski izvor električne struje.

Princip fotoelementa (fotočlanka) prikazan je na sl. 163.



Sl. 163. Shema fotonaponskog učinka kod fotočlanka

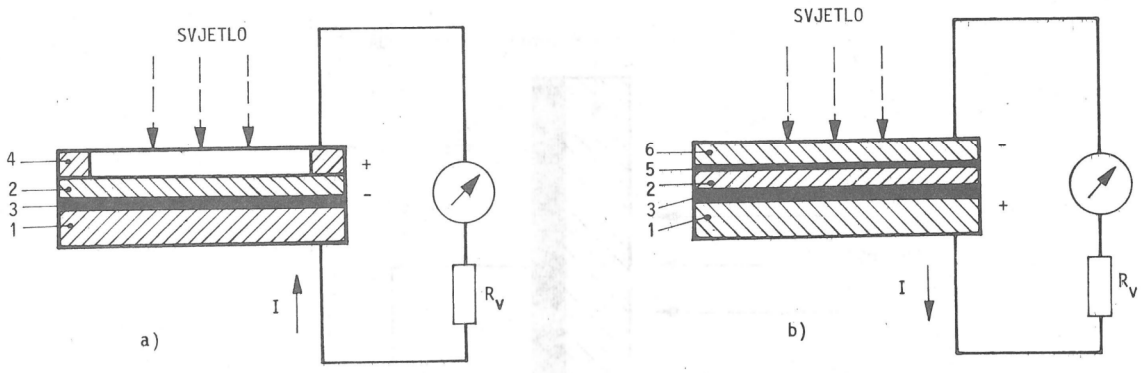
Fotoelement pretvara svjetlosnu (solarnu) energiju u električnu na zapornom sloju koji nastaje između poluvodičke elektrode s malim izlaznim radom (poluvodički kristali selena, germanija ili silicija) i metalne podloge, odnosno između poluvodiča i prozirnog tankog metalnog premaza kojim je poluvodič presvučen.

Na metalnoj elektrodi skupljaju se elektroni koji su oslobođeni upadom svjetlosti, i ona se negativno nabija. Istovremeno se poluvodička elektroda nabija pozitivno. Time se između elektroda uspostavlja napon. Njegova veličina ovisi o intenzitetu svjetlosti koja pada na poluvodičku elektrodu.

Za praktičnu primjenu najznačajnije kombinacije materijala za fotoelemente su bakar-oksid na bakru, selen na željezu i silicij na željezu. Ovaj posljednji daje najveću izlaznu snagu. Fotoelementi se izvode kao fotoelementi sa stražnjim (sl. 164a) i fotoelementi s prednjim slojem (sl. 164b).

Kod fotoelementa sa stražnjim slojem zaporni sloj nastaje toplinskom obradom koja se sastoji u nanošenju poluvodiča na metalnu podlogu u obliku tanke prozirne prevlake. Pri prolazu svjetlosti kroz taj tanki sloj poluvodiča u zapornom sloju oslobađaju se elektroni. Oni se skupljaju na metalnoj podlozi. Električna struja teče od metalnog prstena, prema metalnoj podlozi. Takvi elementi osjetljivi su uglavnom na svjetlo veće valne dužine zbog toga što poluvodič apsorbira svjetlo manje valne dužine.

Kod fotoelementa s prednjim slojem poluvodič je presvučen izvanredno tankim prozirnim slojem metala (zlato, platina, bakar). Zaporni slojevi nastaju toplinskom obradom. Pri prolazu svjetla u zapornim slojevima oslobađaju se elektroni. Stvorene elektromotorne sile su suprotne i različitog iznosa. Kako pri tome prevladava



Sl. 164. a - fotoelement sa stražnjim slojem, b - s prednjim slojem
Oznake: 1 metalna podloga, 2 poluvodič, 3 stražnji zaporni sloj, 4 kontaktni prsten, 5 prednji zaporni sloj i 6 metalna prozirna prevlaka

elektromotorna sila u prednjem zapornom sloju, električna struja u vanjskom strujnom krugu teče od metalne podloge prema metalnoj prozirnoj prevlaci. Takvi elementi osjetljivi su uglavnom na svjetlo manje valne dužine jer metalna prevlaka ima svojstvo vrlo slabe apsorpcije.

Stupnjevi djelovanja fotoelemenata su jako niski (samo se 11 do 14% svjetlosne energije pretvara u električnu energiju), što je, uz vrlo mali izlazni napon (0.4 V), osnovna zapreka njihovog značajnijeg korištenja, osim za sasvim specijalne namjene. Zbog toga je danas sve ono što se smatra pod fotoelementima (solarnim ćelijama!) vezano za korištenje poluvodiča, odnosno spojeva različitih poluvodiča. Sam pojam fotonaponskog efekta najčešće se danas veže za proizvodnju napona (struje) u nehomogenom poluvodičkom materijalu koji apsorbira vidljivo svjetlo ili druga elektromagnetska zračenja.

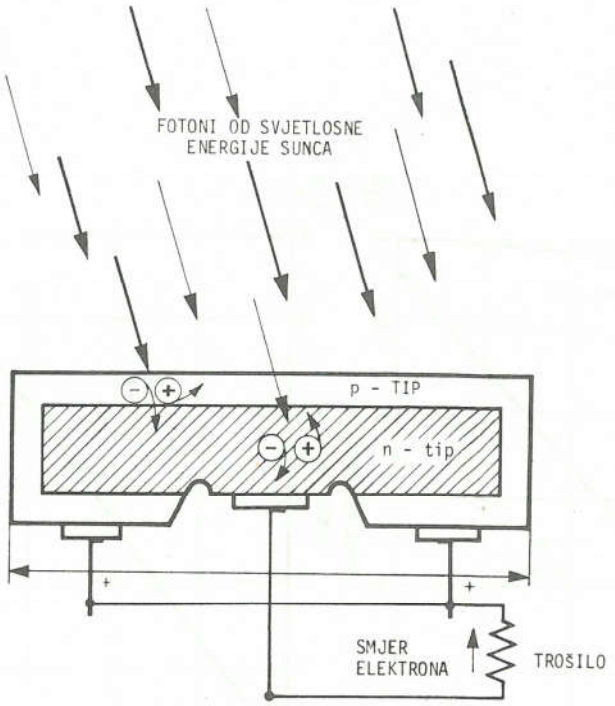
Na sl. 165. shematski je prikazan primjer standardne solarne fotonaponske ćelije (elementa). Osnovni dio fotonaponske ćelije je spoj dva različita poluvodiča, tzv. p-n spoj; n-tip poluvodiča u kojem se vođenje odvija zahvaljujući elektronima, i p-tipa vodiča u kojem se vođenje odvija zahvaljujući šupljinama. Na dodirnoj površini n i p-tipa poluvodiča difuzijom elektrona uspostavlja se potencijalna razlika. Kad se u blizini takvog spoja apsorbira svjetlost (ili neko drugo elektromagnetsko zračenje), stvaraju se novi parovi elektron-šupljina. U p-tipu poluvodiča fotone apsorbiraju manjinski nosioci naboja - elektroni koji prelaze u n-tip poluvodiča. Tu se opet dešava suprotno jer su tamo šupljine manjinski nosioci naboja.

Stvarni nosioci naboja prolaze kroz vanjski strujni krug tvoreći tok električne struje kojeg tjera stvorena potencijalna razlika u području spoja dvaju tipova poluvodiča. Zbog tog unutarnjeg električnog polja nije potrebno posebno prednapajanje da bi se stvoreni nosioci naboja odijelili i potjerali kroz vanjski krug.

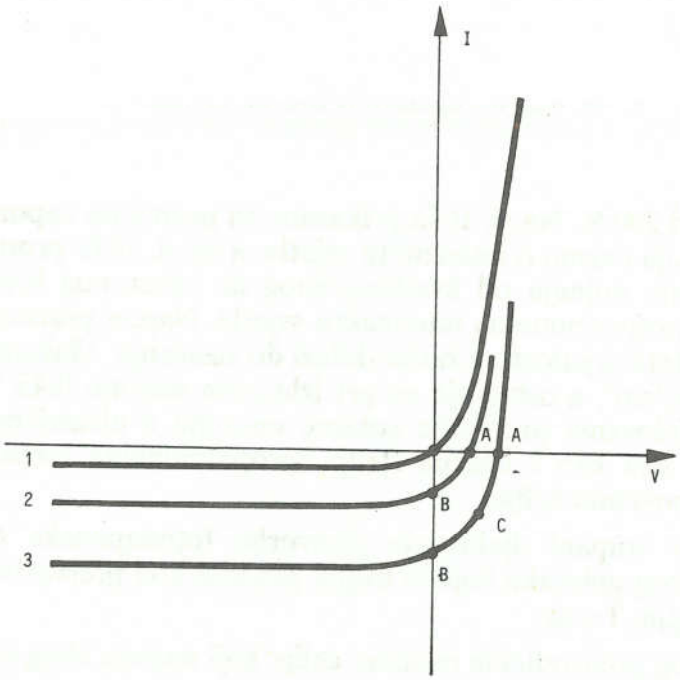
Na sl. 166. prikazana je strujno-naponska karakteristika fotonaponske ćelije.

Upadno zračenje "pomiče" strujno-naponsku karakteristiku prema dolje, i to za veličinu foto-generirane struje. U slučaju kada je strujni krug otvoren (I=0) napon na stezaljkama ćelije raste s porastom intenziteta svjetla (točka A).

Pri kratkom spoju (V=0) veličina struje raste s porastom intenziteta svjetla (točke B). Fotonaponska ćelija je izvor električne energije u području rada između ta dva krajnja slučaja, odnosno između točaka A i B (točka C).



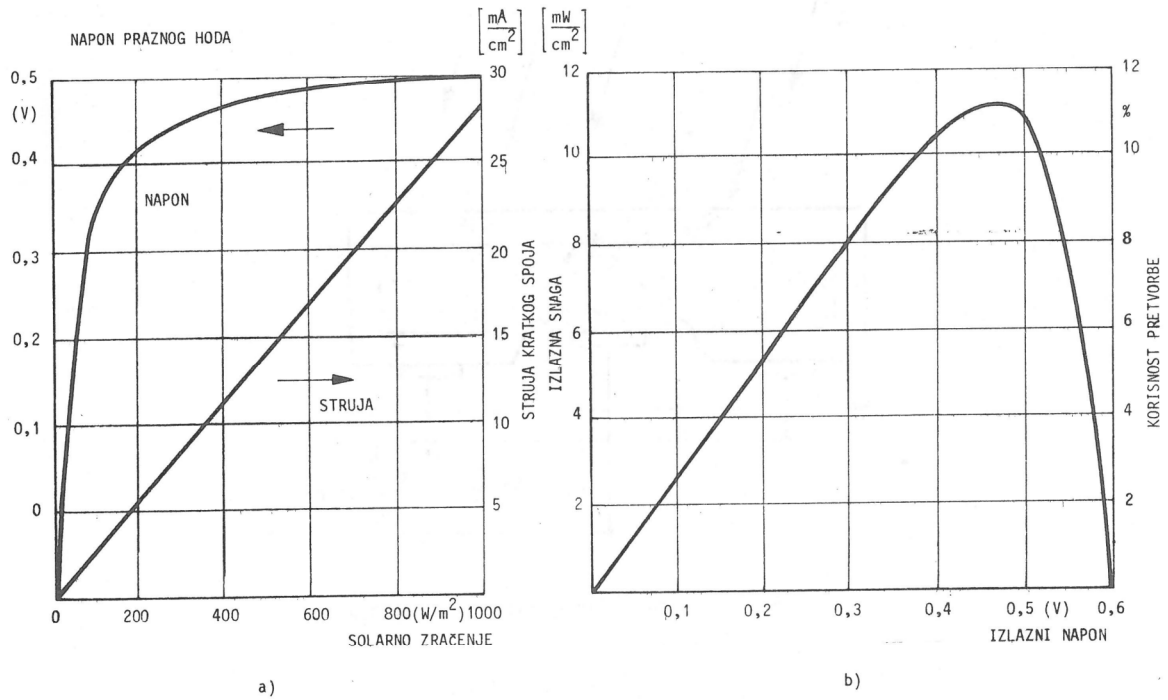
Sl. 165. Standardna solarna fotonaponska ćelija



Sl. 166. Strujno-naponska karakteristika p-n spoja
1 - kad nema upadnog zračenja
2 i 3 - uz postojanje upadnog zračenja

Apsorpcija sunčeva svjetla u fotonaponskoj (solarnoj) ćeliji ovisi o intenzitetu i kvalitetu sunčeva svjetla, količini svjetla koji se reflektira s prednje površine solarne ćelije, širine zabranjenog pojasa energija poluvodiča, tj. minimalne energije svjetlosti koju materijal apsorbira, te debljini sloja poluvodiča. Kod nekih materijala potrebni su deblji slojevi da bi apsorbirali većinu svjetla, dok su kod drugih materijala (npr. galijev arsenid, kadmijev telurid, bakreni sulfid) dovoljni sasvim tanki slojevi.

Napon i struja su, kako je prije rečeno, ovisni o intenzitetu upadnog zračenja. Na sl. 167. prikazane su električne karakteristike silicijeva p-n spoja solarne ćelije pri



Sl. 167. Električne karakteristike silicijeva p-n spoja

radnoj temperaturi 290 K. Na sl. 167a prikazane su promjene napona otvorenog kruga i struja kratkog spoja ovisno o intenzitetu svjetla, a na sl. 167b promjene izlazne snage kako se opterećenje mijenja od kratkospojnog do otvorenog kruga. Struja kratkog spoja direktno je proporcionalna intenzitetu svjetla. Napon praznog hoda naglo raste kod malog intenziteta svjetlosti, a zatim dolazi do zasićenja. Maksimalna izlazna snaga iznosi oko 11 mW/cm^2, a ostvaruje se pri izlaznom naponu 0.45 V. Za takve uvjete ukupni stupanj djelovanja pretvorbe solarne energije u električnu energiju je 11%. Izlazna snaga je, ista kao i izlazna struja, proporcionalna intenzitetu svijetla koje ozračuje vanjsku površinu ćelije.

Maksimalni stupanj djelovanja pretvorbe fotonaponske ćelije ograničen je termodinamički zbog gubitaka koji su uvijek prisutni kod pretvorbe solarnog zračenja u električnu energiju. To su:

- gubici zbog poluvodičkih osobina ćelije koji nastaju zbog toga što se sve valne dužine zračenja veće od onih koje odgovaraju zabranjenom pojasu energije apsorbiraju u poluvodiču ili disipiraju u obliku topline (zbog toga razloga se, npr., kod silicijeve ćelije u normalnim uvjetima oko 23% od spektra sunčeva zračenja ne može iskoristiti;
- gubici koji nastaju zbog toga što se dio energije fotona, kada je ta veća od energije zabranjenog pojasa energije, pretvara u toplinu (za slučaj silicija ti gubici iznose oko 31%);
- gubici koji nastaju iz potrebe za ograničenjem napona otvorenog kruga na veličinu manju od E_g/e. (E_g - donja granična energija, e jedinični naboj). To ograničenje uvjetovano je termodinamičkim razlozima (kod silicija ograničenje napona na 0.8 V izaziva gubitke oko 12%);

- gubici koji proizlaze iz dodatnih termodinamičkih razloga koji su vezani za omjer maksimalne snage i umnoška struja kratkog spoja i napona otvorenog kruga (za silicij kod omjera 0.9 ti gubici iznose 3%).

Svi ti gubici ne mogu se izbjeći. Oni u normalnim uvjetima ograničavaju maksimalni stupanj djelovanja fotonaponskih ćelija koje su izrađene od jednog poluvodičkog materijala na oko 33%. To vrijedi za temperaturu oko 300 K. Sa sniženjem temperature, odnosno s povećanjem koncentracije sunčeva zračenja ta vrijednost raste na vrijednosti do 41%. Još veće vrijednosti postižu se korištenjem više različitih poluvodičkih materijala, jer se koristi širi spekat zračenja. Time se postižu stupnjevi djelovanja i do 44%. Za beskonačan broj materijala maksimalni stupanj djelovanja pretvorbe bio bi 68%.

Sve to vrijedi za idealnu fotonaponsku ćeliju. U stvarnosti postoje i dodatni gubici zbog refleksije, apsorpcije u dijelovima izvan poluvodičkog materijala (u kojima se ne stvaraju parovi nosioca naboja), rekonbinacije parova nosioca naboja i unutarnjih otpora ćelije. Zbog tih gubitaka maksimalni stupanj djelovanja pretvorbe u realnim uvjetima za poluvodiče ima ograničenu vrijednost koja iznosi 24%.

Do sada su ostvareni stupnjevi djelovanja solarnih ćelija do 18%, ali samo u eksperimentalnim uvjetima, dok se stupnjevi djelovanja u komercijalnoj upotrebi kreću oko 10-12%, i to pri normalnim radnim uvjetima.

Jedan od mogućih načina povećanja stupnjeva djelovanja solarnih ćelija je da se korištenjem optičkih koncentratora povećaju intenziteti svjetla koji padaju na solarne ćelije. Na taj način postižu se stupnjevi djelovanja pretvorbe do 20% kod silicijevih ćelija i preko 25% kod ćelija s galijevim arsenidom. Još veći stupanj djelovanja postiže se "cijepanjem" sunčeva spektra, od kojeg svaki dio (pojas zračenja) pada na odgovarajuću solarnu ćeliju. Svaka od tih ćelija ima optimalne karakteristike (i prolazne slojeve) za određeni dio spektra. Tako se postižu stupnjevi djelovanja iznad 28%, uz mogućnost i daljnjeg povećanja (do 35%).

Pojedinačno, veličina solarne ćelije ograničena je na oko 40 cm^2 vanjske površine. Uz stupanj djelovanja pretvorbe 15%. Takva ćelija može proizvesti oko 0.6 W pri naponu 0.5 V i uz pouno sunčevo svjetlo. Da bi se dobio veći izlazni napon i snaga, potrebno je veći broj ćelija povezati u panele ili nizove, tzv. module. Ćelije se zatim povezuju u serije da bi se višestruko povećao njihov izlazni napon i snaga. Solarne ćelije koje su povezane u seriju moraju se slagati vrlo blizu, praktički u kratkospojne krugove, zbog ograničenja koje unose ćelije u seriji koje imaju najslabije osobine, tj. najnižu struju.

Nizovi solarnih ćelija gotovo su jedini izvori energije na umjetnim satelitima. Skylab je, npr. imao niz solarnih ćelija snage 20 kW. Značajnija primjena solarnih ćelija za potrebe na Zemlji porasla je od 1970. godine. Njihova primjena istovremeno je značila i korištenje električnih akumulatorskih baterija kako bi se osiguralo pouzdano i kontinuirano napajanje. Kod primjena za koje su se tražili izmjenični napon i struja morali su se još dodavati i statički izmjenjivači za pretvaranje istosmjernog izlaza solarnih ćelija u izmjenični.

Danas se solarne ćelije, odnosno njihovi sistemi, intenzivno istražuju i razvijaju. Razloga za to ima više, a osnovni su:

- nemaju mehaničke pokretne dijelove koji unose dodatne gubitke, i koji su podložni trošenju i oštećenjima;
- mogu se lako smjestiti na različita mjesta i u različite okoline, vrlo blizu korisnika;

- male su težine, odnosno imaju veliki omjer snage prema težini;
- ne zagađuju okolinu i u radu ne stvaraju buku;
- ne trebaju pomoćne izvore napajanja;
- traže minimalno održavanje;
- modularna izvedba dopušta im vrlo široku primjenu, u području snaga od 1 ηW do nekoliko stotina MW;
- dinamičke karakteristike su im vrlo povoljne, pogotovo u slučajevima gdje se traži vrlo brzo postizanje pune izlazne snage;
- materijal za njihovu izradu je lako dostupan.

Međutim, njihovu značajniju primjenu onemogućavale su do sada njihove loše osobine, od kojih su najznačajnije:

- vrlo visoka cijena solarnih ćelija, odnosno visoki troškovi proizvodnje električne energije u takvim solarnim sistemima;
- proizvodnja električne energije ovisna je o intenzitetu svjetlosti, a pogotovo o njenim promjenama u ciklusima dan - noć, odnosno s godišnjim dobima;
- potreba za dodatnim spremištima električne energije, tj. akumulatorskim baterijama;
- vrlo niska korisnost pretvorbe solarne energije u električnu zbog čega je panelima solarnih ćelija ili kolektorskim sistemima nužno pokriti velike površine.

Stupanj djelovanja pretvorbe sunčevog zračenja u električnu energiju osnova je za vrednovanje i njihove ekonomičnosti, budući da je to direktno vezano za potrebne površine panela i modula solarnih ćelija, odnosno troškove proizvodnje, zemljišta i montaže.

Danas su u komercijalnoj upotrebi za korištenje u širem smislu uglavnom ćelije i moduli iz monokristalnog silicija s difundiranim p-n spojem, ćelija i moduli iz monokristalnog G_aA_s, te heterospojne ćelije C_dS/Cu_2S.

Prve su u najširoj upotrebi. Uz izlazni napon takvih modula do 12V i snagu 20-40 W, uz stupanj djelovanja pretvorbe pojedinih ćelija do 14% i uz stupanj djelovanja ukupnog modula ispod 10% (faktor popunjenosti i gustoće slaganja okruglih pločica manji od 0.75!), osnovna prednost im je provjerena tehnologija izrade i dug i pouzdan rad, a osnovni nedostatak visoka cijena izrade. Taj nedostatak ograničava njihovu primjenu na jedinice snage do 100 kW, i to na udaljenim i teže dostupnim mjestima.

Druge imaju optimalnu vrijednost širine zabranjenog pojasa energije za konverziju solarnog zračenja (oko 1.45 e), visoki stupanj djelovanja pretvorbe (oko 23%), veliki koeficijent apsorpcije solarnog zračenja, mogu biti vrlo malih dimenzija, stupanj djelovanja pretvorbe im se vrlo polagano smanjuje s temperaturom zbog čega se mogu koristiti za omjere koncentracije i do 1000 puta. Međutim, vrlo veliki im je nedostatak visoka cijena, i do 100 puta veća od cijene onih prvih (ćelije i moduli iz monokristalnog silicija).

Osnovnu prednost trećih (heterospojne ćelije) čini to što se izrađuju od polikristalnog materijala, malih su dimenzija, tehnološki postupak im je relativno jednostavan, mogu se izrađivati u željenom obliku (veći faktor popunjavanja i slaganja) i za izradu traže relativno mali utrošak energije. S druge strane, nedostaci su im vrlo niski maksimalni stupanj djelovanja pretvorbe, osjetljivost na vlagu i kisik,

ograničen vijek trajanja, te potreba da se u postupku izrade koriste elementi relativno ograničenih rezervi.

