

V diagram na sliki 6 so vneseni izkoristki po obeh merilnih metodah, kakor tudi ustrezne merilne tolerance. Tako smo prišli do tolerančnih polj verjetnih izkoristkov. V diagramu je nazorno prikazano, da je tolerančno polje indirektnih metode povsem prekrito s tolerančnim poljem direktne metode pri preizkusih št. 2, 4 in 5, medtem ko se pri preizkusu št. 3 obe tolerančni polji prekrivata le deloma.

Logično je, da kažejo predeli, v katerih se obe tolerančni polji prekrivata, območje izkoristkov z dvojno verjetnostjo. V tem predelu tolerančnih polj je torej stvarni izkoristek preizkušenega parnega kotla.

Iz navedenega izhaja, da imamo lahko povsem upravičeno izkoristek, določen po indirektni metodi pri preizkusih št. 2, 4 in 5, že za dejanski izkoristek. V pri-

meru preizkusa št. 3 pa bomo poiskali dejanski izkoristek parnega kotla v sredini prekritja obeh tolerančnih polj, in sicer:

$$[(89,24 + 0,99) + (93,58 - 4,29)] : 2 = 89,76 \%$$

Če uporabljamo obe merilni metodi, lahko ugotovimo, da nobena od obeh ne daje napačnih rezultatov (če sta sicer izvedeni pravilno), dokler se obe tolerančni polji prekrivata. Če pa do prekrivanja ne pride, lahko rečemo, da daje ustrezne rezultate tista metoda, ki ima manjšo merilno toleranco, t. j. v našem primeru indirektna metoda za določitev izkoristka parnega kotla.

Avtor: prof. ing. Leopold André, Oddelek za strojništvo elektro-strojne fakultete v Ljubljani

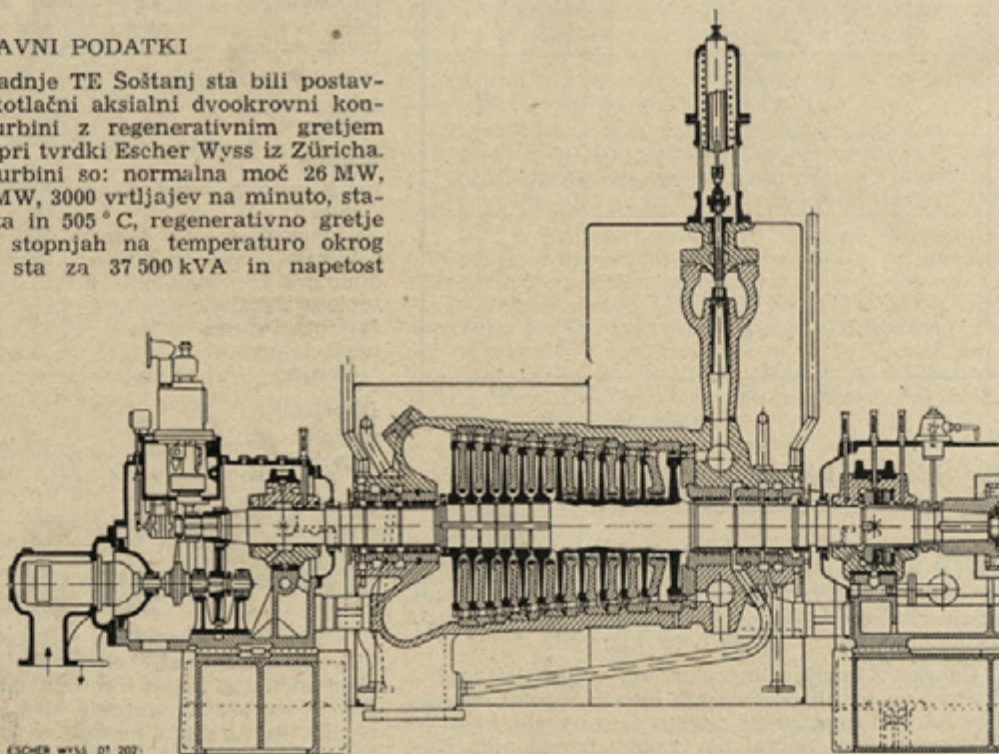
DK 621.165(497.12)