Osnovni pravci istraživanja i razvoja sistema za pretvorbu energije solarnog zračenja u električnu energiju usmjereni su prema snižavanju visokih troškova izrade, povećanju stupnja djelovanja pretvorbe, usavršavanju tehnologije izrade i razvoju pogodnijih i efikasnijih načina korištenja.

Jedan od načina snižavanja troškova je zamjena skupog monokristalnog silicija tankim filmovima amorfnog ili polikristalnog silicija, galijeva arsenida, lamdijeva sulfida, odnosno tankoslojnih poluvodičkih spojeva, a drugi primjena koncentratora u obliku ogledala ili Fresnelovih leća.

Povećanje stupnja djelovanja vezano je kako za razvoj novih materijala za solarne ćelije, tako i za nove ili savršenije tehnološke procese, odnosno načine, sisteme i uvjete korištenja.

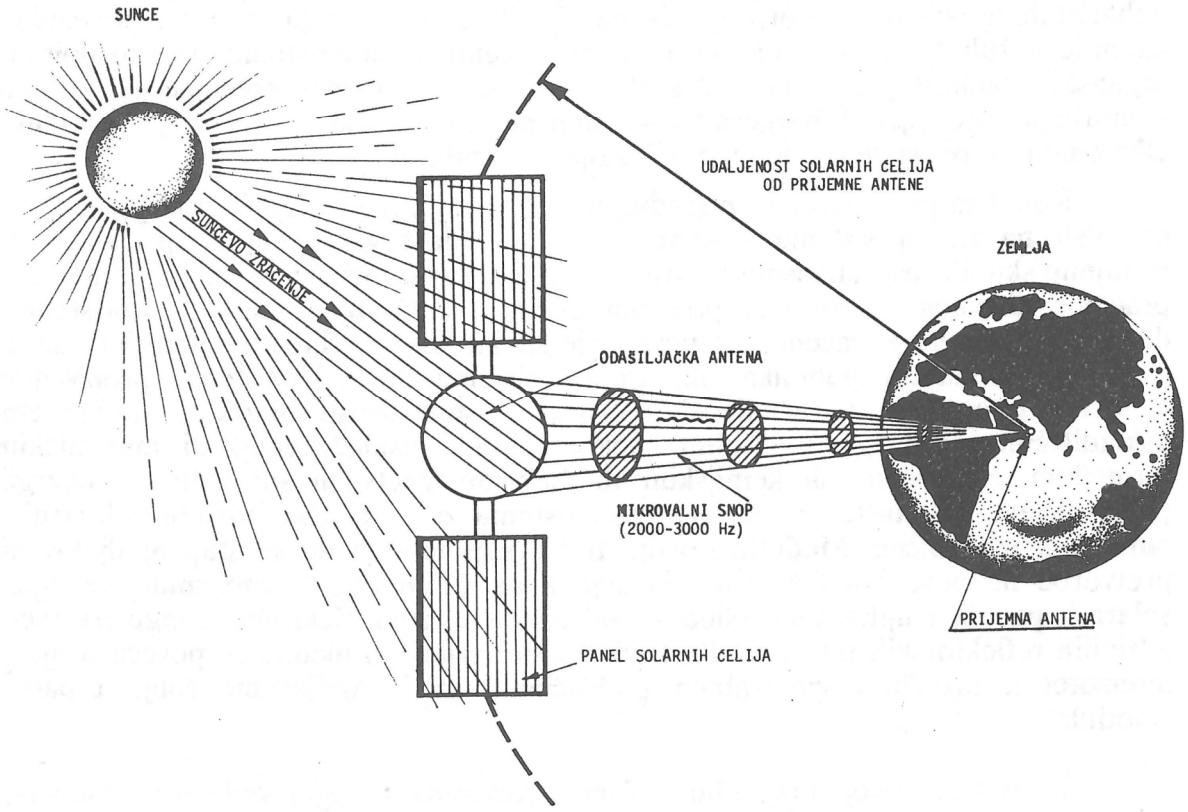
Usavršavanje tehnologije vezano je s jedne strane za razvoj postupka dobivanja polikristalnog silicija, amorfnog silicija, polikristalnih ćelija galijeva arsenida i kadmijeva sulfida, ćelija kadmijeva telurida, ćelija monokristalnih heterospojeva i organskih tankoslojnih ćelija, a s druge strane za razvoj postupaka i metoda formiranja potencijalnih barijera zasnovanih na automatizaciji, korištenju pogodnijih elemenata i spojeva, te uvođenju novih slojeva i struktura.

Konačno pod razvojem pogodnijih i efikasnijih načina korištenja prvenstveno se misli na razvoj sistema s koncentracijom solarnog zračenja koji omogućuju primjenu skupih, vrlo efikasnih solarnih ćelija manjih dimenzija, na razvoj sistema za praćenje dnevnog i godišnjeg položaja Sunca, na razvoj sistema za korištenje i direktnog i difuznog zračenja, na povećanje spektralne osjetljivosti solarnih ćelija, na smanjenja dodatnih gubitaka, na razvoj sistema za uskladištenje proizvedene električne energije, tj. povećanje iskoristivosti i raspoloživosti solarnih ćelija i sistema uskladištenjem energije u okolini (nekontrolirana uskladištenja) ili mehaničkim, termičkim, električnim ili kemijskim ili elektromagnetskim spremnicima energije (kontrolirana uskladištenja), te na razvoj sistema za pretvorbu istosmjernih struja i napona u izmjenične. Međutim, ovdje treba napomenuti da se stupanj djelovanja pretvorbe ne povećava fokusiranjem svjetla na ćeliju nego samo smanjuje cijena solarnih panela i njihova površina za određenu izlaznu električnu snagu na račun jeftinijih reflektorskih površina. Koncentracijom svjetlosti ujedno se povećava njezin intenzitet u različitim spektralnim područjima, ali i zagrijavanje ćelija i panela (modula).

Što se tiče razvoja i izgradnje solarnih elektrana, mnogi problemi predstavljaju njihova značajna ograničenja, čak i pri vrlo povoljnim solarnim mogućnostima. Dodatna atmosferska ograničenja samo otežavaju situaciju i nameću potrebu za istraživanjem i razvojem satelitskih solarnih sistema, bilo da se radi o sistemima za prikupljanje i prenos sunčeve svjetlosti na Zemlju (sistemi orbitalnih reflektora) i njeno prikupljanje i pretvorbu u električnu energiju u postrojenjima na Zemlji, ili o sistemima za prikupljanje i pretvorbu sunčeve svjetlosti u svemiru (na prirodnim ili umjetnim satelitima), njeno slanje na Zemlju u obliku mikrovalnog snopa, ispravljanje i ponovno pretvaranje u električnu energiju (sl. 168). Međutim, i kod tih sistema prisutno je niz problema. Jedni su vezani za negativni utjecaj atmosfere (raspršivanja i širenja valnih snopova s pripadnim gubicima), a drugi za ograničene mogućnosti raspoloživih materijala u pogledu visokih napona potrebnih za mikrovalnu pretvorbu, u pogledu visokih koncentracija energije koja se odašilje ili prima, u pogledu toplinske

opteretivosti najugroženijih komponenti, ili ograničenja u pogledu zahtjeva radiokomunikacije, izlaganja mikrovalnoj radijaciji ili zauzetosti korisne površine na Zemlji. U satelitskim solarnim sistemima puni kapaciteti bi se trebali koristiti s praktički konstantnim solarnim zračenjem, što bi u odnosu na primjenu na Zemlji značilo dobitak preko petnaest puta više energije. Snaga takvih sistema trebala bi se kretati u području od 3 do 20 GW, dok bi površina panela varirala od 20 do 100 km^2, ovisno o kapacitetu elektrane.

Do realizacije satelitskih solarnih elektrana trebat će još riješiti problem narušavanja solarnih sistema zbog izlaganja radijaciji i mehaničkim oštećenjima uslijed udara mikrometeorita. Konačno, treba odgovorit i na pitanje ne prelazi li energija utrošena na izgradnju i postavljanje takvih sistema u orbitu energiju koja se može proizvesti u životnom vijeku elektrane.



Sl. 168. Shematski prikaz rada satelitske solarne elektrane

2.9.4. NEPOSREDNA PRETVORBA KEMIJSKE ENERGIJE U ELEKTRIČNU ENERGIJU

- elektrokemijske ćelije (gorivni elementi)

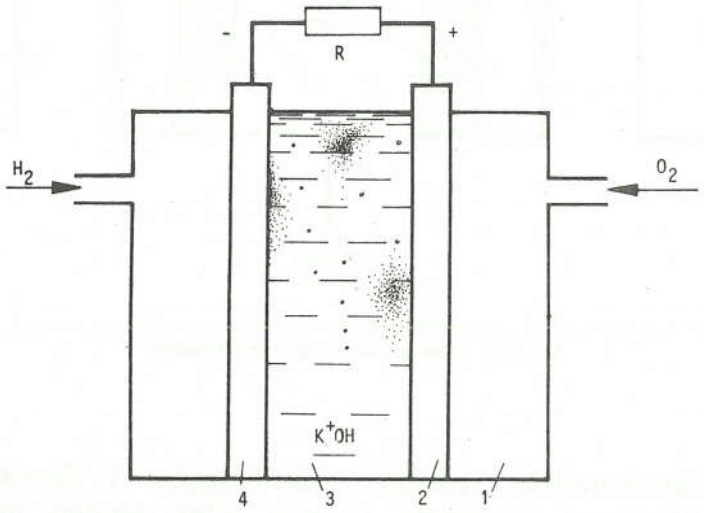
Elektrokemijske ćelije (gorivni elementi) su elektrokemijski uređaji u kojima se kemijska energija nekog kemijskog elementa ili spoja neposredno pretvara u

električnu energiju. Gorivni element se općenito sastoji od dviju elektroda uronjenih u isti elektrolit (sl. 169).

Gorivo je kemijski element ili spoj visokog sadržaja unutrašnje energije koje se dovodi na anodu. Na anodi se gorivo oksidira, a kao rezultat oksidacije oslobađaju se elektroni.

Oslobođeni elektroni vode se od anode, kroz vanjski strujni krug i preko trošila do katode. Na katodi tim elektronima reducira se drugi kemijski element ili spoj koji se dovodi u gorivni element kao oksidans.

Elektrode gorivnog elementa su porozne, a upravo o njihovom sastavu i površini najviše ovisi mehanizam i tok navedenih reakcija.



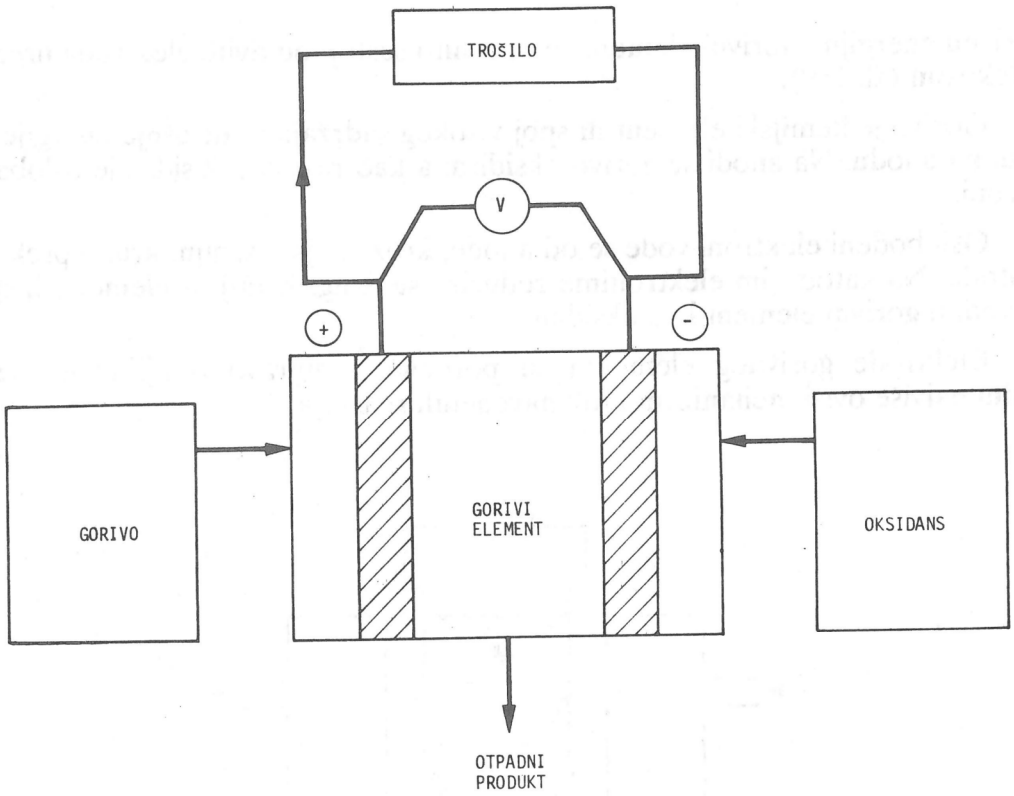
Sl. 169. Shema gorivog elementa s vodikom i kisikom : 1-kućište, 2-katoda, 3-elektrolit, 4-anoda i R-trošilo

Prema načinu rada gorivni elementi se dijele na primarne i sekundarne. Osnovna razlika je u tome što se kod primarnih gorivih elemenata tokom rada neprestano dovodi novo gorivo i novi oksidans, a produkti reakcije odbacuju (sl. 170), dok se kod sekundarnih ili regenerativnih gorivnih elemenata produkti reakcije regeneriraju u polazne reaktante utroškom nekog od oblika energije (sl. 171).

Proces regeneracije produkata reakcije može se odvijati u gorivnom elementu ili izvan njega, a po prirodi je suprotan već opisanim procesima.

Tok i priroda reakcije u gorivnom elementu ovise i o kemijskom sastavu elektrolita. Za gorivni element s vodikom i kisikom, i kiselim elektrolitom, pozitivni vodikovi ioni od anode difuzijom prolaze kroz elektrolit da bi se u reakcijskom sloju katode spojili s negativnim hidroksilnim ionima u vodu (sl. 172). Za isti element, ali s alkalnim elektrolitom, negativni hidroksilni ioni difuzijom prolaze kroz elektrolit da bi se u reakcijskom sloju anodi spojili s pozitivnim vodikovim ionima u vodu (sl. 173). Dakle, u oba slučaja rezultat reakcije je isti.

Elektrode su dijelovi gorivnih elemenata s višestrukom funkcijom. Po sastavu su to metali ili materijali s poluvodičkim svojstvima čija površina pospješuje



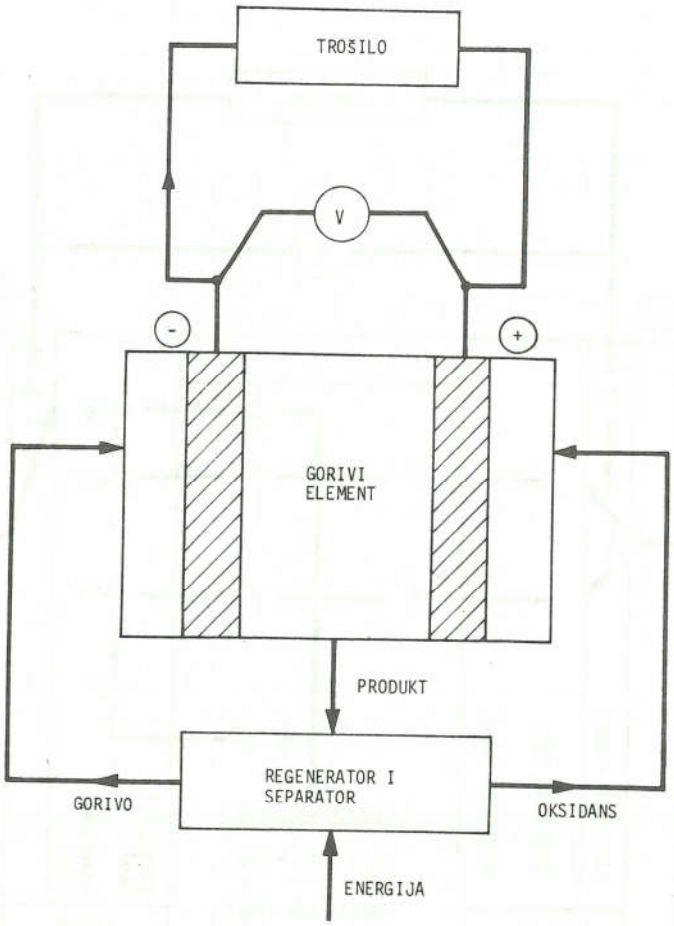
Sl. 170. Shema primarnog gorivog elementa

(katalizira) elektrokemijske reakcije adsorbiranjem i disociranjem reaktanata, odnosno desorbiranjem produkata reakcije. One ujedno moraju imati dobra mehanička svojstva, visoku specifičnu površinu i poroznost, a da pri tome zadrže dobru otpornost prema korozivnom djelovanju elektrolita i spojeva koji nastaju kao rezultat reakcije. Takva svojstva imaju, npr. platina, paladij, radij, rutenij, dijelom nikal i srebro, te grafit ako se radi o gorivnim elementima koji rade pri srednjim i visokim temperaturama. Naravno, tu treba dodati i niz materijala dobivenih složenim tehnološkim postupcima. Elektrode su najkritičnija mjesta tehnoloških rješenja gorivnih elemenata. Slijedeći je važan element gorivnog elementa elektrolit. Elektrolit može biti tekući ili čvrsti. Tekući elektroliti su polarne tekućine koje otapaju ionske kristale ili rastopljive soli najčešće alkalijskih metala (kloridi i karbonati). Najvažniji čvrsti elektroliti su ionski izmjenjivači, membrane građene od polimera s aktivnim skupinama SO_3H, COOH, OH ili NH_2, te membrane od nikal-borida i bor nitrida. U visokotemperaturnim gorivnim elementima koriste se čvrsti elektroliti (Al_2O_3, ZrO_2 i MgO) dopirani dodatkom metala.

Gorivo je svaki kemijski element ili spoj s visokim sadržajem unutrašnje energije koju može osloboditi oksidacijom i prijeći u ionsko stanje.

Oksidans je svaka kemijska tvar koja redukcijom može preuzeti elektrone i preći u ionsko stanje. Najčešće je to kisik, zrak, halogeni elementi (Cl, Br, F) ili oksidirani oblici nekih redoks-sustava.

Gorivni elementi su vrlo efikasni elektro-kemijski pretvarači kemijske energije u električnu. Tako je, npr., izračunato da teoretska korisnost elektrokemijske pretvorbe kemijske energije ugljena u električnu energiju iznosi 99.75%. Praktično ostvarene vrijednosti nalaze se u području 60 do 80%.



Sl. 171. Shema sekundarnog gorivog elementa

Ukupni stupanj efikasnosti elektrokemijske pretvorbe gorivnog elementa definiran je kao umnožak triju stupnjeva korisnosti:

$$\eta_{GE} = \eta_i \eta_v \eta_F \tag{397}$$

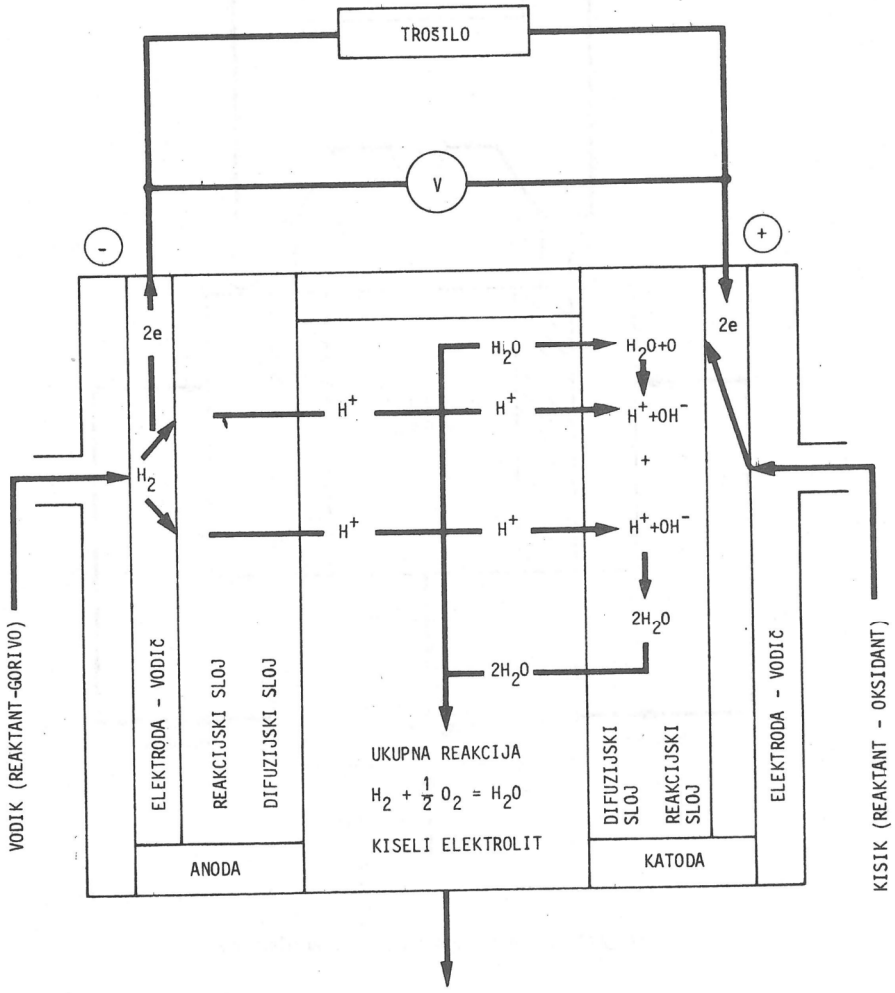
gdje je:

η_i - termodinamički stupanj efikasnosti (intrinzička efikasnost definirana kao:

$$\eta_i = \frac{\Delta G}{\Delta H} = 1 - T\frac{\Delta S}{\Delta H} = 1 - nFT\frac{\left(-\frac{dE}{dt}\right)p}{\Delta H}, \tag{398}$$

ΔG - maksimalna moguća energija koju je moguće dobiti iz kemijske reakcije (slobodna energija kemijske reakcije): $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$;

ΔH - ukupna oslobođena energija (reakcijska entalpija);
T - reakcijska temperatura (izoterma reakcije);
ΔS - promjena entropije, koja pri konstantnom tlaku iznosi:



Sl. 172. Shema gorivog elementa s vodikom i kisikom i s kiselim elektrolitom

$$\Delta S = -\left(\frac{\partial}{\partial T} \Delta G\right)_p . \tag{400}$$

Za gorivne elemente vrijedi da je:

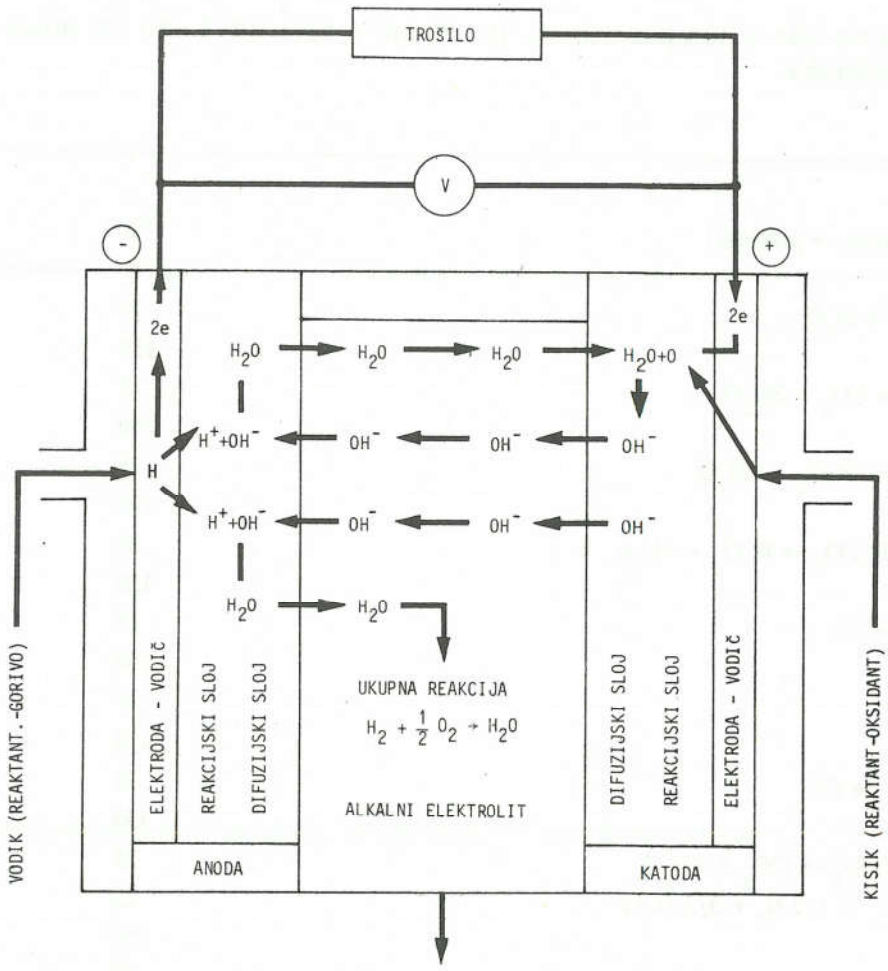
$$\Delta G = - nFE \tag{401}$$

gdje je: n - broj ekvivalenata (broj elektrona) određen reakcijskom jednadžbom;
F - količina elektriciteta jednog ekvivalenta (Faradayeva konstanta);
E - elektromotorna sila elementa.

η_v - naponski stupanj efikasnosti definiran kao:

$$\eta_v = V/E, \tag{402}$$

V - napon na stezaljkama gorivnog elementa;
E - elektromotorna sila gorivnog elementa.



Sl. 173. Shema gorivog elementa s vodikom i kisikom i s alkalnim elektrolitom

Dalje vrijedi da je:

$$V = E - \Delta U, \tag{403}$$

gdje je ΔU unutrašnji pad napona koji nastaje uslijed unutrašnjeg otpora gorivnog elementa (otpor elektrolita, otpor reakcijskog sloja elektrode, energije aktivacije ionskih reakcija, itd.).

η_F - Faradayski stupanj efikasnosti, odnosno mjera potpunosti iskorištenja goriva u elektrokemijskoj reakciji koja daje električnu struju, a definiran je kao

$$\eta_F = Q/Q_m \tag{404}$$

Q - količina elektriciteta dobivena iz gorivnog elementa;

Q_m - količina elektriciteta koja bi se mogla dobiti iz goriva utrošenog samo u pretpostavljenoj elektrokemijskoj reakciji.

Kod procesa se gorivnim elementima ne pojavljuju ograničenja Carnotovog procesa, tako da je efikasnost pretvorbe znatno veća nego kod direktnog izgaranja goriva. Njihov termodinamički stupanj efikasnosti je zbog toga vrlo visok, a u slučajevima kada je promjena entropije, odnosno koeficijent promjene

elektromotorne sile s temperaturom pozitivan, i veći od 1 što se može vidjeti iz slijedećih podataka.

Reakcija (goriva + oksidans → produkt)	t °C	η_t
$H_2 + 1/2\ O_2 \rightarrow H_2O$	25	0.830
	150	0.910
$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$	25	0.919
	150	0.999
$C_3H_8 + SO_2 \rightarrow 3CO_2 + 4H_2O$	25	0.950
	150	1.024
$C_8H_{18}(g) + 25/2\ O_2 \rightarrow 8CO_2 + 9H_20$	25	0.963
	150	1.034
$C + 1/2\ O_2 \rightarrow CO$	25	1.24
	150	1.37
$C + O_2 \rightarrow CO_2$	25	1.00
	150	1.00
$CO + 1/2\ O_2 \rightarrow CO_2$	25	0.909
	150	0.860
$CH_3OH + 3/2\ O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$	25	0.967
$NH_3 + 3/4\ O_2 \rightarrow 1/2\ N_2 + 3/2\ H_2O$	25	0.930
	150	0.612
$N_2H_4 + O_2 \rightarrow N_2 + 2H_2O$	25	0.967
$Li + 1/2\ Cl_2 \rightarrow LiCl(g)$	150	1.57

Stupanj efikasnosti $\eta_t > 1$ znači rad uz spontano hlađenje. Teoretsku vrijednost termodinamičkog stupnja efikasnosti nije moguće postići u realnim gorivnim elementima zbog Jouleovih gubitaka uzrokovanih prolazom struje kroz unutrašnji otpor elementa.

Napon na stezaljkama gorivnog elementa uvijek je manji od elektromotorne sile, tako da je naponski stupanj efikasnosti uvijek manji od 1. Da bi on bio jednak 1, reakcija u elementu trebala bi biti beskonačno spora, tj. struja bi trebala težiti nuli.

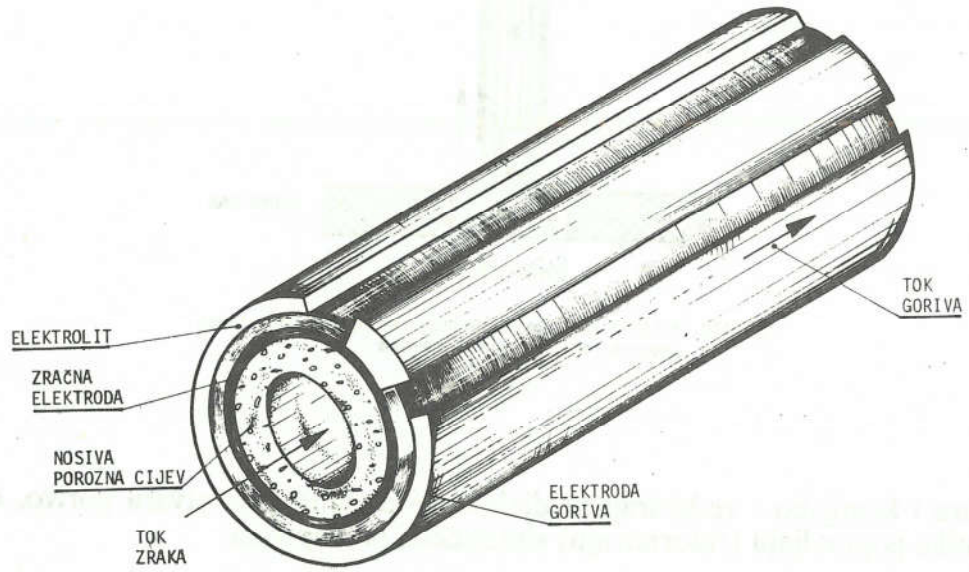
Faradayski stupanj efikasnosti gotovo uvijek je manji od 1 zbog toga što se najčešće ne postiže stehiometrijska potpunost elektrokemijske reakcije, odnosno zbog toga što uz glavnu reakciju postoje i paralelne elektrokemijske reakcije koje su manje efikasne.

Jedan od mogućih načina podizanja efikasnosti realnih gorivnih elemenata je podizanje stupnja oksidacije na više iznose. Međutim, to podrazumijeva rad na znatno višim temperaturama (npr. za gorivne elemente s plinom to je područje temperatura od 800 do 1200 K), koje, s druge strane, onemogućuju primjenu određenih tekućih elektrolita (npr. alkalne otopine). U takvim slučajevima nužna je primjena čvrstih elektrolita sposobnih za ionsko vođenje. Nastojanja da se razvijaju efikasni visokotemperaturni gorivni elementi rezultirali su razvojem gorivnih elemenata čvrstog oksida.

Najveći stupnjevi razvoja gorivnih elemenata čvrstog oksida postignuti su u razvoju gorivnih elemenata krutog oksida u obliku cijevi s aksijalnim prstenom za međuspajanje, koji omogućuje njihovo povezivanje u seriju i paralelno. Taj razvoj ujedno je stvorio pretpostavke dobivanju čistih, efikasnih i ekonomičnih sistema gorivnih elemenata čvrstog oksida za zajedničku proizvodnju električne energije i topline, odnosno samostalnu proizvodnju električne energije.

Primjer konstrukcije gorivnog elementa čvrstog oksida prikazan je na sl. 174.

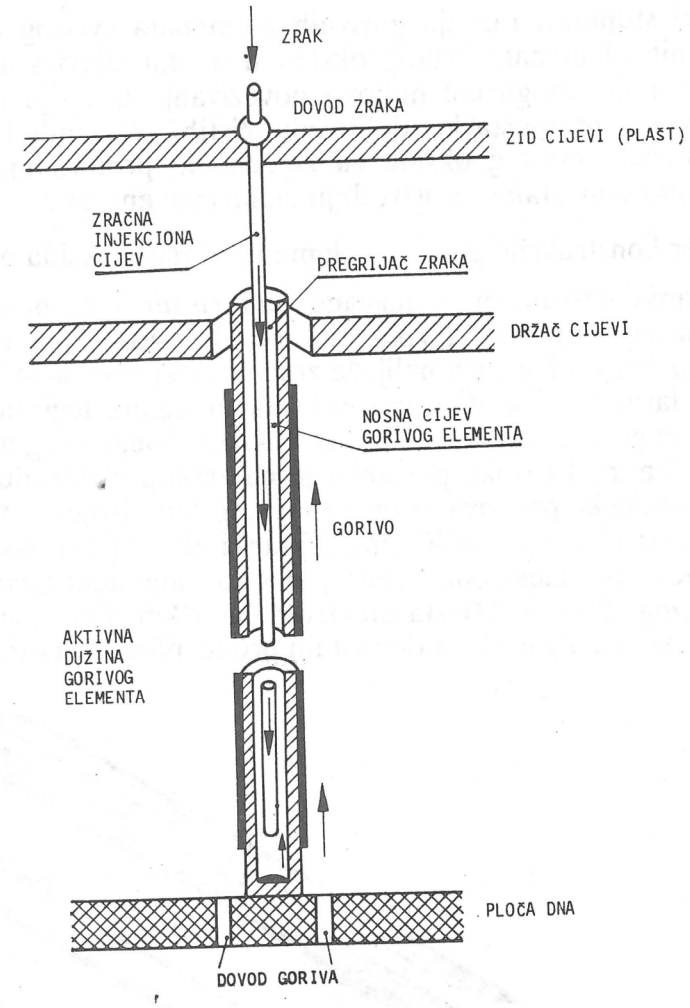
Vrlo tanki aktivni slojevi (naslage) sinterirani su na nosivu poroznu keramičku cijev stabiliziranu kubičnom fazom cirkonij dioksida. Promjer cijevi je 12 mm, a debljina 1 mm. Na nosivu cijev naliježe zračna elektroda, koja je u stvari 1 mm debeo porozni film lariton - hidratiziranog oksida mangana legiran stroncijem. Traka za međuvezu je od gustog lanton kromita (ferokromit) legiranog magnezijem, debelog 30 μm i širokog 9 mm. Ta traka položena je na zračnu elektrodu. Sav ostali dio zračne elektrode hermetički prekriva i zatvara gusti film itrijem stabiliziranog cirkonij - dioksidnog elektrolita debelog 40 μm. Taj tanki film odvaja oksidans i gorivo gorivnog elementa. Gorivnu elektrodu čini porozna metalokeramika nikal-cirkonijevog dioksida debelog 150 μm. Mjesta elektromehaničkih djelovanja (reakcija) su spojevi elektrolita, elektrode i pare koje dopuštaju prolaz plinova (goriva).



Sl. 174. Glavne komponente gorivog elementa čvrstog oksida

Tokom rada zrak se uvodi u unutrašnjost do zatvorenog broja elementa pomoću zračne injekcione cijevi (sl. 175). Gorivo se također dovodi na zatvorenom kraju nosive cijevi, ali na vanjsku površinu. Gorivo i oksidans vode se duž cijevi i pri tom se troše.

U pravilu, gorivni elementi uvijek čine skupove koji se vežu paralelno, odnosno u seriju, kako bi se ostvarili veći iznosi napona i struje. Paralelnu vezu omogućuju kvadratna formacija pojedinih elemenata među kojima se veza izvodi pomoću elastičnog niklanog filca sinteriranog u toku za međuvezu jednog elementa i anodu susjednog elementa. Nastala električna snaga prenosi se u vanjski krug vezom tog filca i niklanih sabirnica. Nikal se koristi zbog postojanosti na djelovanju povišenih



Sl. 175. Princip rada jednostavnog, hermetički zatvorenog generatora s gorivim elementom

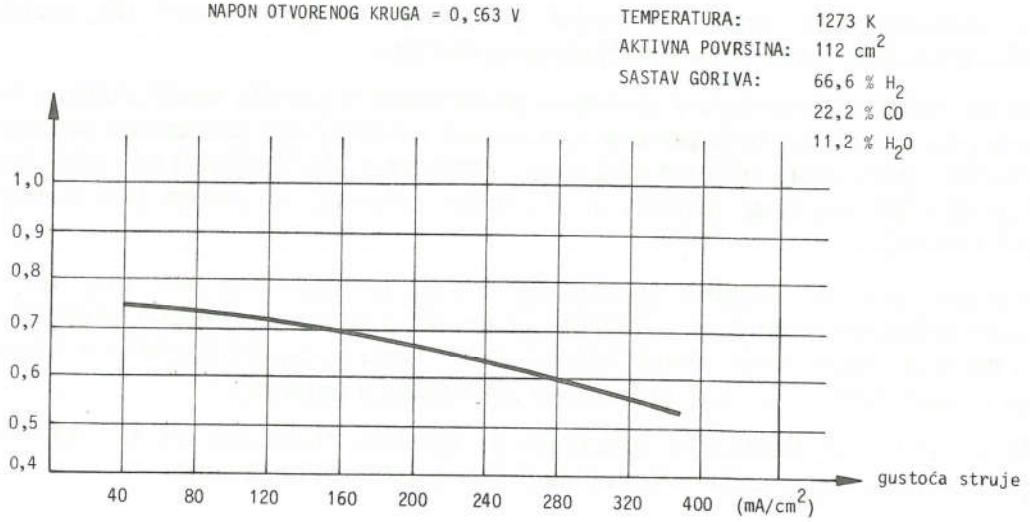
temperatura i kemijsko - reducirajuće djelovanje okoline koju stvara gorivo, čije se karakteristike popravljaju (reformiraju) sintetičkim postupcima.

Karakteristika naponske ovisnosti o struji spomenutog gorionog elementa prikazana je na slici 176.

Kod napona 0.63 V taj gorivni element daje struju od 28 A, uz gustoću struje blizu 250 mA/cm^2. Njegova moguća vršna snaga kod radne temperature 1270 K je 20 W, uz iskorištenje goriva od 85%. Takvi gorivni elementi pokazali su i veliku postojanost strukture i sastava, odnosno otpornost na promjenu kvaliteta i karakteristike, pri dugom radu s punim opterećenjem i kod promjena opterećenja ili uvjeta rada (različite radne temperature).

Kako je prije navedeno, generator gorivnih elemenata ostvaruje se vezanjem pojedinačnih gorivnih elemenata paralelno, odnosno takvih paralelnih grupa elemenata u seriju. Dosadašnja iskustva potvrdila su opravdanost konstrukcija hermetički zatvorenih generatora sa samopodržavajućim termičkim djelovanjem.

Primjenom navedenih principa konstruiran je i izveden generator sa 24 gorivna elementa (tri gorivna elementa vezana paralelno, i osam grupa u seriji). Uz gustoću



Sl. 176. Primjer ovisnosti napona o gustoći struje za izvedbu gorivog elementa

struje od 250 mA/cm^2 dobiven je napon 384 V, uz efikasnost korištenja goriva 45%. Ostvarena je i dobra postojanost na temperaturama višim od radne temperature i za struju veću od 50 A.

Slijedeći korak je bio konstrukcija generatora sa 324 gorivna elementa (18 grupa po 18 snopova, u snopu po 3 gorivna elementa u paraleli i 6 u seriji) i s nominalnom snagom 5 kW. Kod snage 5.2 kW ostvareno je iskorištenje goriva 83% uz efikasnost 41%.

Do sada razvijeni modeli generatora s gorivnim elementima pokazali su i dobra svojstva pri radu u elektroenergetskom sistemu. Ostvareno je automatsko podešavanje goriva i tokova napajanja zraka ovisno o promjenama električnog opterećenja, odnosno postavljenim vrijednostima radne temperature, iskorištenja goriva ili iskorištenja zraka. Sistemima za reformaciju plina električnim grijanjem omogućena je upotreba bilo vodika i ugljičnog monoksida, bilo prirodnog plina kao goriva. Ostvareni su i zadovoljavajući regulacijski i kontrolni podsistemi za predzagrijavanje zraka i kontrolu radne temperature generatora. Uvođenje zraka i moduliranje njegova toka, filtriranje zraka, moduliranje i regulaciju skoliometrijskog sastava plinskog goriva, ovlaživanje plinskog goriva, te konstrolu i vođenje, odnosno isključivanje u nenormalnim pogonskim uvjetima. Putem automatske modulacije toka i ulazne temperature zraka kontrolira se rad generatora i iskorištenje goriva, iskorištenje zraka, srednja radna temperatura i područje vrijednosti za električno opterećenje.

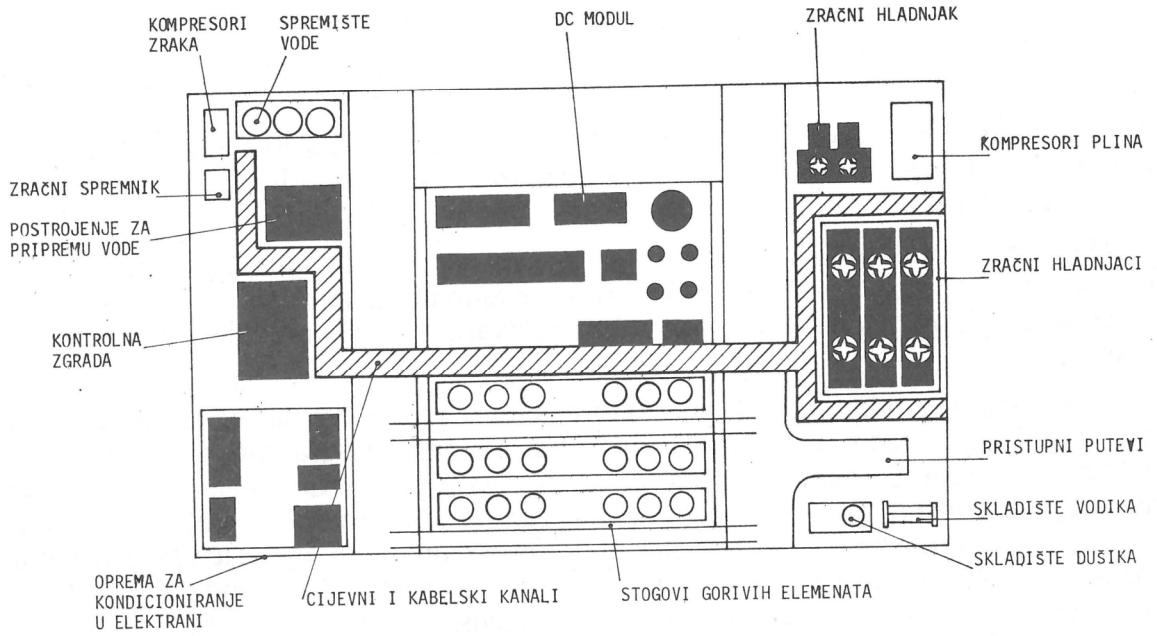
Sistemi za kombiniranu proizvodnju sastoje se od pogonskog stroja koje koristi fosilno gorivo kombiniranog s električnim generatorom i postrojenja za obnovu potrošene topline iskorištenih plinova. Gorivni elementi u toj kombinaciji pretvaraju kemijsku energiju goriva direktno u električnu energiju (s visokom efikasnošću konverzije). Iskorišteni plinovi koji napuštaju gorivne elemente još uvijek imaju visoke temperature (iznad 870 K), što se pri radu s dijelom opterećenja može dalje koristiti u konvencionalnim termoenergetskim jedinicama s kružnim procesom pare. Za iskorištenje generatora s gorivnim elementima to znači znatno proširenje područja primjene kapaciteta i pojednostavljenje upravljanja gorivom. Ujedno se znatno

povećava prilagodljivost rada jer radni parametri mogu varirati do različitih električnih i termičkih kapaciteta kombiniranog sistema.

Izlazni plinovi generatora s gorivnim elementima u pravilu imaju malu gustoću snage, pa se, da bi se ta gustoća povećala, ti sistemi podvrgavaju povećanim pritiscima. Time se ujedno povećava i njihova efikasnost pretvorbe. Za kombinirano postrojenje to znači podizanje najvišeg pritiska u kružnom procesu, a samim tim i stupnja korisnog djelovanja.

Prirodni plin je idealno gorivo za takve kombinirane sisteme, ali i s rasplinjenim ugljenom moguće je ostvariti vrlo visoku korisnost primjene, pogotovo za sisteme s nivoom opterećenja iznad 500-600 MW, kada termički koeficijent krosnog djelovanja prelazi 58% (kod viših vrijednosti zagrijavanja ugljena).

Na sl. 177. radi ilustracije prikazana je izvedba elektrane od 11 MW, koja zahvaljujući modularnoj izvedbi omogućuje dobar pristup i održavanje.



Sl. 177. Položajna izvedba elektrane 11 MW s gorivim elementima

DC modul čine tehnološki dio obrade goriva, turbokompresor za napajanje gorivnih elemenata zrakom, te skup od 18 stogova gorivnih elemenata (SGE) u posudama koje se nalaze u središnjem polju ili otoku.