Turbini TE Šoštanj na tlak pare 95 ata

BORIS ČERNIGOJ

GLAVNI PODATKI

V prvi fazi izgradnje TE Šoštanj sta bili postavljeni dve enaki enakotlačni aksialni dvookrovni kondenzacijski parni turbini z regenerativnim gretjem kondenzata, izdelani pri tvrdki Escher Wyss iz Züricha. Glavni podatki za turbini so: normalna moč 26 MW, maksimalna moč 30 MW, 3000 vrtljajev na minuto, stanje sveže pare 95 ata in 505 °C, regenerativno gretje kondenzata v štirih stopnjah na temperaturo okrog 190 °C. Generatorja sta za 37 500 kVA in napetost



Sl. 1 a. Visokotlačni del dvookrovne parne turbine Escher Wyss za 30 MW iz TE Šoštanj v prerezu
Tlak pare 95 ata, temperatura 505 °C. Stirje odcepi za regenerativno gretje napajalne vode

10 500 V. Izdelalo ju je podjetje Oerlikon iz Züricha. Sedaj, ko je dokončana šele prva faza izgradnje te elektrarne, krijeta ti dve turbini v glavnem le temeljno obremenitev; ko pa bo dograjena še druga faza te elektrarne z eno 60 MW enoto, bosta ti dve turbini v veliki meri pritegnjeni za kritje konic. Ker sta obe turbini z vso ostalo opremo med seboj povsem enaki, bo v nadaljevanju govora le o eni.

OPIS TURBINE

Turbina ima dva okrova. V visokotlačnem okrovu je regulacijska stopnja z dvoventnim Curtisovim kolesom in za njo 11 navadnih enakotlačnih stopenj, v nizkotlačnem okrovu pa je osem enakotlačnih stopenj. Velik entalpijski padec in ne ravno najboljši vakuum

(nad 0,065 ata), ki gre na rovaš neugodnih vodnih razmer v Šoštanju, sta omogočila izvedbo nizkotlačnega okrova za nedeljeni tok.

Visokotlačni okrov je iz molibdenske jeklene litine, nizkotlačni pa v sprednjem delu iz jeklene litine in v zadnjem iz sive. Podobno je s pregradami. Prve so iz molibdenske litine, srednje iz jeklene in zadnje iz posebne sive litine.

Tesnjenje je v celoti izvedeno z labirinti. Pri temperaturah nad 420 °C so tesnilke grafitne labirintne (patent Escher Wyss), pod to temperaturo pa navadne z grebeni iz posebnega bronu. Tudi v pregrade so vloženi segmenti z grebeni za tesnjenje.

Turbini imata po dva vzporedna glavna vstopna ventila. Tako je mogoče preskusiti posamezen ventil na

zapiranje tudi, medtem ko turbina teče. Skupinski ventili so štirje. So enosedežni in imajo majhne premere, kar je z vidika varnega obratovanja pri visokih temperaturah najboljša rešitev. Tik za ventili so difuzorji, ki pretvarjajo del kinetične energije pare nazaj v tlačno in s tem zmanjšujejo izgube zaradi pretoka pare skozi ventil.

Visokotlačni rotor je izdelan s prvimi šestimi koluti iz enega kosa. Ostali koluti so nakrčeni na gred, ki je na tistih mestih stopničasta, da je montaža lažja in material enakomerno obremenjen.

Gredi so vitke, tako da so predori v pregradah in okrovju majhni in z njimi izgube zaradi uhačanja pare. Vse gredi so med seboj togo spete, tako da zadošča za vse en sam oporni ležaj, pa tudi upogibi so manjši. Kritična vrtilna hitrost je pod obratovalno, toda rotorji so tako dobro zbalansirani, da se prehod čezno komaj opazi.

Vodilno lopatje je v sprednjih stopnjah rezkano iz nerjavnega jekla (CrNi), v zadnjih pa izdelano iz ponikljane pločevine iz nikljevega jekla in zalito v pregrade. Gonilno lopatje je v sprednjih stopnjah iz nerjavnega jekla, v zadnjih pa iz nikljevega. Lopatice, ki delajo v vlažni pari, so ponikljane. Gonilne lopatice imajo na vrhu okrogle čepke, s katerimi so nanje prikovane bandaže.

POSEBNI KONSTRUKCIJSKI UKREPI

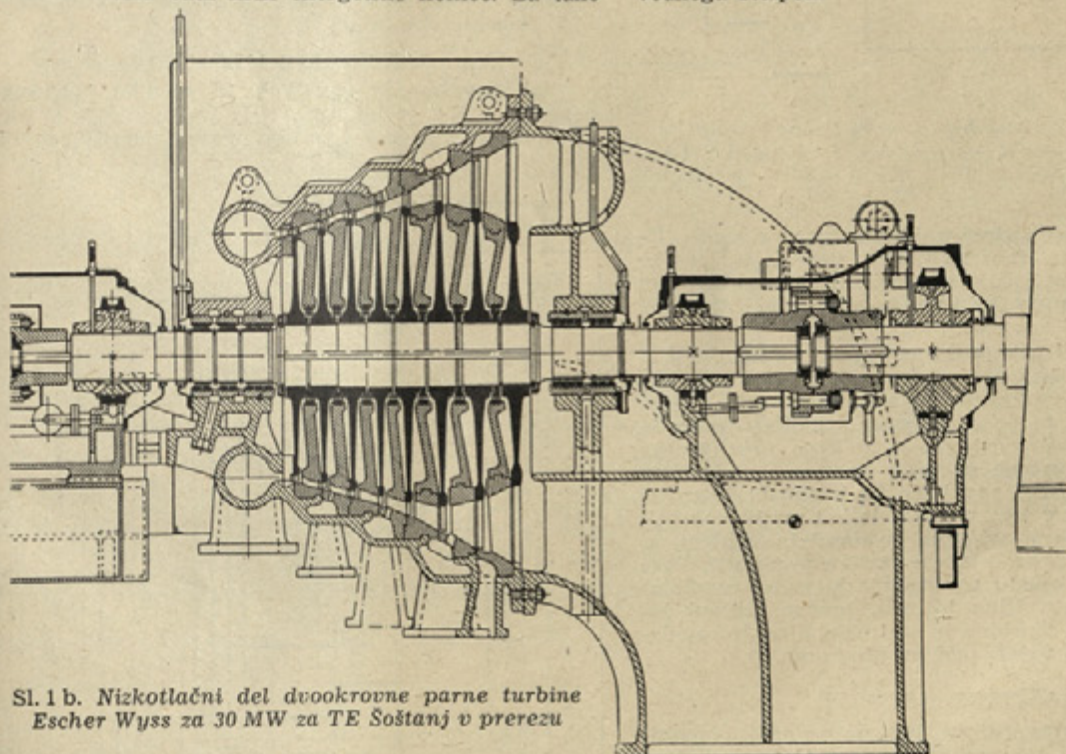
Kakor je bilo že omenjeno, je v načrtu, da bosta turbini deloma tudi krili energetske konice. Za tako

Gredi rotorjev so vitke, tako da se njihove temperature hitro izenačujejo s temperaturo okolice. Na prava za počasno vrtenje rotorja, ki je med nizkotlačnim okrovom in generatorjem, omogoča, da se rotor med ohlajevanjem ne deformira in ostane tako ves čas vrtenja pripravljen za ponovni zagon.

Pogon skupinskih ventilov je izdelan tako, da se ventili dvigajo tudi še potem, ko so že toliko odprti, da se para ne duši več. S tem je doseženo, da se tudi ventila, ki se prva odpreta, stalno neznatno gibljeta. Tako je zmanjšana nevarnost, da bi se zapekla in obvisela. Da pa se vretena pri stalnem gibanju ne bi prekmalu obrabila, so iz nitriranega jekla.

OPREMA TURBINE

Pod turbino je kondenzator s 1950 m² hladilne površine. Ima 3800 cevi iz medij premera 23/25 mm in dolžine 6,5 m. Kondenzator, ki ga je izdelala tvrdka Escher Wyss, je v celoti varjen, cevi pa so v čelne stene uvaljane. Kondenzator je dvodelen, tako da se da polovica odpirati tudi med obratovanjem. Vsaka polovica ima svojo črpalko hladilne vode. Ena črpalka je v rezervi za oba agregata skupaj, čeprav lahko daje turbina moč 26 MW tudi z eno samo črpalko hladilne vode. Za črpanje kondenzata iz kondenzatorja sta na razpolago dve vzporedni črpalčki, ki morata obenem tlačiti kondenzat skozi vse grelnne elemente v zagonsko posodo, kar da skupaj manometrsko višino okrog 225 m vodnega stolpca.