Lijevo polje ili otok čine kondicioni sistem, neposredno uz SGE (kako bi se osiguralo neposredno vođenje opterećenja DC-a) kontrolne zgrade i pogon zračnih kompresora.

Konačno, istočni blok sadrži kompresore za održavanje metana pod pritiskom 17 bara za potrebe gorivnog tehnološkog sistema, zrakom hlađene toplinske sabirnike, spremišta za vodik i dušik, plinove koji se koriste tokom starta i zaustavljanja elektrane.

Ova izvedba zauzima površinu manju od jedne trećine hektara.

Gorivni elementi proizvode se za sada samo za specijalne svrhe ili radi istraživanja.

Niskotemperaturni gorivni elementi s vodikom i kisikom proizvode se kao standardizirani i serijski tipovi, ali njihov rad je vrlo skup i koriste se samo za specijalne namjene. Nešto povoljniji su gorivni elementi s prirodnim plinom, kod kojih se nastoje razviti i efikasni visokotemperaturni tipovi, uglavnom s čvrstim elektrolitom sposobnim za ionsko vođenje.

Vrlo nagli napredak ostvaren je na području gorivnih elemenata čvrstog oksida. U pogonu su, uglavnom radi ispitivanja, generatorske jedinice kojima se već postižu zadovoljavajuća specifična snaga, pouzdanost i ekonomičnost, kako za samostalnu proizvodnju električne energije, tako i za zajedničku proizvodnju električne i toplinske energije. Postignute su i zadovoljavajuće pogonske karakteristike i regulacija parametara u neprekidnom radu dužem od 2000 sati.

Glavnina istraživanja i razvojnih programa okrenuta je razvoju gorivnih elemenata koji bi koristili plinove dobivene rasplinjavanjem ugljena.

Međutim, kako još uvijek nema većih iskustava s jedinicama snage iznad 2 MW, na tom području i dalje bez konkurencije ostaju procesi, odnosno postrojenja s neposrednim izgaranjem goriva, a pogotovo u proizvodnji električne energije, gdje klasične elektrane prelaze snagu od nekoliko stotina MW. S druge strane problem lokacije takvih elektrana postaje sve veći, pogotovo u područjima većih gradova, pa jedno od rješenja mogu biti disperzirane elektrane s generatorskim sistemima gorivnih elemenata.

Zbog svega toga, očekuje se da će se uskoro ostvariti povoljna upotreba takvih sistema u kategoriji komercijalne upotrebe (dvije trećine komercijalnog tržišta koristi snage iznad 200 kW), odnosno u industrijskoj kombiniranoj proizvodnji u velikim gradovima.

Tri najznačajanije prednosti gorivnih elemenata koje osiguravaju perspektivu njihove buduće upotrebe su:

a) visok stupanj djelotvornosti (znatno viši nego u svim do sada upotrebljavanim termičkim procesima za proizvodnju električne energije);

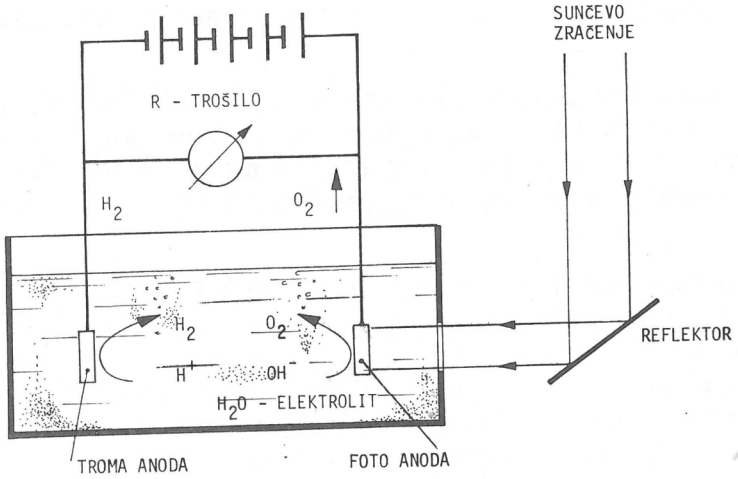
b) mali negativni utjecaj na okolinu (količina otpadne topline iz gorivnih elemenata manja je nego iz konvencionalnih postrojenja, a produkti izgaranja, ovisno o gorivu, ili ne sadrže štetnih sastojaka, ili njihova količina ovisi o potpunosti izgaranja);

c) gotovo bešuman rad.

2.9.5. FOTOELEKTROKEMIJSKA PRETVORBA

Fotoelektrokemijska pretvorba je vrsta direktne pretvorbe solarne energije zračenja u istom pretvaraču bilo u električnu, bilo u kemijsku energiju proizvodnjom goriva. Fotoelektrokemijski uređaji su zapravo elektrolitski uređaji u kojima su konvencionalni izvori energije za kemijsku razgradnju elektrolita, najčešće vode, zamjenjeni solarnom energijom.

Na sl. 178. prikazan je jednostavan uređaj za fotoelektrokemijsku pretvorbu, tzv. fotoelektrokemijska ćelija.



Sl. 178. Princip rada fotoelektrokemijske pretvorbe

Proces fotoelektrokemijske pretvorbe započinje u fotoanodi (poluvodič n-tipa), gdje se energija solarnog zračenja pretvara u električnu energiju. Nastale šupljine prelaze u elektrolit a elektroni ostaju u vanjskim slojevima poluvodiča. Elektrolit igra ulogu sloja p-tipa solarne ćelije. Šupljine koje su dospjele u elektrolit trebale bi se ponovo povratnim djelovanjem spojiti, odnosno rekombinirati s elektronima u vanjskim slojevima fotoanode, čime bi bila sprečena proizvodnja električne struje. Međutim, to se ne dešava zahvaljujući pojavi koja se zove "pojas savijanja" ("iskrivljenje opsega").

Fotonaponski proces započinje u uvjetima uspostavljene električne ravnoteže fotoanode i elektrolita, kad više nema prenosa naboja (elektrona i šupljina) među njima. Sama ravnoteža uspostavlja se prenosom elektrona iz poluvodiča u elektrolit.

Da bi se elektroni iz unutrašnjosti poluvodičke fotoanode preko pojasa zabranjene energije prenijeli na njenu površinu, odnosno u zonu vodljivosti, potrebno je uložiti rad. Naime, nakon uspostavljene ravnoteže elektrolit koji je u dodiru s površinom fotoanode negativno je nabijen i sprečava prelazak elektrona u zonu vodljivosti. Zona vodljivosti zapravo je savijena (otklonjena) od površine do neke dubine unutar fotoanode. Unutar pojasa savijanja ("iskrivljenja opsega") nema elektrona. Taj pojas nalazi se između elektrolita i nove zone provedenosti, sprečavajući na taj način nastanak kratkospojene veze fotoanode i elektrolita.

Elektroni nastali u fotonaponskom procesu ne mogu prevladati postavljenu barijeru pojasa savijanja. Da bi se rekombinirali sa šupljinama koje su prešle u elektrolit, moraju proći kroz vanjski strujni krug (a time i trošilo!) i katodu. Dakle, kroz krug trošila uspostavlja se tok električne struje.

Procesom rekombinacija elektrona i šupljina sprečava se pozitivno nabijanje elektrolita šupljinama iz fotonaponske reakcije u poluvodičke anode. Pozitivno nabijanje elektrolita šupljinama značilo bi uništenje pojasa savijanja.

U procesu fotoelektrokemijske pretvorbe pored pretvorbe solarne energije u električnu energiju odvija se i pretvorba solarne energije u kemijsku energiju u obliku kemijskog goriva, najčešće vodika. To je energetski vrlo kvalitetno gorivo u čijem se procesu oksidacije s kisikom oslobađaju velike količine topline i nastaje voda. Osim

toga, nastalo kemijsko gorivo može se upotrebiti u gorivim ćelijama za proizvodnju električne energije.

Elektrode fotoelektrokemijske ćelije su, jedna ili obje, čvrsti poluvodički materijali čije karakteristike odgovaraju karakterističnim valnim dužinama svjetlosti. U ćeliji za fotoelektrolizu vode kisik se proizvodi na anodi u procesu koji ima oblik:

$$2OH^- \rightarrow O_2 + 2H^+ + 4e^-, \qquad (405)$$

a vodik na katodi u procesu koji ima oblik:

$$4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H. \qquad (406)$$

Ukupna reakcija ima oblik:

$$2H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2. \qquad (407)$$

Elektroni u navedenim procesima prolaze kroz vanjski strujni krug, tvoreći tok električne struje. Međutim, zajedničkom proizvodnjom kemijskog goriva i električne energije do sada nije postignuta zadovoljavajuća korisnost. Tako je, npr., do sada ostvarena maksimalna korisnost pretvorbe solarne energije u kemijsko gorivo (vodik!) oko 1-2%, što je daleko ispod 10%, što se smatra donjom granicom korisnosti solarnih pretvorbi, a pogotovo daleko od teoretskih vrijednosti. Dodaju li se k tome i visoki troškovi proizvodnje, odnosno nepovoljan odnos energije koju treba uložiti za proizvodnju ćelije u odnosu na energiju koja se dobiva iz ćelije, očito je da je komercijalno korištenje još uvijek vrlo daleko.

U fotoelektrokemijskim ćelijama odnos proizvedene električne energije i kemijskog goriva ovisan je o sastavu elektroda, odnosno ponašanju graničnih površina elektroda i tekućine. Kada su elektrode samo poluvodički materijali, u graničnom prostoru proizvode se električna energija i gorivo ovisno o prirodi procesa oksidacije i redukcije vezanih za vrstu otopine. Međutim, prekrije li se osnovni element ćelije, tj. poluvodička elektroda, tankim filmom nekog metala, npr. zlata, direktno se proizvodi električna energija.

Za proces elektrolize u fotoelektrokemijskoj ćeliji nužan je određeni minimalni napon između anode i katode da bi se sam proces mogao odvijati. Za elektrolizu vode, npr., nužan je minimalni napon 1.23 V. S druge strane, maksimalni napon koji se može postići s obasjanim poluvodičem ovisan je od toga poluvodiča. Izlazni rad je, dalje, mjera za najveću valnu dužinu svijetla koje još uspjeva "izvući" elektron iz polumetala. Za svjetlo većih valnih dužina elektron se više ne može izvući izvan poluvodiča, dok se energija svjetla manjih valnih dužina može iskoristiti samo do dijela koji odgovara izlaznom radu.

Upotrebom poluvodiča s malim izlaznim radom dobio bi se prenizak izlazni napon za uspješnu proizvodnju visoko-energetskog goriva. S druge strane, materijali s velikim izlaznim radom daju velike izlazne napone, ali se uslijed toga popušta i ne koristi glavnina energije svjetla. U sistemima koji koriste samo jednu fotoelektrodu najefikasniji za upotrebu su poluvodički materijali s izlaznim radom oko 1.4 eV. Teoretska vrijednost solarnog uređaja s elektrodama od poluvodičkog materijala koji ima izlazni rad 1.4 eV je 30%. Međutim, proizvodnja vodika i kisika može tražiti 1.8 eV, budući da konvencionalne ćelije za proizvodnju vodika i kisika traže oko 1.5 V. Da bi se na anodi i katodi ostvarile reakcije u zadovoljavajućem iznosu potreban je napon veći od minimalnih 1.23 V. Višak napona utječe na korisnost ćelija za elektrolizu, odnosno ćelija za fotoelektrokemijsku pretvorbu.

Kako je prije navedeno, ukupna izlazna energija fotoelektrokemijskog

pretvarača, tj. suma kemijske energije goriva i električne energije, proporcionalna je širini pojasa savijanja, odnosno potencijalu duž tog pojasa koji je "oslobođen" od elektrona. Taj napon odgovara ujedno i padu napona u vanjskom strujnom krugu. Stupanj korisnosti pretvorbe ćelije određen je odnosom energije pojasa savijanja i izlaznog rada.

Energija pojasa savijanja iznosi oko 0.63 eV. Za kadmijev telurid izlazni vod iznosi, npr., 1.4 eV, pa je maksimalni sutpanj djelovanja pretvorbe u tom slučaju 0.45. Međutim, takav stupanj djelovanja još nije postignut, ali one pokazuju da fotoelektrokemijski pretvarači imaju mogućnosti barem kao fotonaponski pretvarači, od kojih su puno fleksibilniji. Pored pretvorbe svjetlosne energije u električnu energiju i mogućnosti skladištenja proizvedene kemijske energije, moguće je još ostvariti kontrolu i upravljanje odnosa proizvodene električne i kemijske energije. Osim toga, u odnosu na "suhe" fotonaponske ćelije znatno su smanjeni i tehnološki problemi. Potapanjem u elektrolit odmah se uspostavlja pojas savijanja čime se postiže antireflektirajuće prekrivanje, a ujedno i štiti poluvodič od vanjskih utjecaja. Vrlo lako se ostvaruju kontakti elektroda i elektrolita (spoj bruto - tekuće), tako da otpadaju problemi vezani za temperaturnu osjetljivost spojeva bruto - bruto.

Sve to skupa pokazuje da fotoelektrokemijski pretvarači imaju vrlo velike mogućnosti kao uređaji za proizvodnju i uskladištenje energije, ali da bi se to ostvarilo, morat će se prethodno riješiti još puno problema.

Važan problem predstavljaju korozivni procesi na fotonanodi, posebno kad se koristi n-tip poluvodiča, kada degradacija fotoanode postaje značajna.

Najveća postignuta korisnost pretvorbe takvih ćelija iznosi oko 12%, i to za ćelije u kojima se koristi monokristal n-galijeva arsenida. Uz korištenje p-tipa poluvodiča ostvaruje se korisnost pretvorbe oko 11.5%, ali uz znatno stabilniju ćeliju.

3. PRIJEVOZ I PRIJENOS OBLIKA ENERGIJE

3.1. OPĆENITO O PRIJEVOZU I PRIJENOSU OBLIKA ENERGIJE

U prvoj knjizi opisani su prirodni i korisni oblici energije, a u ovoj knjizi opisane su pretvorbe oblika energije, pa je, za potpuno sagledavanje energetske bilance, potrebno obraditi probleme prijevoza i prijenosa oblika energije od mjesta pridobivanja ili pretvorbi do potrošača.

Prijevoz i prijenos energije - u njenim prirodnim ili pretvorbenim oblicima, nezaobilazna je karika u svakom sistemu opskrbe ili snabdijevanja energijom. Doslovno svuda gdje žive i rade ljudi, troši se energija čiji su izvori i po broju i po količini ograničeni.

Zato je snabdijevanje potrošača energijom na svakom mjestu, gdje je to potrebno, vitalan problem suvremenog svijeta koji se uspješno savlađuje samo uz pomoć prijevoza i prijenosa energije od mjesta pridobivanja ili prerade do mjesta potrošnje - udaljeno ponekad više tisuća kilometara.

Problemi opskrbe energijom, vrlo su složeni, a za očekivati je da će u doglednoj budućnosti to biti još i više, zbog toga što su osnova današnje energetike fosilna goriva čija je ograničenost u prirodi sve očitija, a njihova potrošnja sve veća.

Naime, broj zemalja koje su u stanju da ukupne potrebe za energijom zadovolje iz vlastitih izvora, veoma je mali, što se i vidi iz podataka navedenih u nastavku.

ZEMLJA	SAMOZADOVOLJENJE U % u 70.-tim godinama	u 80.-tim godinama
Kanada	100	100
SSSR	100	100
NR Kina	100	100
SAD	85	88
Nizozemska	70	100
Jugoslavija	67	63
Velika Britanija	50	100
SR Njemačka	40	46
Francuska	25	27
Španjolska	20	34
Italija	15	16
Belgija	15	20
Japan	10	10

Pri navedenim podacima potrebno je pripomenuti, da se radi o ukupnoj energetskoj bilanci, pa se može dogoditi da pojedine zemlje koje se mogu zadovoljiti vlastitom proizvodnjom prirodnih oblika energije, moraju ostvariti neki od pretvorbenih oblika energije i obratno. Navedeni podaci upućuju na zaključak, da većina zemalja svijeta svoje potrebe za energijom - u manjoj ili većoj mjeri, zadovoljava, preko međunarodnog energetskog tržišta i svjetski poznatih izvora lociranih u manjem ili većem broju zemalja.

S obzirom na ograničenost izdašnih izvora energije svjetskog značaja na manji broj područja i zemalja i stalnog porasta potrošnje, naročito nafte, plina, ugljena i urana, međunarodni promet energije u prošlosti je rastao do kraja 70-tih godina, kada počinje stagnirati i opadati.

Navedenu tvrdnju potvrđuju podaci o ostvarenom međunarodnom prometu oblika energije za neke godine u prošlosti kako slijedi.

OSTVARENI PROMET OBLIKA ENERGIJE U SVIJETU

- 10^6 t ekviv.ugljena

OBLICI ENERGIJE	GODINA				
	1925.	1960.	1970.	1977.	1983.
1. Kruta goriva	145.0	120.0	170.0	203.0	267.0
2. Nafta i derivati	70.0	375.0	2200.0	2468.0	1730.0
3. Prirodni plin	0.0	1.0	40.0	163.0	260.0
4. Električna energija	0.2	0.5	4.0	15.0	25.0
Ukupno	215.2	496.5	2414.0	2849.0	2282.0

Iz navedenih podataka očito je da u međunarodnom prometu oblika energije nafta i derivati ne samo da dominiraju, već daleko premašuju sve druge energetske oblike energije.

Iz navedenih podataka također se može vidjeti, da u posljednjih desetak ili nešto više godina - pored krutih goriva (ugljen, koks, lilgnit, treset, drvo), nafte i derivata, u međunarodnom prometu oblika energije sve značajnije se pojavljuje plin, i to prirodni (zemni) i ukapljeni plin.

Razina prometa oblika energije u Jugoslaviji određena je rasporedom prirodnih i pretvorbenih oblika energije veličinom i rasporedom potrošnje energije. Naravno, na razinu prometa energije u Jugoslaviji utječe i struktura upotrebljene energije odnosno, udio prirodnih i pretvorbenih oblika energije u ukupnoj potrošnji energije.

Iako Jugoslavija proizvodi relativno značajne količine energije (ugljena) i manje plina i nafte, njena zavisnost od međunarodnog tržišta, odnosno, od uvoza energije je dosta velika. Već je ranije napomenuto da se stupanj te zavisnosti kreće danas na razini od oko 40%.

3.2. NAČINI I SREDSTVA ZA PRIJEVOZ I PRIJENOS ENERGIJE

Načini i sredstva prijevoza i prijenosa oblika energije razvijali su se paralelno s razvojem potrošnje i prometa prirodnih i pretvorbenih oblika energije.

Još od najranijih dana, da bi proizveo potrebnu toplinu za zagrijavanje ili pripremanje hrane, čovjek se je služio otpacima biljnog i životinjskog porijekla, drvom i kasnije ugljenom. Otpatke biljnog i životinjskog porijekla, drva i ugljena čovjek je do svojih nastambi u početku nosio na svojim leđima ili vukao kao što je bio prvi prijenos (ili prijevoz) oblika energije.

Razvojem potrošnje, a ona je posljedica razvoja društva (razvoj urbanizacije, obrta, industrije), razvili su se i načini prijevoza i prijenosa oblika energije i to:

a) prijevoz morima i jezerima
b) prijevoz rijekama
c) prijevoz cestama i putevima
d) prijevoz željeznicom
e) prijenos cjevovodima
f) prijenos električnim vodovima
g) prijevoz nuklearnih goriva
h) prijenos transportnim trakama i žičarama, te kombinacije prijevoza i prijenosa oblika energije.

Energija se obično mora prevesti odnosno prenijeti od mjesta proizvodnje do mjesta potrošnje. U tu svrhu, mada različito intenzivno, koriste se sva raspoloživa sredstva prijevoza i prijenosa energije. U međunarodnom prometu energije more - kao put koji povezuje i najudaljenije zemlje, igra - što je i razumljivo najznačajniju ulogu. U unutrašnjem prometu međutim, uloga pojedinih načina i sredstava prijevoza i prijenosa vrlo je različita od jedne do druge zemlje, zavisno od niza faktora (geografskih, hidroloških, stupnja razvijenosti, klime, prirodnih bogatstava itd.).

U međunarodnom prometu energije korištenje ostalih načina i sredstava prijevoza nije tako intenzivno kao u slučaju pomorskog prijevoza. Priobalni prijevoz, prijevoz na unutrašnjim vodama, željeznički i cestovni koriste se mnogo intenzivnije u unutrašnjem prometu. Svaka nacionalna prometna politika teži ekonomičnosti prometnog procesa, a to znači da se promet ostvaruje uz minimalne troškove.

Ponekad se međutim javljaju izvjesne teškoće koje stoje na putu ostvarenja tog cilja, a odnose se na određena ograničenja odnosno na zahtjeve koji se uvode bilo administrativno, bilo običajima i tradicijom, što sve ima utjecaja i na ekonomičnost i na troškove.

U razvijenim zemljama danas, broj energenata odnosno oblika energije koji se prevoze i prenose s jednog na drugo mjesto, dosta je velik, kao i broj načina i sredstava uz pomoć kojih se to obavlja. Kao način i sredstva prijevoza i prijenosa i energenti se razlikuju po svojim karakteristikama od kojih se među najvažnijima smatraju:

- gustoća odnosno težina energenta,
- volumen odnosno intenzitet tražnje prometnih usluga u jedinici vremena,
- vrijednost energenta i njegove fizičko-kemijske karakteristike.

Osim navedenih, postoje naravno i mnoge druge koje su naročito važne za pojedine energente odnosno oblike energije u specifičnim situacijama. Među njima se ističu rasipanje, isparavanje, zapaljivost, eksplozivnost itd.

Kada se govori o načinima i sredstvima prijevoza i prijenosa treba spomenuti, da kod cjevovoda važnu ulogu igra i mogućnost miješanja jednog proizovda s drugim odnosno, mogućnost njihovog razdvajanja. Upravo to povećava mogućnost korištenja inače visoko specijaliziranih cjevovoda, a olakšava i manipulaciju na pretovarnim i

distributivnim punktovima. Drugo važno pitanje kod cjevovoda je ravnomjernost potražnje odnosno potreba za projevozom u toku godine, sezone, mjeseca ili dana.

S obzirom na neke osnovne karakteristike, danas najviše korišteni oblici energije mogu se svrstati u tri osnovne grupe.

U prvu grupu svrstavaju se prirodni oblici energije masovne upotrebe kao što su nafta, ugljen i plin.

U drugu grupu svrstavaju se pretvorbeni oblici energije kao što su naftni derivati, prerađevine ugljena, ukapljeni plinovi, električna energija i slično.

U treću grupu svrstavaju se nuklearna goriva.