Sl. 1 b. Nizkotlačni del dvookrovne parne turbine Escher Wyss za 30 MW za TE Soštanj v prerezu

obratovanje je značilno veliko in hitro spreminjanje moči. Z močjo pa se spreminjajo tudi temperature vzdolž turbine, kar lahko privaja do dodatnih obremenitev in deformacij ter sprememb v prilegih in medsebojnih legah statorskih in rotorskih delov. Za odstranitev ali zmanjšanje teh nevarnosti so konstrukterji firme Escher Wyss poskrbeli z več ukrepi.

Enakomerno raztezanje okrova visokega tlaka je zagotovljeno z ustreznim oblikovanjem ulitkov, s parnim gretjem priborov ter s simetrično namestitvijo prvih dveh skupin vodilnih kanalov, ki dobivata paro istočasno. Okrov visokega tlaka se lahko ogreva tudi z vgrajenimi električnimi grelnimi elementi.

Turbina ima dvostopenjski parni ejektor in enega pomožnega enostopenjskega za glavno praznjenje kondenzatorja na začetku obratovanja. Ejektor dobiva paro iz zagonske posode.

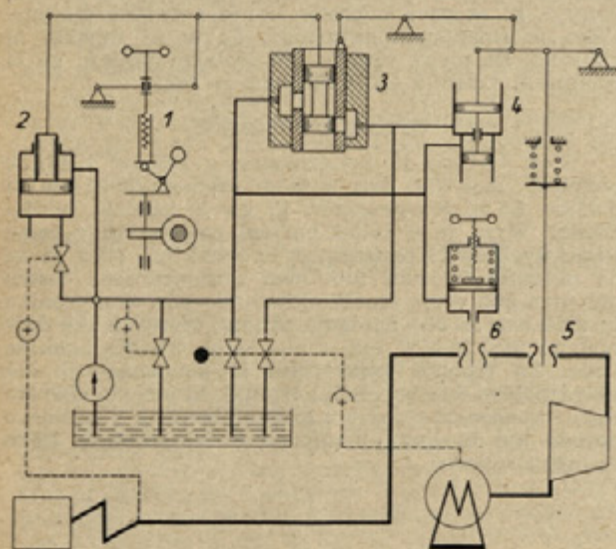
REGULACIJA

Para prihaja v turbino po štirih skupinskih ventilih, od katerih se prva dva odpirata istočasno. Ko sta povsem odprta, ima turbina 75 % normalne moči (19,5 MW). S tretjim ventilom se poveča moč na 100 % normalne (26 MW) in s četrtem na 115,4 % normalne.

Turbini delata tedaj najbolj ekonomično pri 87 % maksimalne moči.

Glede na predvideno posebno vlogo obeh turbin je njuna regulacija urejena tako, da se da nastavljati ali na hitrostno ali na tlačno regulacijo.

Kadar je vklopljena hitrostna regulacija, krmili skupinske ventile samo hitrostni regulator, moč pa se nastavlja s posegom v centrifugalni regulator. Turbina



Sl. 2. Shema združene hitrostne in tlačne regulacije

1 hitrostni regulator, 2 tlačni regulator, 3 krmilni bat, 4 servomotor, 5 skupinski ventili, 6 ventila za hitro zapiranje

tedaj sodeluje pri vzdrževanju frekvence v mreži. Če pa bi se hotel pri tem tlak sveže pare iz kakršnega koli razloga preveč znižati, vskoči tlačna regulacija in toliko pripre skupinske ventile, da padec tlaka ne more prekoračiti dopustnih mej.