Kod izbora načina i sredstava prijevoza potrebno je dobro poznavati ne samo karakteristike svakog od njih, već i karakteristike proizvoda odnosno oblika energije koji se namjeravaju prevoziti. Naravno da pri izboru načina i sredstava prijevoza za određeni oblik energije, jednu od najvažnijih uloga za korisnika prijevoza igraju troškovi prijevoza odnosno prijenosa. Usporedba troškova trebala bi biti bitan elemenat u osnovi svake politike prijevoza koja želi biti efikasna i uspješna. Često međutim, izbor korisnika i sama osnova politike prijevoza, nisu isključivo stvar same usporedbe troškova, naročito ne u užem smislu riječi. Na tržištu prijevoznih usluga mogućnosti su često vrlo različite kao i sposobnost pojedinih načina i sredstava prijevoza da utiču na konačnu vrijednost prijevozne usluge. Čini se, da postoje i neki bitni institucionalni razlozi koji određene načine prijevoza čine sposobnijima za pružanje određenih usluga, nego što je to mogućnost većeg izbora ili konkukrencije na tržištu.

Kao jedan od najvažnijih institucionalnih razloga obično se ističe organizaciona elastičnost i tržišna sposobnost različitih načina prijevoza i prijenosa (kod željeznice su sasvim drugačiji nego kod cestovnog prijevoza). Međutim, ako se kod izbora načina i sredstava prijevoza ograniči storgo samo na usporedbu troškova, čak i tada se mogu sresti brojne teškoće i problemi. Na primer jedan od tih problema je i utvrđivanje vremenskog razdoblja za koji treba izvršiti kalkulaciju troškova.

U poslijednje vrijeme je razvoj sredstava cestovnog prijevoza utjecao na mijenjanje uloge željeznice na tržištu. To se ne odnosi na mijenjanje ekonomskog položaja željeznice nego na mijenjanje njene uloge kao prijevoznika. Do promjena je došlo oduzimanjem značajnih količina prijevoza od željeznice u korist cestovnog prijevoza na kraćim i posebno na srednjim relacijama sa slabim prometom te svuda tamo gdje nema željezničkih pruga kao i kroz koncentraciju željezničkog prometa na magistralne pruge i na duže relacije. Ove tendencije ukazuju i na nove odnose u podjeli rada između pojedinih prijevoznih grana.

Svi navedeni načini prijevoza i prijenosa oblika energije, s izuzetkom prijenosa električnim vodovima i djelomično izuzetkom prijenosa cjevovodima, imaju opću namjenu, što znači da služe za prijevoz gotovo svih roba odnosno proizvoda.

3.2.1. PRIJEVOZ OBLIKA ENERGIJE MORIMA I JEZERIMA

Morima i jezerima vrši se prijevoz oblika energije pomoću različitih vrsta brodova s obzirom na njihovu izvedbu. Izvedba brodova ovisna je o njihovoj namjeni, a u osnovi se dijeli na:

- brodove za rasute terete
- brodove za prevoz tekućina - tankeri
- brodove specijalnih izvedbi.

Kao prijevozni put more je besplatan dar prirode kojega nije potrebno ni održavati osim luka i pristaništa. Po njemu mogu da plove brodovi gigantskih razmjera uz relativno malu pogonsku snagu i potrošnju energije.

Zbog velikih udaljenosti koje obično dijele područja proizvodnje od područja potrošnje oblika energije, a ta područja su obično razdvojena morima i oceanima zbog čega je za savladavanje tih udaljenosti more kao put u prijevozu oblika energije od najveće važnosti.

Unutar malih udaljenosti između mjesta proizvodnje i potrošnje oblika energije za njihov prijevoz korišteni su vodeni putovi rijeka i jezera.

Od prvih dana međunarodne trgovine energentima počela je upotreba brodova za rasute terete s pomoću kojih su se počeli prevoziti pojedini prirodni oblici energije. Upotreba brodova za rasute terete za prijevoz oblika energije koristila se ne samo u međunarodnoj trgovini nego i za prijevoz unutar jedne zemlje (obično su to velike zemlje s velikim obalskim područjem ili s velikim jezerima npr. u SSSR i SAD).

Brodovima za rasute terete najprije su se prevozili ugljen i drvo, a kasnije i prvi prijevozi tekućih goriva sve do pojave tankera. Razvojem međunarodne trgovine energetskim gorivima razvijali su se i brodovi za rasute terete prema namjeni i veličini. U međunarodnoj trgovini brodovima za rasute terete na veće udaljenosti prevoze se ugljen i uranova ruda (ili obogaćeni uran), dok se na manjim udaljenostima prevozi drvo (kao oblik energije), treset i otpaci.

Počeci prijevoza nafte običnim brodovima datiraju od samog početka upotrebe nafte. Nafta se spremala najprije u specijalnim opletenim sudovima od pečene zemlje, zatim u drvenim bačvama i krajem devetnaestog stoljeća u bačvama od željeznog lima i prvim tankerima.

Problemi prijevoza stalno rastućih količina nafte, naftnih derivata, prirodnog plina i svih drugih goriva mogli su se dakle uspješno rješavati samo upotrebom drugih boljih i suvremenijih sredstava, vodeći pri tom računa o karakteristikama goriva (agregatno stanje, hlapljivost, zapaljivost, vrelište, stinište itd.).

U nastavku će se ukratko iznijeti početak korištenja tankera za prijevoz nafte i naftinih derivata, te ukapljenog plina.

U 1871. godini počela se obavljati otprema sirove nafte i proizvoda iz nafte odnosno derivata i ostataka u tankerima. Nafta se spremala u potpalublje, a na palubi utovarivala u barelima i spremnicima iz željeznog lima. Takav prijevoz počeo se naglo širiti preko Kaspijskog mora i uzduž rijeke Volge, ali uz učestale nesreće i gubitke tereta uslijed požara. Nobel je međutim, i dalje radio na poboljšanju sistema prijevoza. Prvi je dao ugraditi spremnike iz željeza u potpalublje i prvi je dao naručiti izgradnju novog tankera specijalno namijenjenog prijevozu nafte (tanker Zaroester 1877. godine).

Tih godina u mnogim zemljama i brodogradilištima počinje izgradnja tankera za prijevoz nafte i derivata, a vremenom i do njihova usavršavanja. Tako su, pred početak prvog svjetskog rata, oko 3.3% trgovačke flote svijeta sačinjavali tankeri za prijevoz nafte i njenih derivata. Nakon uvođenja tehnike i tehnologije zavarivanja čeličnih limova početkom 30-tih godina ovog stoljeća, počinje izgradnja tankera većih

nosivosti. Nastavak gradnje većih tankera počinje odmah iza drugog svjetskog rata, pa već 1946. godine oko 21% svjetske trgovačke flote čine tankeri, a 1975. godine oni čine preko 50% trgovačke flote. U to vrijeme tankeri postižu nezamislive nosivosti od preko 500.000 t.

Prvi tanker u sastavu jugoslovenske trgovačke mornarice nabavljen poslije drugog svjetskog rata godine 1947. bio je "Jajce" od 12.910 tona i "Lendava" 1951. godine od 8.967 tona. Ovi tankeri s ukupno 21.879 tona predstavljali su 1951. godine 5.8% cjelokupne tonaže jugoslavenske trgovačke mornarice. Godine 1978. udio tankera iznosio je 9% od trgovačke flote.

Paralelno s razvojem potrošnje nafte i naftinih derivata rasla je proizvodnja i potrošnja prirodnog i ukapljenog plina. Godina 1947. izgrađen je i prvi tanker namijenjen pomorskom prijevozu ukapljenog naftnog plina u rasutom (bulk) stanju. To je bio tanker "Natalie Warren" izgrađen u SAD. Nešto kasnije (1951. godine) došlo se do ideje da se organizira i pomorski prijevoz ukapljenog prirodnog plina. Realizacija te ideje ostvaruje se 1959. godine kada se prvi put prevozi ukapljeni plin iz SAD u Veliku Britaniju.

Nakon toga dolazi do velike ekspanzije u gradnji specijalnih tankera za prijevoz ukapljenih plinova kako u broju tako i u pogledu jediničnih snaga.

Brzi razvoj flote za prijevoz ukapljenih plinova bazirao se je na stvarnim potrebama i procjenama razvoja do tzv. "energetske krize" iz 1973/74. godine. Stagnacija u privredi s inflacijom nakon tog razdoblja, zakašnjenja u realizaciji više projekata za ukapljivanje i otpremu prirodnog plina morskim putem utjecala je na to, da je dobar dio ove flote - kao i one za prijevoz nafte, ostao bez posla, što je rezultiralo rashodovanjem, raspremom ili preuređenjem dijela kapaciteta u neku drugu svrhu.

3.2.2. PRIJEVOZ OBLIKA ENERGIJE RIJEKAMA

Riječni prijevoz goriva datira od pojave prvih splavi kojima se prevozilo najprije drvo, zatim ugljen pa nafta i njeni derivati. S povećanjem prijevoza goriva postepeno se razvijala i povećavala riječna flota u prvom redu za prijevoz ugljena, a kasnije nafte i njenih derivata.

Tamo gdje za to postoje mogućnosti rijekama i kanalima prevoze se velike količine nafte, derivata i krutih goriva. S izuzetkom Velike Britanije i skandinavskih zemalja, prijevoz goriva rijekama i kanalima razvijen je i u Z.Evropi, naročito u Nizozemskoj, Belgiji, SR Njemačkoj i Francuskoj. On je razvijen u SAD, SSSR-u i podunavskim zemljama. Zbog vrlo različitih uvjeta prijevoza, širine i dubine rijeka i kanala, veličine i tipova riječnih prijevoznih sredstava, i troškovi prijevoza goriva vrlo su različiti od slučaja do slučaja i od zemlje do zemlje.

Po značenju i troškovima, prijevoz unutrašnjim vodnim putovima u Evropi i svijetu možemo podijeliti u dvije kategorije:

- onaj koji se obavlja glavnim vodnim saobraćajnicama
- onaj koji se obavlja sporednim vodnim saobraćajnicama

U posljednjih 25 godina prijevoz glavnim vodnim saobraćajnicama u Evropi i svijetu uveliko se izmijenio. U sve većoj mjeri primjenjuju se gurači temeljeni na iskustvima stečenim u SAD na rijeci Mississipi koji u daleko većoj mjeri nego tegljači

odgovaraju prirodi uskih, krivudavih i brzih rijeka. Najviše se koriste kombinirane jedinice koje se sastoje od potiskivača i potisnica.

Ovakve jedinice - ustvari kompozicije Rajnom, Senom, Volgom, Dunavom, svjevernoameričkim i drugim rijekama, osiguravaju relativno niske troškove prijevoza koje se u osnovi međusobno mnogo ne razlikuju od jedne do druge zemlje. Razlike u troškovima prijevoza međutim, mnogo su veće na malim rijekama i kanalima gdje se koriste male plovne jedinice i gdje je zbog različite gustoće prijevoza i brzine kretanja i obrtaj vrlo različit.

Riječni prijevoz nafte i derivata u drvenim bačvama (barelima) koji su se iz zaprežnih kola pretovarivali u teglenice, započeo je u stvari s proizvodnjom sirove nafte u SAD i SSSR. Teglenice natovarene s barelima nafte upućivale su se riječnim putem do Pittsburga (SAD) koji se smatra prvom naftnom lukom svijeta.

Krajem prošlog stoljeća na području Bakua porasla je proizvodnja i prerada nafte, firma "Bras Nobel" počela je sa prijevozom kerozina (petroleja) i mazuta preko Kaspijskog mora do ušća Volge i uzvodno.

Švedska brodograđevna firma "Lindholmen-Motala" izgradila je tanker s pogonom na paru "Zarooester" i čitavu flotu sličnih brodova namijenjenih prijevozu po Kaspijskom moru i Volgi.

Našim rijekama Dunavom, Savom, Tisom i Dravom riječni se prijevoz također obavlja od davnina.

Uvozna nafta i derivati između prvog i drugog svjetskog rata dopremali su se u Jugoslaviju uglavnom riječnim putem. To zato što su jedine dvije rafinerije u zemlji RN Sisak i RN Bosanski Brod bile smještene na obalama plovnih rijeka i zato što je tradicionalni snabdjevač sirovom naftom, prvo Srbije a kasnije stare Jugoslavije, bila susjedna podunavska Rumunjska.

Poslije drugog svjetskog rata situacija se međutim znatno promijenila i promet opada da bi 50-tih godina riječni prijevoz tekućih i krutih goriva opet postepeno rastao, a taj rast naročito se primećuje početkom 60-tih godina kada je u Vojvodini počela eksploatacija sirove nafte i 70-tih godina u Slavoniji i kada su izgrađene dvije nove rafinerije u Novom Sadu i Pančevu, obje na obalama Dunava. Puštanjem u pogon jugoslovenskog naftovoda našim rijekama obavlja se praktički samo transport rasutih tereta i domaće nafte i njenih derivata, jer se uvozna nafta i derivati transportiraju naftovodom od luka na Jadranu do rafinerija.

Rijekom Savom, Tisom i Dunavom prevozi se danas domaća sirova nafta do rafinerija i naftni derivati od rafinerija do centara potrošnje koji su smješteni uz obale spomenutih rijeka. Najznačajniji riječni prijevoz roba uopće pa tako i goriva ostvaruje se na području Srbije i Hrvatske.

3.2.3. PRIJEVOZ OBLIKA ENERGIJE CESTAMA I PUTOVIMA

Cestovna motorna vozila u prijevozu tekućih, ukapljenih i krutih goriva koriste se na kraćim, srednjim pa i dužim relacijama.

U prijevozu na duža odstojanja odnosno duge pruge cestovna motorna vozila (uglavnom autocisterne) koriste se za otpremu naftnih derivata od rafinerija i skladišnih instalacija do udaljenijih crpnih stanica i skladišta većih potrošača. Cestovna vozila koja prevoze goriva na srednje u duže relacije većeg su kapaciteta, ali se ne može govoriti o apsolutnoj podjelil vozila između ove dvije namjene.

Maksimalne dimenzije cestovnih vozila odnosno njihovi prijevozni kapaciteti nisu u svim zemljama isti i regulirani su odgovarajućim propisima. Propisani osovinski pritisak kreće se tako od 8 do 15 t.

Ukupni troškovi prijevoza goriva cestovnim vozilima po ostvarenom tkm-u obično su najveći. Međutim, cestovna vozila u prijevozu na kratke udaljenosti, ne samo da nisu najskuplja, računajući sve troškove kojima gorivo podliježe od mjesta isporuke do krajnjeg korisnika, nego su gotovo nezamjenjiv i često jedini način prijevoza. Prema mišljenjima stručnjaka, čak i onih koji dolaze sa željeznice, tajna uspjeha cestovnog motornog prijevoza u konkurentskoj borbi sa željeznicom sastoji se u njegovoj organizaciji koja je više decentralizirana i bolje prilagođena tržištu.

Treba međutim napomenuti, da cestovna motorna vozila obično pružaju superiorniju prijevoznu uslugu, a ona se očituje u načinu manipulacije, skladištenja, raspoloživom inventaru i drugim troškovima distribucije. Neki od ovdje spomenutih faktora daju bitne prednosti motornim cestovnim vozilima pred željeznicom, a drugi se pripisuju većoj pokretljivosti i fleksibilnosti kao i uslužnoj orijentaciji cestovnih vozila. U distribuciji manjih količina goriva na veliki broj odredišta crpnih stanica i skladišta potrošača) gotovo su nezamjenjiva, a često i jedino sredstvo prijevoza. Promatrano s aspekta ukupnih troškova prijevoza, prednosti cestovnog prijevoza u odnosu na željeznicu kreću se u današnjim uvjetima i do nekoliko stotina kilometara, što zavisi od zemlje do zemlje i razvijenosti jednog i drugog načina prijevoza.

U industriji nafte cestovni prijevoz obično se vezuje uz distribuciju naftnih derivata. On se u principu obavlja na kraće udaljenosti, ali se to ne može uzeti doslovno.

Za početak moderne distribucije naftnih derivata uzima se 1907. godina kada Standard Oil Co. Of California gradi prvu crpnu stanicu (prodajno mjesto na kojem se isključivo prodaju naftni derivati). Ta prva crpna stanica bila je izgrađena u SAD u Seattle-u (Washington).

Najveći potrošač motornih goriva u saobraćaju je cestovni saobraćaj zbog toga što ima daleko najveću populaciju vozila kako u javnom tako i u privatnom sektoru.

Da bi se zadovoljile potrebe u snabdjevanju gorivom milijunskih potrošača trebalo je izgraditi tisuće i tisuće crpnih stanica uz ceste i na druga odgovarajuća mjesta sa velikim brojem skladišnih i utovarno-istovarnih instalacija.

U distribuciji naftnih derivata koriste se danas svi načini i sredstva prijevoza, ali je cestovni prijevoz u većini zemalja najzastupljeniji.

Cestovnim putem prevozi se već duže vrijeme i ukapljeni naftni plin u rinfuzi i u bocama, a duboko pothlađen prevozi se i ukapljeni prirodni plin.

3.2.4. PRIJEVOZ OBLIKA ENERGIJE ŽELJEZNICOM

Željeznica je u većini zemalja svijeta - bar do masovnog razvoja cestovnog saobraćaja 60-tih godina, predstavljala, a i danas uglavnom predstavlja kičmu saobraćajnoj sistema. Sistem željezničkih saobraćajnica - zavisno o mogućnostima i razvijenosti neke zemlje, povezuje sva glavna područja i naselja.

Povijest razvoja željezničkog saobraćaja s obzirom na strukturne promjene može se podijeliti u tri karakteristična razdoblja:

- razdoblje ekstenzivnog razvoja,

- razdoblje intenzivnog razvoja i modernizacije željeznice i
- razdoblje međugradske integracije i procesa supstitucije saobraćaja.

Iako se ne može povući oštra granica njihovog vremenskog diferenciranja jer se tok razvoja ne prekida, ipak određeni momenti mogu se uzeti kao granica na kojoj se vrši izraziti prijelaz iz jedne etape u drugu.

Prvo razdoblje čini ono od puštanja u saobraćaj prve željezničke pruge do poslije prvog svjetskog rata.

U ovom razdoblju željeznica doživljava svoj puni ekstenzivni razvoj izgradnjom novih željezničkih pruga i prišireniem željezničke mreže kako u industrijski razvijenim zemljama, tako i u zemljama u razvoju.

Drugo razdoblje koje označava intenzivni razvoj i modernizaciju željeznice, počinje iza prvog svjetskog rata odnosno, izrazitije iza 1930. godine. Pojava konkurencije drugih saobraćajnih grana uvjetovala je preorijentaciju u razvoju željeznice na proširenje prijevoznih kapaciteta na postojećoj mreži i modernizaciju saobraćaja, a isto tako i mijenjanje shvaćanja o ulozi željeznice i njenom načinu poslovanja. Dolazi do mijenjanja tehničke strukture željezničkih kapaciteta, zaustavlja se proces izgradnje novih pruga u industrijski razvijenim zemljama. U ostalim zemljama ekstenzivni razvoj željeznice se usporava izgradnjom putova i razvojem cestovnog saobraćaja koji u određenom pravcu mijenja ulogu željeznice kao prijevozne organizacije.

Iako se proces intenzivnog razvoja i modernizacije željeznice nastavlja sve do danas, poslije drugog svjetskog rata, a izrazitije od 1950. do 1955. godine uočava se nov proces u razvoju željeznica. Intenzivni razvoj cestovnog i zračnog saobraćaja uvjetuje naglo opadanje saobraćaja na sporednim prugama te se u željezničkom saobraćaju javlja problem sporednih pruga sa slabim prometom. Otvara se tako proces zatvaranja sporednih pruga i sužavanja željezničke mreže, poduzimanja niza organizacionih mjera zamjene željezničkog saobraćaja sredstvima cestovnog saobraćaja - razvija se ustvari proces supstitucije saobraćaja, proizvodnja novih tehničkih sredstava i stvaranje različitih organizacionih formi kombiniranog željezničkog i cestovnog saobraćaja. Dolazi do intenzivnog procesa rekonstrukcije željezničke mreže, koji otvara novo razdoblje i perspektive razvoja željeznice u izmijenjenim uvjetima razvijene strukture saobraćajnog sistema i tržišta saobraćajnih usluga, a naročito u svijetlu najnovijih privrednih i energetskih kretanja.

Ovakva periodizacija teže se može postaviti za nerazvijene i zemlje u razvoju s obzirom na neophodnost istovremenog dovršavanja izgradnje željezničkih pruga na područjima koja zahtijevaju dalji ekstenzivni razvoj željeznice i istovremeno proces modernizacije na postojećim prugama.

Pojava parne vuče 1825. godine na pruzi Darlington - Stockton nije ostala nezapažena u drugim državama. Odmah se počelo s izgradnjom pruga u gotovo cijelom svijetu. Naime, željeznice su bile rezultat razvoja najvažnijih grana industrije toga vremena: industrije ugljena i crne metalurgije.

Izgradnja željeznica u drugoj polovici 19-tog i prvoj polovici 20-tog stoljeća predstavljala je veliki posao uz koji su bili vezani mnogi problemi. Usprkos poteškoća i otpora, željeznice su sebi krčile put i na dijelu dokazivale prednosti nad drugim sredstvima prijevoza tog vremena.

U eri ugljena, udio željeznice u prijevozu goriva bio je relativno mnogo veći nego danas. Prelaskom na naftu i naftne derivate ugljen se relativno manje troši i

prevozi željeznicom, a sve se više grade cjevovodi i druga sredstva prijevoza specijalno prilagođena prijevozu tekućih, ukapljenih i plinovitih goriva.

Međutim, tehnološki razvoj željeznice u posljednjim desetljećima u mnogim zemljama razvijenog svijeta bio je usmjeren na izgradnju velikih jedinničnih kapaciteta, na modernizaciju opreme i automatizaciju što većeg broja operacija kod utovara, pretovara i istovara. Grade se vagoni i cisterne velike nosivosti, pa se na željeznici sve više koriste veći jedinični kapaciteti.

Izgradnja željeznica zahtijevala je i kod nas relativno velike količine ugljena za pogon lokomotiva, a velike količine ugljena bile su potrebne i za pomorski prijevoz gdje se je razvijalo brodarstvo s pogonom na paru.

Velike količine ugljena zahtijevala je i industrija jer je prošli vijek bio vijek parnog stroja kojega je pokretao ugljen. Tako se je osim za potrebe željeznice ugljen prevozio do svih industrijskih i urbanih područja i do svih luka do kojih su pristizali parobrodi.

Pored ugljena i drveta, sve do drugog svjetskog rata željeznica je u Jugoslaviji bila i isključivi prijevoznik nafte i derivata na kopnu, a danas se obavlja samo jedan dio tog prometa, dok se dio obavlja cestovnim, a dio riječnim prometom.