Kadar je vklopljena tlačna regulacija, krmili skupinske ventile tlak pare na izstopu iz pregrevnika. V tem primeru vzdržuje turbina konstanten tlak pare. Moč, ki jo daje, pa je sorazmerna s količino pare, ki jo dobiva od kotla, oziroma s količino pokurjenega premoga. Moč turbine se torej uravnava v kurišču kotla. Kotelni tlačni regulator in turbinski hitrostni regulator služita v tem primeru le kot mejni varovali in vskočita samo v primeru, če dosežeta veličini, ki jih kontrolirata, neke določene skrajne vrednosti. Tako mora n. pr. pri izpadu generatorja hitrostni regulator ujeti naraščanje vrtilne hitrosti, preden izklopi hitrostno varovalo. Turbina je nastavljena na to regulacijo, kadar mora dajati moč po programu.

ZAŠČITNE NAPRAVE

Največjo nevarnost za turbino pomeni pomanjkanje olja. Proti tej nevarnosti je turbina zaščitena tako, da se glavna vstopna ventila sploh ne dasta odpreti, če ni olje pod tlakom, in da se tudi sama zapre, če bi se tlak olja zmanjšal. Tudi naprava za počasno sukanje rotorja teče samo, če je olje pod tlakom.

Vsaka turbina ima par med seboj neodvisnih hitrostnih varoval, ki sprožita hitro zapiranje glavnih ventilov, če naraste vrtilna hitrost za 10 % nad normalno. Glavna ventila pa sprožita na koncu zapiranja odklop generatorja. Hitro zapiranje turbine se sproži tudi, če se tlak olja zniža, če tlak v kondenzatorju preveč naraste, ali če se rotor v aksialni smeri preveč približa statorju, ali sploh izmakne iz prave lege.

V toplotni komandi se oglasi hupa in pokaže optični signal, če se poslabša vakuum ali če preveč naraste temperatura olja v ležajih ter zraka ali navitij v generatorju.

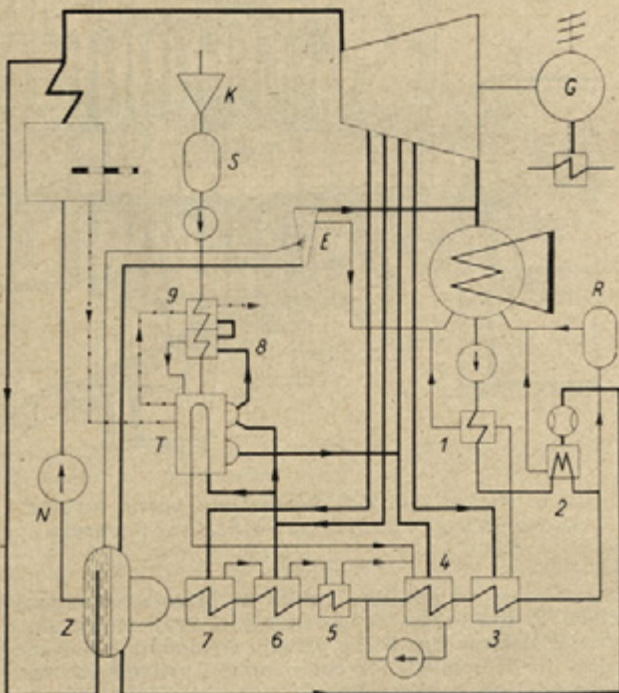
Posebnost obeh turbin je kazalo zasoljenosti lopatja. V bistvu je to diferenčni manometer, ki kaže razliko tlakov med dvema stopnjama v turbini. Pri dani moči stroja je namreč razlika tlakov med dvema stopnjama odvisna od pretočnega prereza, ki je pari na razpolago. Ta pa se zmanjšuje, če se na lopaticah odlaga sol. Tako kazanje zasoljenosti je seveda čisto empirično in služi bolj za opozorilo kakor za meritev.