3.2.5. PRIJENOS OBLIKA ENERGIJE CJEVOVODIMA

Cjevovodima se danas prenose plinovita, ukapljena, tekuća i kruta goriva. Ova posljednja u suspenziji nekog medija - zraka a najčešće vode. Cjevovodima se također prenosi toplina putem vrelovoda ili parovoda.

Cjevovodi su danas vrlo rasprostranjeni širom svijeta ispoljavajući svuda niz prednosti u odnosu na druga sredstva prijevoza u slučaju kada su za njihovu izgradnju i eksploataciju ispunjeni određeni uvjeti. Razlozi zbog kojih se cjevovodi, a naročito naftovodi i produktovodi (plin se kopnom drugačije gotovo i ne prevozi nego plinovodima) tako intenzivno grade brojni su, od kojih se neki ovdje posebno ističu:

- cjevovodi su idealan način i sredstvo prijevoza tekućih i plinovitih goriva (ugljikovodika) zato što omogućavaju primjenu potpune automatizacije, što isključuje neposredni udio radnika u operacijama prijevoza,
- veliki magistralni cjevovodni sistemi s odgovarajućim priključnicama mogu snabdijevati i vrlo velika prostranstva,
- s obzirom da su uglavnom ukopani pod zemljom, prijevoz je zapravo nečujan i nevidljiv, što je velika prednost za čovjeka ugroženog bukom i zagađivanjem okoline,
- prijevoz odnosno proticanje kroz cjevovode može se odvijati kontinuirano, što isključuje potrebu za izgradnjom velikih skladišnih kapaciteta i izgradnje ili nabave drugih sredstava prijevoza koji se ne mogu koristiti kontinuirano i koji u jednom pravcu idu natovareni, a vraćaju se obično prazni,
- najmanje su osjetljivi na vremenske i klimatske uvjete eliminirajući njihov utjecaj na minimum, što se ne može reći za ostale načine i sredstva prijevoza,
- ne opterećuju i ne habaju ceste i željezničke pruge jer cjevovodi su i put i sredstvo prijevoza u isto vrijeme, koje nepomično stoji, dok se roba (gorivo) pomiče odnosno protječe uz pomoć snage crpki odnsono kompresora,
- vijek trajanja cjevovoda (njihova tehnička i ekonomska amortizacija) obično je dosta

dug, i duži od drugih sredstava prijevoza, osim kad se prevoze kruta goriva ili čestice,

- investiciona ulaganja po jedinici kapaciteta znatno su niža u usporedbi s drugim načinom i sredstvima prijevoza na kopnu,
- omogućavaju prijevoz velikih količina nafte, derivata i plina, tamo gdje je to drugim sredstvima prijevoza moguće samo u jednom pulsirajućem - isprekidanom ritmu i u daleko ograničenijim količinama,
- u najvećoj mogućoj mjeri skraćuju udaljenosti između izvorišta i odredišta zato što gotovo u potpunosti mogu slijediti pravu liniju,
- u najvećoj mogućoj mjeri reduciraju mogućnost gubitaka goriva prilikom prijevoza zbog vrlo rijetkih udesa, naročito onda kada se ugrade sigurnosni ventili na relativno kratkim udaljenostima.

Negativne strane cjevovoda ako se tako može reći, bile bi:

- zato što se njima prevoze goriva, njihova izgradnja dolazi u obzir samo tamo gdje tih goriva ima i gdje se troše u velikim količinama,
- budući da su cjevovodi objekti koji zahtijevaju visoka ulaganja kapitala i imaju visoke fiksne troškove, mogu se graditi samo onda kada je osiguran visok stupanj njihovog iskorištenja tokom cijelog eksploatacionog razdoblja,
- prijevoz cjevovodima moguć je u jednom smjeru, a ne u oba istovremeno,
- jednom izgrađeni i u zemlju ukopani, imaju vrlo malu vrijednost u slučaju da se njihovo korištenje prekine, jer vađenje i premještanje cjevovoda i opreme gotovo da i ne dolazi u obzir zbog visokih troškova tih operacija.

Jedna od osnovnih karakteristika cjevovoda sastoji se u tome, da troškovi po jedinici naglo padaju kada količine prijevoza rastu. Kada se prevoze relativno male količine, cjevovodi mogu imati veće troškove od željeznice ili riječnih tankova.

Na protjecanje goriva kroz cjevovod i brzinu protjecanja utječe i viskozitet. Najlakše protječe plin, a zatim benzin, petrolej itd.

Na viskozitet proizvoda naročito utječe temperatura, koja u slučaju pada ispod određene granice negativno utječe na prijevoz viskoznih - parafinskih nafti, jer se parafin ubrzano taloži na stjenke naftovoda i zatvara prolaz.

Kapacitet protoka kroz cjevovod ovisan je i o njegovom promjeru i o padu tlaka po jedinici njegove dužine (kilometru), što obično nazivamo gradijentom tlaka. Za dati gradijent tlaka protok raste brže od promjera za oko 2.6 puta.

Troškovi izgradnje cjevovoda uglavnom su proporcionalni njihovoj dužini, a vrlo različiti u odnosu na teren i klimatske uvjete u kojima se grade. Troškovi izgradnje cjevovoda na priobalnim područjima u prosjeku su za nekoliko puta veći u odnosu na one što se grade na kopnu, a za isti kapacitet i dužinu, jer se grade sporije, u složenijim uvjetima i uz korištenje specifične opreme koja je vrlo skupa.

S obzirom da su u strukturi troškova poslovanja jednog cjevovoda fiksni troškovi prevalentni (oko 80% od ukupnih troškova) vrlo je važno kako se i koliko dugo koriste.

Zbog toga su kod cjevovoda posebno korisne i nužne analize graničnih troškova i prometa koji osigurava rentabilan rad takvog jednog sistema. Raspoloživa invensticijska sredstva često mogu diktirati kapacitete jednog cjevovodnog sistema.

Međutim, osnovni kriterij gradnje treba biti: minimalni troškovi prijevoza kroz čitavo razdoblje eksploatacije.

Cjevovodi se, s obzirom na oblik energije kojega prenose, dijele na:

- naftovode
- plinovode
- produktovode
- vrelovode i parovode.

Godine 1861. izgrađen je prvi naftovod iz drva dugačak 10 kilometara. Njegov prijevozni kapacitet pokazao se, međutim nedovoljan u odnosu na stvarne potrebe, a uz to nije mogao da podnese odgovarajući tlak nafte. Mnogo boljim nije se pokazao ni cijevod iz sirovog željeza izgrađen 1863. godine. Prvi naftovod izgrađen iz željeznih cijevi međusobno spojenih vijcima preko prirubnica i ukopan u zemlju izgrađen je 1865. godine.

Nakon toga počinje značajniji razvoj u izgradnji naftovoda, a posebno nakon 1925. godine kada se počinju upotrebljavati bešavne cijevi koje su mogle izdržati više tlakove.

Općenito uzevši, cjevovodi kao način i sredstvo prijenosa vrlo su rasprostranjeni, a sve se više upotrebljavaju i za prijenos krutih goriva u suspenziji vode ili nekih drugih tekućina.

Izgradnja Transkaspijskog produktovoda promjera 8 cola i dužine 320 km koji je povezivao Baku s Batumom počela je 1896. godine, a služio je za prijenos petroleja.

Produktovod od 4 cola promjera i dužine 160 km za sirovi benzin izgrađen je od Ventura do Wilningtona u SAD 1930. godine. Tom su prilikom učinjeni i prvi pokušaji da se rad crpnih stanica automatizira.

Godine 1857. u Marietti (Ohio) izgrađen je plinovod od 2 cola promjera iz drva dužine 4 kilometra radi prijevoza plina do grada. Već 1873. godine metalurška postrojenja u Pittsburghu počinju koristiti prirodni plin, a godinu dana kasnije grade se prvi plinovodi iz čelika. Prvi plinovod značajne dužine izgrađen je 1891. godine između Greentowna (Indiana) i Chicaga, a bio je opremljen i sa kompresorskim stanicama koje su omogućavale prijevoz na udaljenosti od 135 km. Oko 1930. godine prijevoz plina plinovodima promjera od 20 do 24 cola na velike udaljenosti, nije predstavljao nikakav tehnički problem pa je tako prirodni plin s vremenom postao jedan od najvažnijih izvora snabdijevanja energijom kako za domaćinstva tako i za industriju, gdje se još koristi i kao petrokemijska sirovina.

Mreža cjevovoda namijenjenih prijevozu energije svake se godine povećava za oko 40-60 tisuća kilometara.

Prvi naftovod izgrađen u Jugoslaviji 1960. godine je onaj od Stružca do Siska u dužini od 16 km i promjera 25.4 cm (10 cola). Od tada pa do danas na području Posavine, Podravine, Slavonije i Vojvodine izgrađeno je više manjih naftovoda lokalnog značaja sa svrhom da se proizvodna polja povežu sa najbližim rafinerijama ili utovarnim terminalima (riječni ili željeznički). Posljednji izgrađeni naftovod je Jugoslavenski naftovod od Omišlja na otoku Krku do Pančeva.

Izgradnja plinovoda u našoj zemlji vezana je uz proizvodnju prirodnog plina na polju Bujavica nedaleko od Lipika a datira od studenog 1917. godine.

Vrelovodi i parovodi također spadaju u cjevovode putem kojih s jednog na

drugo mjesto prenosimo toplinu posredstvom vode odnosno pare. Kod njihove izgradnje - kao i kod izgradnje drugih cjevovoda ne javljaju se neki posebni problemi.

Toplovodi i parovodi kojima se prenosi toplina od izvora do potrošača kao i ostali cjevovodi namijenjeni prijevozu tekućina građeni su od čeličnih cijevi. Toplovodi i parovodi grade se nad zemljom ili pod zemljom, a problemima izolazije cijevi posvećuje se posebna pažnja kako bi se na putu od izvora do potrošača gubilo što manje topline, čija se prosječna vrijednost kod vrelovoda u smjeru potrošača kreće od 263 K do 443 K, a u smjeru toplane 223 - 243 K, kod parovoda u smjeru potrošača temperatura iznosi 473 K - 523 K.

Pored nastojanja, da se kanalnim vođenjem toplinske mreže dođe do ekonomski prihvatljivih i zadovoljavajućih rješenja, ovakav sistem prijenosa topline još i sada zahtijeva znatna investicijska ulaganja, koja predstavljaju veliki teret za komunalne zajednice i privredne organizacije, pa je radi toga neophodno potrebno provesti detaljnu energetsko-ekonomsku analizu opravdanosti izgradnje centraliziranih toplinskih sistema.

3.2.6. PRIJENOS ENERGIJE ELEKTRIČNIM VODOVIMA

Dopremanje proizvedene električne energije od izvora do protrošača može se izvesti na više načina. Jedan je od njih da se svaki potrošač priključi direktno na izvor, ali to je, iako tehnički izvedivo, ekonomski neprihvatljivo. Drugi je način da se između potrošača i izvora izgradi električna mreža na koju se može izvršiti priključak izvora i potrošača na bilo kojem mjestu. Ovaj je drugi način ekonomski i tehnički prihvatljiviji jer omogućuje priključivanje izvora elektirčne energije koji najčešće nisu locirani u blizini potrošačkih centara, dok se sigurnost snabdijevanja mnogostruko povećava. Ako dođe do ispada nekog izvora, njegovu ulogu može preuzeti drugi, tako da potrošač to ne osjeti. Kvar na nekom prijenosnom elementu mreže (vodu, rasklopnom postrojenju itd.) dovodi do ispada elementa iz pogona. Prijenos se energije u tom slučaju obavlja pomoću drugih elemenata mreže.

Kada je riječ o mrežama, uvijek se razumijeva da u mreži postoje čvorne točke. Ove točke moraju biti tako koncipirane da se u svakom trenutku na njih može priključiti potrošač ili izvor direktno ili indirektno preko nekog prijenosnog sustava na tehnički i ekonomski zadovoljavajući način.

S obzirom na svoju namjenu mreže se mogu podijeliti na prijenosne i razdjelne mreže.

Prijenosne mreže imaju ulogu da povežu potrošačke centre s izvorima električne energije. Dakle, obično se radi o prijenosu veoma velikih snaga. Da bi se ove snage mogle prenijeti, mora se ići na veće naponske razine. Prema tome, ove se mreže još nazivaju i visokonaponskim mrežama.

Zadatak je razdjelnih mreža da dopreme energiju od prijenosne mreže do potrošača. Ove mreže prenose relativno manje snage, pa su zato nižeg napona. Povećanjem potrošnje i razvojem elektroenergetskog sustava razdjelne se mreže izvode sa sve višim naponima. Tako danas razdjelne mreže imaju naponske razine koje su prije nekoliko godina bile isključivo rezervirane za prijenosne mreže.

Budući da se radi o velikim snagama, odnosno velikim strujama i visokim naponima, potrebno je čvorne točke posebno izvesti. Zbog toga svaka čvorna točka ima rasklopno postrojenje koje može biti sa ili bez transformacije napona. Dakle,

osnovna je uloga ovih postrojenja da osiguraju spajanje postojećih vodova s mogućnošću priključaka novih, te da po potrebi povezuje mreže različitih naponskih razina preko transformatora.

Rasklopna postrojenja osim toga postoje i u elektranama, u kojima im je zadatak da raspodjeljuju energiju proizvedenu u generatorima na vodove koji povezuju elektranu s mrežom, a postoje i u većih potrošača gdje služe za preuzimanje energije iz mreže.

Prema namjeni mreže se mogu podijeliti na:

- mreže za prijenos električne energije
- razdjelne mreže.

Prijenosne mreže služe za prenos većih snaga i na veće udaljenosti, dok razdjelne mreže prenose manje snage i na manje udaljenosti.

Budući da prijenosne mreže trebaju prenijeti veću snagu na veće udaljenosti, to je potreban što veći napon zbog ekonomičnosti prijenosa (manji gubici).

Aktivni gubici na nekom vodu, ako se zanemari odvod, jesu:

$$P_g = I^2R \qquad (408)$$

gdje je I - struja koja teče tim vodom, R - djelatni otpor voda.

Vidljivo je iz formule da aktivni gubici ovise o kvadratu struje. Prema tome, da bi se oni smanjili, potrebno je smanjiti struju, a da nam prijenosna snaga ostane nepromijenjena. Ovo se može izvesti na taj način da se poveća naponska razina prijenosa. Prema tome su prijenosne mreže karakterizirane višim naponom.

Ovaj se pokazatelj ne može kruto primjeniti za bilo koju mrežu, jer ovisi o razvoju i prilikama u kojima se ta mreža nalazi u različitim je zemljama napon koji čini granicu između prijenosnih i razdjelnih mreža različit. U razvijenijim zemljama ta granica predstavljena je višim nazivnim naponom. Ova je granica vezana, dakako, i s vremenom promatranja tijekom kojeg se mreža razvijala. Tako je u istoj zemlji prije nekoliko desetljeća između prijenosne i razdjelne mreže bila niža naponska razina nego što je to danas.

Između prijenosne mreže i razdjelne mreže postoji kvantitativna razlika u pogledu mogućnosti prijenosa snage, daljine prijenosa i visine nazivnog napona.

Problematika se prijenosnih i razdjelnih mreža razlikuje i u kvalitetnom pogledu. Prijenosne mreže čine vodovi koji međusobno povezuju čvorne točke na različitim geografskim prostranstvima i pri tome čine mreže različita oblika (radijalna, zamkasta ili kombinirana). Prijenosna mreža u nas danas obuhvaća vodove 110, 220 i 380 kV, a u novije vrijeme priprema se (planira se) izgradnja prijenosnih napona 750 kV, te prijenos istosmjernom strujom. Niži naponi od 110 kV (iznimno i 110 kV) pripadaju razdjelnim mrežama.

Kad se govori o naponskim razinama mreža, prvenstveno se misli na nazivne vrijednosti napona. Nazivni je napon onaj napon za koji je određeni element mreže u širem smislu konstruiran i građen. Prigodom gradnje elemenata mreže za određeni nazivni napon u prvom redu treba voditi brigu o tome da dotični element bude jeftin, ekonimičan u pogonu, pouzdan i trajan.

Nazivni napon osigurava optimalne uvjete rada elementa mreže, aparata i pomoćnih uređaja u elektroenergetskom sustavu. Općenito, napon ne utječe samo na naprezanje izolacije, već i na ostale fizikalne osobine na kojima dotični element počiva

(magnetski tok u željezu, gubici u dielektriku itd.). Prema tome, odstupanje od nazivne vrijednosti napona istovremeno znači odstupanje od optimalnih uvjeta rada. Iz navedenoga proizlazi da u svim točkama elektroenergetskog sustava vrijednost napona mora biti jednaka nazivnom naponu.

Osim nazivnog napona postoji još i najviši dopustivi pogonski napon (maksimalni pogonski napon).

Maksimalnim pogonskim naponom određen je izolacioni nivo elemenata mreže i elemenata zaštite od prenapona. U svakom trenutku stacionarnog stanja iznos napona na bilo kojem mjestu u sustavu ne smije prekoračiti maksimalni pogonski napon.

Standardizirane vrijednosti nazivnih i maksimalnih pogonskih napona navedene su u slijedećoj tablici:

Nazivni napon	3	6	10	20	35	60	110	220	380 kV
Maksimalni pogonski napon	3.6	7.2	12	24	38	72.5	123	245	420 kV

Potrebna energija doprema se od izvora do potrošača vodovima. Vodovi moraju biti tako dimenzionirani da su u stanju prenijeti energiju uz minimalne troškove. To znači da presjek tih vodova mora biti tako odabran da zadovolji dopuštene padove napona ako se radi o razdjelnim mrežama, odnosno da gubici snage (energije) budu što manji ako se radi o prijenosnim mrežama.

Presjek voda prijenosne mreže uvjetovan je očekivanom maksimalnom snagom prijenosa u stacionarnom režimu rada, gubicima aktivne snage te gubicima korone. Pri tome treba još voditi računa o dinamičkim i termičkim naprezanjima. Ako se želi povećati snaga prijenosa, onda je logično da se ide na veće presjeke. Međutim, ovi presjeci ne mogu biti proizvoljno veliki, jer jednostavno tehnički nisu izvedivi. Zbog toga se prelazi na vodiče u snopu. U snopu mogu biti 2.3 ili 4 vodiča. Vodovi sa vodičima u snopu nazivaju se još i teškim vodovima.

Odabiranje presjeka kod razdjelnih mreža temelji se na zahtjevu da se najudaljenijem potrošaču osigura napajanje električnom energijom, uz uvjet da odstupanje napona od nazivnog, na njegovim priključnim sabirnicama bude u dopuštenim granicama dopuštenih iznosa. Nadalje je potrebno provesti kontrolu s obzirom na dinamička i termička naprezanja.

Prigodom određivanja presjeka vodova uzima se slijedeća veća nazivna vrijednost ako se izračunati presjek nalazi između dviju nazivnih vrijednosti: 1.2; 2.5; 4; 6; 10; 16; 25; 35; 50; 70; 95; 120; 150; 185; 240; 300; 400; 500 mm^2.

S obzirom na izvedbu postoje nadzemni vodovi (koji se vode na otvorenom prostoru), kablovi pod zemljom u kanalima i izolirani vodovi (niskonaponski vodovi koji se vode u instalacijama). Prvi koraci elektrifikacije kod nas potkraj prošlog stoljeća, počeli su tzv. blok elektranama koje su napajale pojedine industrije, reprezentativne zgrade ili najviše blokove kuća. Tek nakon uvođenja transformacije i viših napona pojedina je elektrana mogla opskrbljivati veće naselje odnosno grad.

U predratnoj Jugoslaviji najveći dio zemlje bio je pokriven pojedinačnim malim elektranama bez ikakvog značajnijeg prijenosa visokim naponom, a o nekom paralelnom povezivanju područja da se i ne govori.

Odmah nakon završetka drugog svjetskog rata počela je razrada planova za

široku elektrifikaciju zemlje. Na prvom mjestu svakako su bili elektroenergetski izvori, no i prijenosna mreža imala je značajno mjesto, pa dolazi do uvođenja 110 kV napona.

Potrebe za prijenosom električnih snaga reda 30 MW do 50 MW dovele su do pojave prvih 110 kV vodova prvo u Sloveniji, potom u Hrvatskoj, Bosni i Hercegovini, Srbiji, Makedoniji i Crnoj Gori i, praktično, do obrazovanja nezavisnih, međusobno nepovezanih elektroenergetskih sistema republika. Međutim, brz razvoj zemlje, njene industrije i cijele jugoslovenske privrede, već 1955. godine, dovodi do povezivanja 110 kV mreže Srbije i Bosne i Hercegovine, da on već 1957. godine dovede do međusobnog povezivanja 110 kV mreže, praktično cijele Jugoslavije, do stvaranja jedinstvenog tehničko-tehnološkog, interkonektivnog sistema Jugoslavije.

Povezivanjem jugoslovenskog elektroenergetskog sistema na napon od 110 kV, otpočinje snažan razvoj proizvodnih kapaciteta na energetski povoljnijim lokacijama i time otpočinje značajan prijenos električne energije iz suficitarnih u deficitarna područja zemlje. Svega tri godine kasnije (1960. godine) pojavljuju se u pogonu 408 km voda 220 kV, da bi nekoliko godina kasnije, kičmu tehničko-tehnološkog jedinstvenog elektroenergetskog sistema i glavnu ulogu prijenosa električne energije u zemlji preuzima tzv. superponirana prijenosna mreža od 220 kV).

No potrebe elektrifikacije ubrzo su prerasle i tu naponsku razinu.

Veliku snagu HE Đerdap trebalo je prebaciti prema važnim potrošačkim centrima Beogradu i Boru, a to je bilo - uz gledanje dalje perspektive, ekonomski najpovoljnije vodovima od 380 kV. Tako je sredinom 1970. godine počeo prijenos na liniji za Beograd pod naponom od 380 kV. Te iste godine počeli su se raditi i planovi za izgradnju osnovne superponirane mreže od 380 kV u Jugoslaviji, a danas je ona izgrađena u dužini od oko 3.295 km. Slijedeća naponska razina o kojoj se razmišlja je ona od 750 kV.

U okviru prijenosa električne energije, imajući u vidu gustoću potrošnje sada i u buduće, veliku pažnju treba posvetiti trasama dalekovoda, načinu transformacije iz viših u niže napone te problematici razdjelne električne mreže.

3.2.7. PRIJEVOZ NUKLEARNIH GORIVA

U svijetu postoji dosta nuklearnih reaktora, nuklearnih elektrana u radu i izgradnji, a i Jugoslavija je krajem 1981. godine dobila svoju prvu nukelarnu elektranu (NE) u Krškom. U prijevozu energije nuklearnog porijekla, jedino prijevoz nuklearnog goriva ima svoju specifičnu problematiku koju mogu rješavati za to osposobljeni stručnjaci u zemlji i inozemstvu. Probleme prijevoza nuklearnih goriva, s obzirom na njihovu složenu prirodu, potrebno je pravovremeno rješavati. Treba istaći i nepotpunost regulative u oblastima vezanim za ovu materiju, kao što su: zaštita od zračenja, radioaktivni otpadni materijali, osiguranje nuklearnih postrojenja i trećih lica itd.