REGENERATIVNO GRETJE NAPAVALNE VODE

S turbino je povezano regenerativno gretje napaivalne vode, kar je normalna izvedba za turbine takih parnih parametrov in moči. Voda se segreje pri prehodu skozi štiri pokončne grelnike na okrog 185 °C, t. j. na kakih 10 ° pod temperaturo nasičenja. Vključitev grelnikov v obtočje je razvidna iz toplotne sheme, sl. 3. Razen v grelnikih se greje glavni tok še v menjalnikih toplote s kondenzatom grelne pare iz grelnikov in v ejektorjevem kondenzatorju, skupaj tedaj v sedmih elementih. Medtem ko narašča temperatura v nazadnje naštetih delih le po nekaj stopinj, pa narašča v vsakem grelniku za okrog 35 do 45 °. Zadnji štirje ogrevalni elementi delajo v kaskadi in se njihov kondenzat tlačijo v glavni vod, iz prvih treh elementov pa odteka v kondenzator. K celotnemu izkoristku turbinskega postrojenja doprinese regenerativno gretje 4,7 % (absolutno).

PREVZEMNE MERITVE

Ob prevzemnih meritvah, ki so bile v začetku novembra 1956, je bil agregat II že 6 mesecev v trajnem pogonu, agregat I pa dva meseca. Meritve so bile



Sl. 3. Osnovna toplotna shema turbinskega postrojenja TE Šoštanj

E ekspanzijski dulec, K kemična priprava vode, N napajalka, R rezervoar kondenzata, S rezervoar kemično pripravljene vode, T termična priprava vode (uparjalnik in razplinjevalnik), Z zaženska posoda, 1 menjalnik toplote I, 2 ejektorjev kondenzator, 3 grelnik I, 4 grelnik II, 5 menjalnik II, 6 grelnik III, 7 grelnik IV, 8 grelnik na soparo, 9 grelnik na kalužnico

opravljene po pravilih VDI z nekaterimi izjemami, ki so jih narekovala posebne okoliščine pri nas, predvsem takratna težka energetska situacija zaradi nizkih voda.

Glavni namen meritev je bil, da bi se prepričali, ali dejanska poraba toplote ustreza navedbam v garanciji dobavitelja. Če ne bi ustrezala, bi imela elektrarna pravico do odškodnine. Obenem so bile kontrolirane tudi druge navedbe dobavitelja o tehničnih lastnostih turbin. Slednjič je dobila s tem elektrarna najzanesljivejše podatke o delovanju stroja v rednem pogonu.

Na vsaki turbini so bile opravljene po štiri meritve, in sicer pri 30, 26, 19,5 in 10 MW. Za merjenje veličin, iz katerih se računa specifična poraba toplote, so bili uporabljeni samo instrumenti z atesti. Za ostale meritve so bili uporabljeni laboratorijski instrumenti in le v majhni meri obratni. Skupaj je bilo okrog 30 instrumentov. Število mernih mest je bilo tako veliko zaradi kontrole delovanja regenerativnega gretja. Posameznih odčitkov po instrumentih je bilo nad 10 000.

Izračun porabe toplote je pokazal, da dejanska poraba toplote ni v nobenem primeru presegla garantiranih vrednosti, v povprečju pa je bila pri agregatu II za 0,46 % in pri agregatu I za 1,91 % (abs.) manjša od garantirane. Večji del razlike med obema agregatoma gre na račun tega, da je imel ob času meritev kondenzator II štiri mesece službe več kakor kondenzator I in pred preizkusom nista bila očiščena. Izkoristek turbinskega dela postrojenja, ki je razmerje med proizvedeno električno energijo in entalpijsko razliko pare od vstopa v turbino do izstopa iz

zadnjega grelnika, je bil v povprečju za oba agregata 36 %. Kako se je spreminjal za močjo, pa kaže sl. 4.

Posebej sta bila preizkušena regulacija in delovanje hitrostnih varoval. Regulacija je pri nenadnih razbremenitvah turbin delovala brezhibno in je ostala najvišja dosežena vrtilna hitrost še vedno v varni razdalji od števila vrtljajev, pri katerem izklopi hitrostno varovalo. Pred razbremenitvami poskusi so bila preskušena še hitrostna varovala, in sicer v prostem teku z ročnim povečevanjem vrtilne hitrosti.

Prevezni poskusi so potrdili, da obe turbinski postrojenji glede delovanja povsem ustrezata dogovorjenim pogojem.

PRIMERJAVA Z DRUGIMI POSTROJENJI

Vrednost tega turbinskega postrojenja se še posebej pokaže, če primerjamo izkoristke posameznih postrojenj pri nas in pa dviganje povprečnega izkoristka parnih turbinskih postrojenj naših javnih elektrarn.

Izkoristki posameznih parnih turbinskih postrojenj so bili po meritvah Inštituta za strojno tehnične meritve univerze v Ljubljani takile:

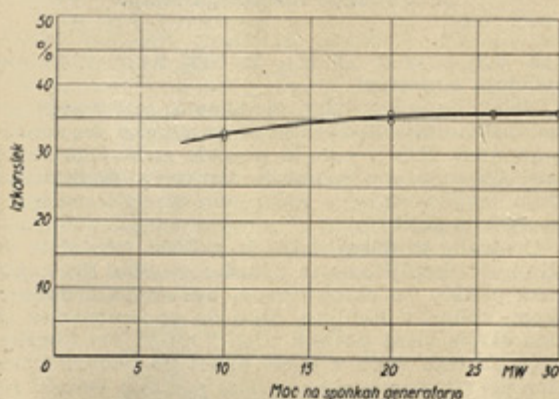
Agregat	Moč MW ekon./maks.	Para ata/°C	Izkori- stek %	Opomba
Velenje	—/7,5	17/360	18	preračunano iz meritev na parnem kotlu
Brestanica I	8/12,5	35,5/400	27	preračunano iz meritev na parnem kotlu
Trbovlje I	16/24	35,5/400	26,9	dela brez regen. gretja napajalne vode
Trbovlje II	16/20	36/440	30,4	dela brez regen. gretja napajalne vode
Šoštanj I	26/30	95/505	36,2	dela z regen. gretjem napajalne vode
Šoštanj II	26/30	95/505	36,0	dela z regen. gretjem napajalne vode

Povprečni izkoristek na osnovi enakega popolnega izkoriščanja vseh obratujočih javnih parnih turbinskih postrojenj v Sloveniji skupaj se je z vključevanjem novih enot večal takole:

od osvoboditve do 1. 1955	23 %
1. 1956: 1. Trbovlje — turbina III	27 %
2. Šoštanj — turbina II	28 %
3. Šoštanj — turbina I	29 %
1. (?) (Šoštanj — turbina III)	(32 %)

Ti dve kratki primerjavi kažeta, kolikšen napredek je bil dosežen v preteklem letu in kolikšen je še možen v ekonomičnem izkoriščanju energije goriv z uvajanjem modernih parnih turbinskih postrojenj pri nas.

Avtor: doc. ing. Boris Cernigoj, Oddelek za strojništvo elektrostrojne fakultete v Ljubljani.



Sl. 4. Izkoristek turbinskega postrojenja v odvisnosti od moči (brez odvzema pare za termično pripravo vode)

DK 621.175.3(497.12)

Hladilni stolp TE Šoštanj

ZORAN RANT

Hladilni stolp TE Šoštanj je največji objekt te vrste v naši državi. Projektirali in gradili so ga čisto sami domači strokovnjaki in delavci z uporabo samega domačega materiala. Od ostalih večjih v naši državi zgrajenih stolpov se razlikuje po velikosti za cel veličinski red in spada tudi v svetovnem merilu med velikane.

V stolpu se hladi topla hladilna voda iz kondenzatorjev obeh turbin (2×30 MW) za ponovno uporabo. Stolp je v celoti zgrajen iz mineralnih materialov. Luska in nosilna konstrukcija pršišča sta iz ojačenega betona, pršišče in razdelilni kanali za vodo so pa iz salonita. Kar se tiče uporabe salonitnih plošč za pršišče, je ta stolp drugi na svetu.

Karakteristične veličine stolpa so:

premer v pršišču D	47,5 m
višina H	60,0 m
izmenjalna površina A	220 000 m ²
količina vode Q	13 000 m ³ /h
hladilni interval $\Delta \theta_v$	8 deg
natok vode Q/A	7,3 m ³ /m ² h

Hladilni interval je razlika med temperaturama tople in ohlajene vode.

Slika 1 kaže stolp v prerezu. Znamenitost tega stolpa je pršišče, ki je sestavljeno iz vertikalnih plošč debeline 5 mm. Sistem pršišča je prikazan na sliki 2. Hladilna voda se razdeljuje enakomerno po tlorisu