Za prijevoz nuklearnih goriva koristi se za to specijalna ambalaža, u stanju da zaštiti nuklearno gorivo od svih eventualnih udesa koji se u prometu mogu javiti (prevrtanje, udar, potonuće, požar i slično) i sredstva prijevoza često građena specijalno u tu svrhu. Prijevozom nuklearnih goriva bave se danas uglavnom specijalizirana poduzeća i stručnjaci. Sve to, naravno, povećava troškove prijevoza koji su, ako ih usporedimo prema određenom energetskom ekvivalentu, ipak među

najnižima zato, što je u relativno maloj masi nukelarnih goriva sadržana ogromna energija.

3.2.8. PRIJENOS OBLIKA ENERGIJE ŽIČARAMA I TRANSPORTNIM TRAKAMA, TE KOMBINACIJE PRIJEVOZA I PRIJENOSA OBLIKA ENERGIJE

Na bližim udaljenostima za prijenos i prijevoz krutih oblika energije upotrebljavaju se žičare i transportne trake. Žičare se u prvom redu koriste za prijenos drveta od nalazišta do utovarnih stanica (najčešće po padini planine), te od nalazišta ugljena (rudnika) do pretovarne stanice ili do skladišta velikog potrošača, prvenstveno termoelektrana.

S obzirom da u rezervama naših ugljena dominiraju niskokalorični ugljeni - ligniti ali sa povoljnim uvjetima za površinsku eksploataciju, normalno je što je razvoj površinskih otkopa u proteklom periodu bio brz sa visokom stopom rasta, a bio je vezan za izgradnju termoelektrana.

Međutim, razvoj površinske eksploatacije lignita će i nadalje biti vezan za potrošače koji će se graditi u neposrednoj blizini rudnika (termoelektrane, toplane, plinifikacije i sl.).

Doprema lignita termoelektranama, toplanama, separacijama i sl., uglavnom se obavlja transportnim trakama i to direktno u bunkere termoelektrana i toplana ili do deponija (skladišta pri postrojenjima za korištenje ugljena). Doprema lignita žičarama ili specijalnim vagonima koristi se samo u slučaju kada se ugljen doprema do deponija.

Kod prijevoza i prijenosa oblika energije najčešće se javlja više vrsta prijevoza i prijenosa ako se gleda transport od mjesta pridobivanja oblika energije do mjesta njegova korištenja.

Za kruta goriva (drvo, ugljen, treset) najčešće se koriste žičare, trake i specijalni vagoni do mjesta pretovara, zatim željeznica, i brodovi do mjesta istovara (ako se radi o dužem transportu), te kamionima do potrošača udaljenih od mjesta istovara.

Prijevoz sirove nafte, plina i derivata na putu od izvorišta do odredišta na tržištu, može se podijeliti u više faza. Razlikuje se prijevoz u smislu prikupljanja proizvodnje od proizvodnih punktova koncentracije proizvodnje, zatim prijevoz od mjesta koncentracije proizvodnje do centra prerade odnosno potrošnje i konačno prijevoz u smislu distribucije od centra prerade do potrošača naftnih derivata i plina.

I kod nafte, plina i derivata koriste se najviše cjevovodi, tankeri, zatim cestovni promet (autocisterne) i željeznički promet (cisternama specijalnih izvedbi).

Distribucija ukapljenog plina vrši se u specijalnim cisternama za veće potrošače, a za manje potrošače u plinskim bocama.

Prijenos i razdioba električne energije ostvaruje se preko električnih vodova visokog, srednjeg i niskog napona.

Energija se ne gubi samo prilikom pretvaranja iz jednog u drugi oblik. I u procesu prijevoza odnosno prijenosa, skladištenja i distribucije energije obično dolazi do njenog "rasipanja" odnosno, do gubitaka. Gubici se mogu izračunati kao razlika

između količina energije dopremljene naručitelju (kupcu ili potrošaču) i količina koje su isporučene odnosno utovarene u neko prijevozno sredstvo (tanker, baržu, željezničku ili auto cisternu itd.), količina koje su upumpane u cjevovod ili predatih količina na pragu dalekovoda, toplovoda i slično.

Prema iskustvu, gubici koji nastaju u prijevozu, prijenosu, skladištenju i distribuciji razlikovat će se od slučaja do slučaja, od sistema do sistema kao i od zemlje do zemlje, ali se za većinu zemalja u prosjeku kreću oko 1%.

Energija ne samo da se prevozi i prenosi, već se u prijevozu ili prijenosu i troši.

Energetska ekonomičnost odnosno efikasnost korištenja energije u prijevozu ili prijenosu izražava se obično u broju jedinica mjere (u tona/km ili tona/milja) prevezenog tereta po litri goriva ili u odnosu na određeni energetski ekvivalent potrošenog goriva.

Energetsko-ekonomska opravdanost prijenosa i prijevoza oblika energije mora uključiti sve potrebne investicije za sva prometna sredstva od mjesta pridobivanja, pretvorbi do mjesta potrošnje oblika energije.

4. ENERGETSKA BILANCA

4.1. IZRADA ENERGETSKIH BILANCI

Energetska bilanca je statistika posebnog oblika kojom se prate tokovi energije od njezine pojave u energetskoj privredi promatranog područja do njezine predaje neposrednim potrošačima, odnosno pretvorbe u korisnu energiju u potrošačkim postrojenjima ili aparatima.

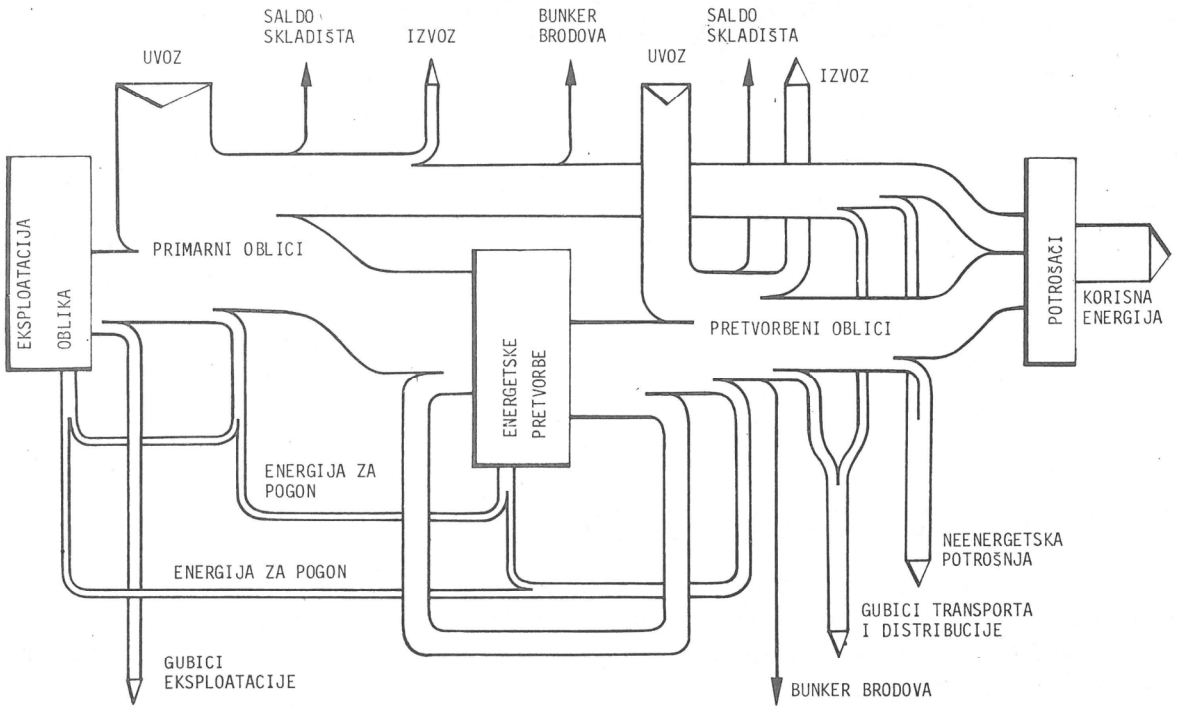
Energetskom bilancom se moraju obuhvatiti tokovi svih oblika energije sa svrhom da se na prikladan i pregledan način prikažu iskorištavanje prirodnih oblika energije, energetske pretvorbe, iskorištavanje pretvorbenih oblika energije, uvoz i izvoz prirodnih i pretvorbenih oblika energije, energija za pogon energetskih postrojenja, gubici energije u transportu i distribuciji i iskorištavanje pojedinih oblika energije za opskrbu neposrednih potrošača tj. industrije, prometa i tzv. opće potrošnje.

Nije dovoljno energetsku bilancu izrađivati na taj način da se ne razlikuju pojedini oblici energije i pojedine energetske pretvorbe, već tako da se na svakom nivou energetskog sistema zorno može razabrati struktura prirodnih i pretvorbenih oblika energije. Takvim načinom prikazivanja ne gube se karakteristike pojedinih oblika energije, mogućnost iskorištavanja za zadovoljenje specifičnih potreba kao i mogućnost međusobne zamjene pojedinih oblika energije.

Uobičajeno je da se energetska bilanca paralelno izrađuje u naturalnim mjernim jedinicama koje su karakteristične za pojedine oblike energije kao npr. kWh za električnu energiju, m^3 za prirodni plin, t za naftu i ugljen itd., i u zajedničkoj mjernoj jedinici kao npr. TJ, pri čemu se preračunavanje iz naturalnih jedinica u energetsku jedinicu ostvaruje množenjem količina s ogrijevnim vrijednostima pojedinih oblika energije. Prikazivanje energetskih bilanci u zajedničkoj energetskoj mjernoj jedinici ima prednost jer tako prikazani oblici energije postaju međusobno usporedivi, mogu se zbrajati različiti oblici energije i na temelju toga izračunavati odnosi i karakteristike promatranog energetskog sistema.

Tokovi oblika energije koji se opisuju energetskom bilancom grafički se mogu prikazati kao na slici 179, a odnose se na određeno područje (kao npr. zemlju ili republiku) i na određeno vremensko razdoblje koje najčešće iznosi jednu godinu.

U prikazu toka energije pomoću energetske bilance polazi se od podataka o eksploataciji prirodnih oblika energije, a registriraju se količine o proizvodnji svih prirodnih oblika energije (npr. kamenog ugljena, sirove nafte, prirodnog plina,



Sl. 179. Shematski prikaz toka energetske bilance

ogrjevnog drva itd.) na promatranom području. U procesu pridobivanja ponekih prirodnih oblika energije pojavljuju se gubici (npr. izgaranje zemnog plina na baklji ili gubici ugljena prilikom ispiranja) pa je potrebno poznavati i te količine kako bi se mogla odrediti neto proizvodnja promatranih oblika energije.

Za proces eksploatacije prirodnih oblika energije potrebna je energija koja je na grafičkom prikazu označena kao energija za pogon. Ta energija može biti u obliku samog eksploatiranog oblika energije, može se koristiti drugi prirodni oblik ili poneki od pretvorbenih oblika energije što je najčešće i slučaj jer se kao energija za pogon energetskih postrojenja gotovo uvijek koristi električna energija, a u vleikom broju slučajeva i dizelsko gorivo. Iako bi se ta energija mogla tretirati kao i svaka druga energija predana potrošačima ona se ipak najčešće izdvaja budući da je potrebna energetskoj privredi i jer njezina potrošnja ovisi o strukturi energetskog sistema na promatranom području.

Većina područja ne može potrebe prirodnih oblika energije zadovoljiti samo vlastitom proizvodnjom pa se nužno pojavljuje uvoz manjkajućih prirodnih oblika, odnosno u nekim slučajevima i izvoz ukoliko je proizvodnja veća od potreba. U uvoz odnosno izvoz potrebno je uključiti i nabavku, odnosno isporuku onih prirodnih oblika koji se razmenjuju unutar zemlje ukoliko je analizirano područje dio države kao npr. republika.

I promjene na skladištima imaju utjecaja na energetsku bilancu promatranog područja. Neki od prirodnih oblika uskladištuju se. Kako bi se premostile razlike između ritma proizvodnje i potrošnje tako da se stanje u skladištima na početku promatranog vremenskog razdoblja (najčešće godina) obično razlikuje od stanja na kraju razdoblja. Ta razlika naziva se saldo stanje skladišta i može biti pozitivan i

negativan. Saldo skladišta je pozitivan ako je stanje na početku bilo veće od stanja na kraju jer tada skladište služi kao izvor promatranog oblika energije.

Potrebno je u izradi energetske bilance u obzir uzeti i tzv. bunker brodova, a to je ona količina prirodnih oblika energije koju za svoj pogon preuzimaju brodovi koji plove izvan teritorijalnih voda promatranog područja bez obzira kojoj zemlji pripadaju. Te se količine posebno iskazuju jer se one moraju osigurati na području za koje se izrađuje bilanca. Za prirodne oblike energije danas bunker brodova praktički ni ne postoji jer više nema prekooceanskih brodova na parni pogon koji koriste ugljen pa taj element energetske bilance ima smisla predvidjeti samo zbog toga da se registriraju podaci o bunkeru brodova koji su ostvareni u prošlosti.

Najveći dio od raspoloživih prirodnih oblika energije dovodi se u postrojenja za energetske pretvorbe - gdje se pretvaraju u tzv. pretvorbene oblike energije, koji dalje nastavljaju tok kroz energetski sistem. U takvoj pretvorbi uvijek se pojavljuju gubici koji mogu varirati u vrlo širokim granicama ovisno o tipu postrojenja u kojem se odvija pretvorba.

Za pogon postrojenja za energetske pretvorbe potrebna je energija koja može biti u obliku proizvedenog pretvorbenog oblika ali se za pogon mogu koristiti i neki drugi pretvorbeni oblici kao i poneki od prirodnih oblika, što je također označeno na grafičkom prikazu toka energije (slika 179).

Iz spomenutog grafičkog prikaza nadalje se može uočiti da se dio od proizvedenih pretvorbenih oblika energije može ponovo pretvarati u neki drugi pretvorbeni oblik (npr. loživo ulje u električnu energiju) pa u energetskoj bilanci i tu mogućnost treba uzeti u obzir.

Pretvorbeni oblici energije također su predmetom trgovine tako da se i za njih može pojaviti uvoz, odnosno dobava iz drugih područja ukoliko je promatrano područje dio države, kao i izvoz u inozemstvo odnosno i isporuka u druga područja zemlje.

Jednako kao za prirodne oblike energije tako i za pretvorbene treba analizirati stanje na skladištima na početku i na kraju promatranog vremenskog razdoblja tj. odrediti da li je saldo skladišta pozitivan ili negativan.

Bunker brodova se od pretvorbenih oblika energije javlja za dizelsko gorivo i loživo ulje tako da je nužno poznavati i te podatke.

U transportu i distribuciji kako prirodnih tako i pretvorbenih oblika energije pojavljuju se gubici koje također treba evidentirati i koji su označeni na promatranoj slici toka energije.

Raspoloživa količina kako prirodnih tako i pretvorbenih oblika energije koje ostanu nakon svih dosada označenih pojava iskorištavaju se za opskrbu potrošača. Potrebno je, međutim, napomenuti da se neki od raspoloživih prirodnih i pretvorbenih oblika energije mogu upotrijebiti u neenergetske svrhe (kao npr. prirodni plin za proizvodnju umjetnih gnojiva, ili primarni benzin u petrokemijskoj industriji pa je na grafičkom prikazu označena i ta mogućnost. Ostatak kako prirodnih tako i pretvorbenih oblika energije predaje se neposrednim potrošačima i u njihovim uređajima i postrojenjima pretvara se u neki od potrebnih korisnih oblika energije čime se završava promatrani tok.

Energetskom bilancom smatra se numerički opis prikazanog toka energije jednom tabilicom ili pomoću više tablica. Ukoliko se energetska bilanca prikazuje jednom tablicom onda je ona sa velikim brojem stupaca i redaka kako bi se obuhvatili

svi elementi naprijed opisanog toka pa je prikaz energetske bilance pomoću većeg broja tablica jedino iz razloga da se izbjegne veličina prikaza jednom tablicom. Prikaz energetske bilance pomoću jedne tablice je, međutim, daleko pregledniji jer se sve informacije o toku energije mogu vidjeti na jednom mjestu.

Bilo da se radi o prikazu energetske bilance jednom tablicom ili s više tablica konstrukcija je uvijek takva da se na jednostavan način mogu odrediti sve bitne veličine odnosno karakteristike promatranog energetskog sistema. Ovdje će se opisati prikaz energetike bilance pomoću jedne tablice koja u stupcima sadrži listu svih prirodnih i pretvorbenih oblika energije koji se na analiziranom području javljaju dok će se u recima pratiti njihov tok od pojave u energetskoj privredi do konačne upotrebe u uređajima ili postrojenjima neposrednih potrošača. Prelazak od prikaza jednom tablicom na prikaz energetske bilance pomoću više tablica može se izvršiti jednostavnim logičkim grupiranjem redaka tablice koja će se opisati u nastavku.

Dakle, kako je već rečeno, u stupcima tablice za prikaz energetske bilance redom se nabrajaju svi prirodni i svi pretvorbeni oblici energije. Oni su obično grupirani na taj način da su najprije navedeni svi prirodni oblici, a nakon toga i svi pretvorbeni. Redoslijed prikaza je osim toga i takav da su grupirana kruta goriva, tekuća goriva, plinovita goriva itd.

Prvo pitanje na koje energetska bilanca mora dati odgovor je podatak koliko energije treba za opskrbu potrošača na nekom području pa se na to pitanje odgovor daje u prvih nekoliko redaka.

Općento, na postavljeno pitanje nije moguće jednoznačno odgovoriti jer ukupno potrebna energija ovisi o postojećim energetskim pretvorbama koje imaju, kao što je poznato, vrlo različite stupnjeve djelovanja. Struktura postrojenja za energetske pretvorbe ovisi, s jedne strane o postojećim oblicima energije raspoloživim za pretvorbu, a s druge strane i o pretvorbenim oblicima energije koje zahtjevaju neposredni potrošači pa, prema tome, ukupna potrebna energija ovisi o strukturi energetskih izvora i o strukturi potrošača.

Ukoliko se potreba za pretvorbenim oblicima zadovoljava uvozom onda promatrano područje dobiva potrebnu energiju, u onakvom obliku kakvog zahtijevaju neposredni potrošači, a da to područje nije utrošilo energiju koja se gubi u pretvorbama, odnosno i energiju koja je potrebna za pogon postrojenja za energetske pretvorbe. Ako se iz promatranog područja izvoze pretvorbeni oblici onda gubici pretvorbi padaju na teret područja koje se analizira a da nemaju nikakvog utjecaja na opskrbljenost potrošača toga područja.

Prema tome, bilanca ukupnih potreba koja se određuje u prvim recima spomenute tablice, daje stvarnu sliku o stanju na promatranom području ali je takve podatke vrlo teško uspoređivati među različitim područjima jer zbog strukture energetskog sistema za isti nivo potrebne energije za neposredne potrošače, ukupno potrebna energija može varirati u relativno širokim granicama.

Da bi se odredila ukupno potrebna energija za opskrbu potrošača promatranog područja u prvi redak se unose podaci o pridobivanju nalazišta prirodnih oblika energije. Drugi redak tablice predviđen je za uvoz, odnosno treći za izvoz kako prirodnih tako i pretvorbenih oblika energije. Ukoliko se energetska bilanca izrađuje za uže dijelove zemlje potrebno je razlikovati uvoz iz inozemstva od uvoza iz drugih dijelova istè zemlje kao i izvoz u inozemstvo od izvoza u druge dijelove iste zemlje, odnosno to znači da je u bilanci potrebno predvidjeti i retke u kojima će se registrirati podaci o razmjeni energije s drugim dijelovima vlastite zemlje. Poseban redak se

mora predvidjeti za množenje podataka o saldu na skladištima koji mogu biti pozitivni ili negativni, i poseban redak za bunker brodova ako na promatranom području postoje luke u kojima se opskrbljuju brodovi koji plove izvan teritorijanih voda.

Slijedeći redak predviđen je za izračunavanje bruto-raspoloživih količina pojedinih oblika energije. Bruto raspoložive količine odrfeđuju se tako da se na pridobivanje doda uvoz i nabavka iz drugih područja a oduzmu izvoz i isporuka u druga područja. Osim toga potrebno je uračunati saldo skladišta te oduzeti bunker brodova ako postoji.

Potrebno je napomenuti da se za pretvorbene oblike energije u prvom retku bilance u kojem se nalaze podaci o eksploataciji nalazišta, moraju unijeti nule jer je energija proizvedenih pretvorbenih oblika na promatranom području već sadržana u energiji primarnih oblika pa bi se i njezinim uvrštavanjem u bilancu došlo do dvostruktog obračunavanja energije. Zbog toga će se u retku za bruto raspoloživu energiju za pretvorbene oblike energije kod kojih je izvoz veći od uvoza pojaviti negativne vrijednosti.

Zbrajanjem bruto raspoloživih količina svih prirodnih i svih pretvorbenih oblika, jasno ukoliko se bilanca izrađuje u zajedničkoj energetskoj jedinici, dobije se bruto raspoloživa energija, odnosno ukupno potrebna energija za opskrbu potrošača promatranog područja. Ako se energetska bilanca izrađuje u naturalnim jedinicama mjere onda zbrajanje različitih oblika energije nije moguće pa tada bilanca daje samo rezultate o raspoloživim količinama pojedinih oblika.

U određivanju bruto raspoložive energije određenog područja poseban problem predstavlja obračunavanje energije vodnih snaga. Moguća su tri pristupa.

Najčešće se računa da se proizvodnjom električne energije u hidroelektranama "štedi gorivo u termoelektranama" pa se vodnim snagama pripisuje energija goriva koje je potrebno za proizvodnju iste količine električne energije u termoelektranama. To drugim riječima znači da se hidroelektranama pripisuje stupanj djelovanja od oko 30-35% što energetski nije posve korektno jer je stvarni fizikalni stupanj djelovanja hidroelektrana u pretvorbi potencijalne energije vode u električnu energiju, znatno viši.

Drugi pristup u obračunavanju vodnih snaga je taj da se računa da je energija vodnih snaga jednaka ostvarenoj proizvodnji električne energije u hidroelektranama što je svakako prenisko jer se, kao što je poznato, u promatranoj energetskoj pretvorbi javljaju gubici. Dakle, u ovom slučaju se hidroelektranama pripisuje stupanj djelovanja od 100%.

Konačno, treći način obračunavanja, energije vodnih snaga je taj da se računa sa stvarno iskorištenom potencijalnom energijom vodotoka. Ta energija se može odrediti na taj način da se količina proizvedene električne energije u hidroelektrani podjeli sa stvarnim stupnjem djelovanja te hidroelektrane. U tom slučaju će stupanj djelovanja hidroelektrana iznositi oko 75%.

Čini se da je najprihvatljiviji treći način jer on daje realnu sliku energetske pretvorbe u hidroelektrani. Na taj način može se obračunati i energija sadržana u nuklearnom gorivu upotrebljenom za proizvodnju električne energije u nuklearnoj elektrani ili energija geotermičkog izvora iskorištenog također za proizvodnju električne energije, naravno uz primjenu odgovarajućih stupnjeva djelovanja.

Nakon što se na upravo opisan način odredi ukupno potrebna energija na

promatranom području mogu se izračunati neke karakteristike analiziranog energetskog sistema.

Udio vlastitih energetskih izvora određuje se kao odnos ukupno eksploatirane energije svih prirodnih izvora i ukupno potrebne energije, odnosno bruto raspoložive energije. Također se može odrediti i udio vlastitih izvora u ukupnoj potrebi za prirodnim izvorima jednostavnim dijeljenjem ukupne eksploatacije prirodnih izvora i bruto raspoložive energije samo primarnih oblika.

U nastavku tablice koja je nazvana energetskom bilancom tj. u sliljedećim recima analiziraju se postrojenja za energetske pretvorbe. Najprije se registrira energija iskorištena u postrojenjima za energetske pretvorbe na taj način da se za svaki tip pretvorbi predvidi po jedan redak a u stupcima koji odgovaraju oblicima energije upisuje se količina iskorištenih oblika tokom raznovrsnog vremenskog intervala. U pojedinim recima je potrebno navesti sva postrojenja koja postoje u okviru promatranog područja (kao npr. hidroelektrane, termoelektrane, javne toplane, industrijske toplane, rafinerije nafte, koksare, gradske plinare itd.) a posljednji redak služi za sumiranje ukupno iskorištene energije u svim energetskim pretvorbama. Na taj način se dobije pregled energije korištene u energetskim transformacijama uz poznatu strukturu korištenih oblika energije i uz poznatu strukturu postrojenja za energetske pretvorbe.

Podacima o energiji za energetske pretvorbe obuhvaćaju se samo oblici energije koji neposredno služe za pretvorbu, a ne i oni oblici koji se koriste za pogon tih pretvorbi jer će se energija za pogon analizirati naknadno.

Na temelju podataka o energiji za energetske pretvorbe moguće je odrediti udio prirodnih oblika energije u ukupnoj energiji koja se upotrebljava za energetske pretvorbe i jednostavnim dijeljenjem ta dva podatka.

Nakon što se odredi energija za energetske pretvorbe slijedi prikaz energije koja se proizvodi u tim postrojenjima. Taj dio tablice formira se na jednak način kao i dio tablice u kojem se određuje energija za energetske pretvorbe, a to znači da su reci potpuno identični tj. za svaku grupu postrojenja za energetske pretvorbe predviđen je po jedan redak odnosno u posljednjem retku registrira se ukupna proizvodnja pretvorbenih oblika.

U ovom dijelu tablice stupci koji se odnose na primarne oblike energije ostaju nepromijenjeni budući da se u tim postrojenjima proizvode pretvorbeni oblici energije.

Na temelju podataka o energiji za energetske pretvorbe i o proizvodnji pretvorbenih oblika moguće je odrediti stupnjeve djelovanja pojedinih energetskih pretvorbi kao i prosječni stupanj djelovanja svih energetskih pretvorbi što je također jedna od bitnih karakteristika energetskog sistema promatranog područja.

Slijedećim retkom energetske bilance određuje se raspoloživa energija pretvorbenih oblika. Kao što je iz dosadašnjeg izlaganja poznato u prvom dijelu tablice u kojem je određena ukupno potrebna energija za pretvorbene oblike promatrana je kao razmjena s drugim područjima pri čemu je bila obuhvaćena razmjena s inozemstvom ali i razmjena s drugim područjima u okviru iste zemlje. Također je u obzir uzeto i stanje na skladištima odnosno i isporuke za bunker brodova za one pretvorbene oblike energije koje preuzimaju brodovi.

Raspoloživa energija pretvorbenih oblika određuje se na taj način da se na proizvedene količine doda energija uvoza i nabavke, a odbije energija izvoza i

isporuke, doda ili oduzme saldo skladišta i oduzme bunker brodova. Drugim riječima, do raspoložive energije pretvorbenih oblika može se doći jednostavnim zbrajanjem podataka o proizvodnji pretvorbenih oblika energije i podataka određenih u početnom dijelu tablice prilikom određivanja ukupne raspoložive energije na promatranom području. Ovdje se još jednom naglašava da nije dopušteno zbrajati raspoloživu energiju prirodnih oblika i raspoloživu energiju pretvorbenih oblika jer je za proizvodnju pretvorbenih oblika iskorišten dio raspoložive prirodne energije, pa bi se, prema tome, spomenutim zbrajanjem određeni iznos energije obračunavao dva puta.

Dijeljenjem energije proizvedenih pretvorbenih oblika može se odrediti stupanj zadovoljenja potreba za pretvorbenim oblicima na promatranom području. Također je moguće odrediti udio pretvorbenih oblika koji se podvrgavaju ponovnoj energetskoj pretvorbi i to na taj način da se podjeli ukupna energija pretvorbenih oblika iskorištenih za energetske pretvorbe i ukupno raspoložive energije pretvorbenih oblika.

U nastavku tablice tj. u slijedećim recima energetske bilance određuje se energija za pogon energetskih postrojenja. Tu energiju potrebno je posebno odrediti jer ona ovisi, kako je već rečeno, o strukturi potrošnje energije, o potrebnim energetskim pretvorbama i o strukturi nalazišta prirodnih oblika energije.

Energija za pogon se, prema tome, određuje za sva postrojenja za eksploataciju nalazišta prirodnih oblika energije i za sva postrojenja za energetske pretvorbe koja na promatranom području postoje. Za svaki tip tih postrojenja potrebno je predvidjeti po jedan redak tablice, odnosno posljednji redak ove grupe je predviđen za određivanje ukupno iskorištene energije za pogon.

Iz tog dijela tablice dobiva se pregled o iskorištenju energije za pogon u svakom tipu energetskih postrojenja - npr. u rudnicima ugljena, za eksploataciju zemnog plina, za korištenje geotermičke energije, u termoelektranama, hidroelektranama, rafinerijama nafte itd. - svakog oblika energije, ali se također može vidjeti i ukupna potrošnja svakog oblika energije u svim energetskim postrojenjima, kao i sveukupna potreba energije iskorištena za pogon svih energetskih postrojenja.

Koji će se oblik energije iskoristiti za pogon energetskog postrojenja ovisi o tipu energetskog postrojenja, o raspoloživom obliku energije i o potrebnom korisnom obliku (npr. toplinska ili mehanička energija). Najčešće se za opskrbu mehaničkom energijom upotrebljava električna energija, često se koristi upravo onaj oblik energije koji se proizvodi u samom postrojenju, a za proizvodnju potrebne toplinske energije iskorištavaju se različiti oblici energije, upotreba kojih može ovisiti o vrlo različitim prilikama.

Dosadašnjim recima energetske bilance određena je ukupno potrebna energija ili bruto raspoloživa energija, analizirane su prilike u energetskim pretvorbama tj. registrirana je potrošnja energije za pretvorbe (kao i proizvodnja pretvorbenih oblika, određene su raspoložive količine pretvorbenih oblika energije i određena je energija potrebna za pogon energetskih postrojenja koja postoje na promatranom području. Slijedeći korak u konstrukciji energetske bilance je određivanje neto raspoložive energije za koju je također predviđen jedan redak.

Neto raspoloživa energija određuje se tako da se za prirodne oblike od bruto raspoloživih količina, a za pretvorbene, od raspoloživih količina oduzmu količine koje su iskorištene u energetskim pretvorbama i za pogon energetskih postrojenja.

Neki od oblika energije ne pojavljuju se u retku za neto raspoloživu energiju jer su u potpunosti iskorišteni u energetskim pretvorbama (npr. sirova nafta, vodne snage, nuklearno gorivo) pa je prema tome njihov tok u sistemu završen.

Neto raspoloživa energija nije još i energija koju iskorištavaju neposredni potrošači jer je od te energije potrebno odbiti gubitke u energetskim mrežama. Za one oblike energije kod kojih se ti gubici pojavljuju kao npr. u transportu i distribuciji zemnog i gradskog plina, u prijenostu i distribuciji električne energije, u mrežama za distribuciju toplinske energije itd.

Osim gubitaka energije u energetskim mrežama, uobičajeno je da se izdvoji i tzv. sirovinska ili neenergetska potrošnja oblika energije (npr. zemni plin za proizvodnju umjetnih gnojiva ili primarni benzin za petrokemijsku industriju) pa se jedan redak predviđa i za tu potrošnju.

Konačno u slijedećem retku određuje se energija predana potrošačima na taj način da se od neto raspoložive energije svih prirodnih i svih pretvorbenih oblika odbiju gubici u energetskim mrežama i neenergetska potrošnja. Odnos energije predane neposrednim potrošačima i bruto raspoložive energije predstavlja stupanj djelovanja energetskog sistema. U taj stupanj uključeni su stupnjevi djelovanja svih energetskih pretvorbi, gubici energije u transportu i distribuciji, energija za pogon energetskih postrojenja i sirovinska potrošnja energije.

Energija predana neposrednim potrošačima dalje se svrstava prema grupama potrošača na industriju, transport i tzv. opću potrošnju. I unutar svake grupe predviđa se dalja mogućnost podjele na podgrupe, a za svaku grupu i podgrupu predviđa se po jedan redak energetske bilance.

Uobičajeno je da se podaci o potrošnji energije u industriji grupiraju prema industrijskim granama u kojima se ostvaruje glavnina utroška energije. Te industrijske grane su obojena metalurgija, crna metalurgija, proizvodnja baznih kemijskih proizvoda, proizvodnja građevnog materijala (cementa), proizvodnja i prerada papira, prerada nemetalnih minerala (proizvodnja stakla) itd. Osim ovih izdvojenih grana svakako je potrebno jedn redak bilance predvidjeti i za ostalu industriju u koju se svrstavaju sve grane industrije koje nisu gore izdvojene. Grane koje će se izdvojiti u smislu registriranja utrošenih količina pojedinih oblika energije mogu biti i različite od nabrojenih, a ovisit će o strukturi industrije na promatranom području.

Energija koju iskorištavaju transportni potrošači svrstava se prema vrstama transporta na energiju za željeznički, cestovni, zračni, pomorski i riječni transport.

Za potrošače iz grupe opće potrošnje uobičajeno je da se podjela vrši na pet grupa i to - građevinarstvo, šumarstvo, poljoprivredu, komunalne potrošače i tzv. male potrošače. U skupinu malih potrošača svrstavaju se svi oni potrošači koji nisu obuhvaćeni niti jednom prethodnom podgrupom kao npr. kućanstva.

Registriranjem podataka o oblicima energije koje su iskoristile pojedine podgrupe potrošača triju osnovnih potrošačkih grupa obično se završava energetska bilanca iako se, kao što je poznato, u uređajima i aparatima pojedinih potrošača korišteni oblici energije pretvaraju u tzv. korisne oblike energije.

Korisni oblici energije, tj. mehanička, toplinska, kemijska ili svjetlosna energija najčešće se ne registriraju energetskom bilancom budući da uglavnom nisu poznati stupnjevi djelovanja pretvorbi u korisnu energiju. Spomenuti stupanj djelovanja definira se kao omjer korisne energije i energije predane uređaju potrošača, a kako ovisi o obliku korisne energije, o obliku dovedene energije, o tipu postrojenja ili

uređaja koji služi za pretvorbu, o stanju i načinu upotrebe tog uređaja itd., jasno je da su moguće varijacije u relativno širokom intervalu.

Može se napomenuti da industrijski potrošači trebaju sva četiri korisna oblika energije s tim da se mehanička i svjetlosna energija gotovo uvijek dobivaju pretvorbom električne energije. Ponekad se međutim, za dobivanje mehaničke energije upotrebljavaju motori s unutrašnjim izgaranjem i to u slučaju kad nema mogućnosti priključaka na električnu mrežu ili ako se radi o rezervnim pogonima. Kao kemijska energija u industriji se iskorištava električna energija u pogonima elektrolize i dio koksa u visokim i lučnim pećima dok se svi ostali oblici energije predane industriji pretvaraju u toplinsku energiju.

U transportu dovedena energija se uglavnom pretvara u mehaničku energiju, ali se ne smije zanemariti ni dio koji se iskorištava za zagrijavanje prometnih sredstava odnosno vrlo mali dio koji se koristi za rasvjetu tih sredstava.

Energija predana malim potrošačima najvećim dijelom se pretvara u toplinsku energiju (za grijanje prostorija, pripremu tople vode i kuhanje) a ostatak se koristi bilo u obliku mehaničke ili svjetlosne energije.

Često se govori o približnom iznosu svih stupnjeva djelovanja pa se procjenjuje da stupanj djelovanja pretvorbe u korisnu energiju u industriji iznosi oko 45-55%, u transportu 20-25% i u grupi opće potrošnje oko 45%.

Poznavajući energiju predanu neposrednim potrošačima uz korištenje navedenih stupnjeva djelovanja može se odrediti ukupna korisna energija iskorištena na promatranom području u promatranom vremenskom intervalu. Odnos korisne energije i bruto raspoložive energije naziva se stupnjem djelovanja energetike.

U dosadašnjem razmatranju o energetskoj bilanci bilo je riječi o toku energije u energetskom sistemu promatranog područja. Na osnovu tog toka formirana je tablica koja je nazvana energetskom bilancom, a nekoliko riječi je rečeno i o tzv. korisnim oblicima energije.

Tokom izlaganja rečeno je da se energetska bilanca može izraditi kao jedna tablica ili kao više tablica a ovdje je prikazan način izrade pomoću jedne tablice. U toj tablici predviđeno je da svakom obliku energije koji se iskorištava na promatranom području odgovara po jedan stupac tablice, a ako se bilanca izrađuje u energetskoj jedinici, što je uostalom i cilj cijelog posla, potrebno je predvidjeti jedan stupac za izračunavanje ukupne prirodne energije, jedan stupac za izračunavanje ukupne pretvorbene energije i jedan stupac za računanje sveukupne energije koja je u stvari zbroj dva prethodna stupca.

Budući da je stanje stupaca sasvim određeno s brojem korištenih oblika energije, u nastavku će se navesti popis svih potrebnih redaka za izradu energetske bilance. Na taj način će se ukratko sintetizirati - ukupno dosadašnje izlaganje, a horizontalnim linijama će se osim toga označiti mogućnost podjele jedne tablice na više njih, odnosno mogućnost izrade energetske bilance pomoću više tablica.

BRUTO RASPOLOŽIVA ENERGIJA

Eksploatacija nalazišta prirodnih oblika
Uvoz - iz inozemstva
- iz drugih područja iste zemlje
Izvoz - u inozemstvo
- u druga područja iste zemlje
Saldo skladišta
Bunker brodova
Bruto raspoloživa energija

ENERGIJA ZA ENERGETSKE PRETVORBE

Koksare
Industrijske kotlovnice
Industrijske toplane
.
.
.
Termoelektrane
Hidroelektrane
Nuklearne elektrane
Ukupna energija za energetske transformacije

PROIZVODNJA PRETVORBENIH OBLIKA ENERGIJE

Koksare
Industrijske kotlovnice
Industrijske toplane
.
.
.
Termoelektrane
Hidroelektrane
Nuklearne elektrane
Ukupna proizvodnja pretvorbenih oblika

RASPOLOŽIVA PRETVORBENA ENERGIJA

Raspoloživa energija pretvorbenih oblika

ENERGIJA ZA POGON ENERGETSKIH POSTROJENJA

Rudnici kamenog ugljena
Rudnici mrkog ugljena

.
.
.
Energija za eksploataciju geotermičke energije
Koksare
Industrijske kotlovnice
Industrijske toplane
.
.
.
Termoelektrane
Hidroelektrane
Nuklearne elektrane
Ukupna energija za pogon

NETO RASPOLOŽIVA ENERGIJA, GUBICI U ENERGETSKIM MREŽAMA? NEENERGETSKA POTROŠNJA I ENERGIJA PREDANA POTROŠAČIMA

Neto raspoloživa energija
Gubici energije u transportu i distribuciji
Neenergetska potrošnja energije
Energija predana potrošačima

ENERGIJA PREDANA INDUSTRIJI

Obojena metalurgija
Proizvodnja baznih kemijskih proizvoda
Proizvodnja građevnog materijala
Proizvodnja i prerada papira
Prerada nemetalnih minerala
Ostala industrija
Ukupna energija predana industriji

ENERGIJA PREDANA TRANSPORTU

Željeznički transport
Cestovni transport
Zračni transport
Pomorski transport
Riječni transport
Ukupna energija predana transportu

ENERGIJA PREDANA OPĆOJ POTROŠNJI

Građevinarstvo

Šumarstvo
Poljoprivreda
Komunalni potrošači
Mali potrošači
Ukupna energija predana općoj potrošnji

Velikim štampanim slovima označeni su nazivi pojedinih dijelova tablice, odnosno nazivi pojedinih tablica ukoliko bi se energetska bilanca prikazivala pomoću više tablica.

4.2. ENERGIJA POTREBNA ZA PROIZVODNJU ENERGIJE

Činjenica je da se o odnosima u energetici zaključuje samo na temelju neposredne potrošnje energije u promatranom procesu. Ako se promatra proizvodnja nekog od prirodnih energetskih izvora smatra se da je u tom procesu utrošena energija jednaka potrošnji za pogon uređaja i postrojenja koja tu eksploataciju obavljaju. Postrojenja za energetske pretvorbe promatraju se tako da se registrira potrošnja energije za pretvorbu i proizvodnju pretvorbenog oblika energije, odnosno gubici pretvorbe koji su razlika ulaza i izlaza, te potrošnja energije za pogon tog postrojenja. Isto tako se u transportu energije u obzir uzimaju samo neposredno nastali gubici transportiranog energenta, a nikad se u obzir ne uzima npr. energija koja je utrošena u transportu druge vrste energije (npr. potrošnja električne energije ili dizel goriva u željezničkom transportu ugljena).

Da bi se dobio realniji uvid u efikasnost pojedinih energetskih procesa u sveobuhvatnom energetskom sistemu bilo bi ih korisno analizirati u smislu da se obuhvat potrebne energije proširi u odnosu na neposrednu potrošnju energije u samom procesu. To drugim riječima znači da bi za neko energetsko postrojenje trebalo analizirati slijedeće energetske razine:
- neposrednu potrošnju energije u samom procesu
- potrošnju energije za proizvodnju i transport energenta koji se u tom procesu upotrebljavao
- energiju utrošenu za proizvodnju uređaja, opreme i objekata koji se u tom procesu koriste i konačno,
- energiju iskorištenu za izradu strojeva s kojima su napravljeni oprema i uređaji za promatrani objekt.

Ako bi se kroz četiri navedene razine analizirala potrošnja energije u nekom postrojenju za energetsku pretvorbu npr. u termoelektrani na ugljen to znači da bi kao potrošnju energije u toj termoelektrani trebalo obuhvatiti slijedeće:
- neposrednu potrošnju lignita za proizvodnju električne energije,
- potrošnju energije za proizvodnju lignita i za njegov transport do termoelektrane,
- energiju utrošenu za izgradnju termoelektrane uključujući i energiju koja je utrošena za proizvodnju ugrađenih materijala, uređaja i ostale opreme,
- energiju utrošenu za proizvodnju strojeva i uređaja pomoću kojih je proizvedena oprema za termoelektranu.

Bio bi to ukupan ulaz energije u promatranu elektranu dok bi izlaz energije bila proizvedena električna energija na pragu termoelektrane. Jednako tako mogla bi se analizirati i sva ostala energetska postrojenja tj. da se uvaže ukupna energetska "ulaganja" u svako postrojenje što bi omogućilo sagledavanje efikasnosti tih postrojenja u jednom drugom svijetlu. Tako npr. za korištenje Sunčeve energije koriste se materijali za čiju proizvodnju su potrebne znatne količine energije.

Uređaji za grijanje pomoću Sunčeva zračenja, fotonaponski i termoelektrični sistemi koriste velike količine aluminija, bakra, stakla, plastičnih masa, čelika i betona. Pored navedenoga, fotonaponski sistemi troše velike količine energije u procesima obrade pijeska za dobivanje kristaličnog i amorfnog silicija. Naime, kod proizvodnje kristaličnog silicija troši se više energije nego kod proizvodnje amorfnog silicija, ali se postiže znatno bolji stupanj korištenja kod kristaličnih silicija, pa je ukupni energetski efekat gotovo isti.

Za dobivanje ulja iz uljnih škriljavaca potrebna je velika količina topline, a to znači energija koju treba potrošiti za dobivanje ulja. Kolika energija je potrebna po jedinici količine ulja, ovisno je u prvom redu o sadržaju ulja u uljnim škriljavcima. Pri dobivanju ulja iz uljnih škriljavaca upotrebljavaju se dvije metode: rudarenje i odjeljivanje ulja u samim nalazištima.

Kad se radi postupkom rudarenja, treba rudu izvaditi iz ležišta, samljeti je i u posebnim postrojenjima zagrijati do 780 K da bi se odjelilo ulje od anorganskog materijala. Pored potrošene energije za vađenje, mljevenje i zagrijavanje rude, potrebno je potrošiti veliku količinu energije za odvoz i spremanje otpada koji iznosi oko 80% proizvedene rude.

Kad se, međutim, odjeljivanje ulja provodi u samim ležištima, u ležišta se unosi vrući medij (zrak, vodena para, vodik i slično) kojim se ruda zagrijava i dolazi do odvajanja i cjeđenja ulja, koje se poslije crpkama izvlači na površinu. Glavna je poteškoća ovog postupka u tome, što stjene slabo provode toplinu, pa je potrebno razbiti stjenje da se proširi djelovanje injektiranog medija. To razbijanje (drobljenje) stijenja iziskuje velike količine različitih oblika energije, ovisno o primijenjenom postupku.

O problemu ukupne potrošnje energije za proizvodnju energije do danas se samo naznačuju grublje teoretske podloge u smislu što bi trebalo obuhvatiti u takvim analizama dok kvantificirane obrade tog problema nema. Drugim riječima ne postoji niti jedno postrojenje da je obrađeno na opisani način pa je zbog toga praktički nemoguće dati ocjenu u kojem rasponu se kreće povećanje ukupnog ulaza energije u odnosu samo na neposrednu potrošnju promatranom procesu.