

# PRESEK

List za mlade matematike, fizike, astronome in računalnikarje

ISSN 0351-6652

Letnik **10** (1982/1983)

Številka 1

Strani 24-31, 34-35

Janez Strnad:

## OBISK V ŠOŠTANJSKI ELEKTRARNI

Ključne besede: bolj za šalo kot zares, fizika.

Elektronska verzija: <http://www.presek.si/10/580-Strnad.pdf>

© 1982 Društvo matematikov, fizikov in astronomov Slovenije

© 2010 DMFA - založništvo

Vse pravice pridržane. Razmnoževanje ali reproduciranje celote ali posameznih delov brez poprejšnjega dovoljenja založnika ni dovoljeno.

## OBISK V ŠOŠTANJSKI ELEKTRARNI

Ob cesti med Šoštanjem in Titovim Velenjem stoji na desni pod gričkom skupina stavb z visokimi dimniki in z značilnimi širokimi stolpi, iz katerih se vali noč in dan megla. To je Termoelektrarna Šoštanj (TEŠ). Ta je lani oddala v električno omrežje dobrih 3750 gigawattur električnega dela. Največja slovenska elektrarna je tako sama pokrila skoraj 47 % potreb po električnem delu v naši republici. Preostanek so prispevale druge toplotne elektrarne skupaj z jedrsko elektrarno Krško (10 %) in vodne elektrarne (36 %), nekaj pa smo dobili iz drugih republik in iz tujine (7 %).

V času splošne energijske lakote je šoštanjska elektrarna vredna vse pozornosti. Ima štiri enote, ki so jih gradili drugo za drugo in vsaka poznejša je zmogljivejša in boljša (sl.1).

Enota	moč	lastna raba	leto dograditve
1. TEŠ I	60 MW(2.30 MW)	6 MW	1956
2. TEŠ II	75	7	1960
3. TEŠ III	275	22	1972
4. TEŠ IV	335	30	1977

Moč merimo v *wattih*. Večje enote so kilowatt, megawatt, gigawatt:

$$1 \text{ kW} = 1000 \text{ W} \quad 1 \text{ MW} = 1000 \text{ kW} \quad 1 \text{ GW} = 1000 \text{ MW}.$$

Delo, toploto in energijo merimo v *joulih*. Enoto za delo dobimo, ko pomnožimo enoto za moč z enoto za čas. Joule je *wattsekunda*. Večje enote so kilowattura, megawattura, gigawattura.

$$1 \text{ Ws} = 1 \text{ joule}$$

$$1 \text{ kWh} = 10^3 \text{ W} \cdot 3600 \text{ s} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J}$$

$$1 \text{ GWh} = 10^9 \text{ W} \cdot 3600 \text{ s} = 3,6 \cdot 10^{12} \text{ J}.$$

Naprava z močjo 1 MW odda (prejme) v enem letu delo

$$1 \text{ MW} \cdot 1 \text{ leto} = 1 \text{ MW} \cdot 360 \cdot 24 \text{ h} = 8,64 \text{ GWh}.$$



V toplotni elektrarni poganja *dinamostroj* (generator na indukcijo), ki oddaja električno delo, *parna turbina*. Parna turbina oddaja mehanično delo, dovajamo pa ji toploto, V šoštanjski elektrarni je to toplota, ki se sprosti pri sežigu premoga. Lani je elektrarna porabila več kot štiri in pol milijona ton premoga (4 741 000 ton). Večji del je bil to lignit iz velenjskega rudnika, nekaj pa je bilo tudi premoga iz drugih slovenskih in jugoslovanskih rudnikov. Premog iz drugih premogovnikov je nekoliko boljši od lignita, a v povprečju se je pri sežigu 1 kilograma sprostito okoli 9,1 milijona joulov toplote. S sežigom premoga so dobili lani tako  $4,3 \cdot 10^{16}$  joulov ali skoraj natanko 12 000 GWh toplote.

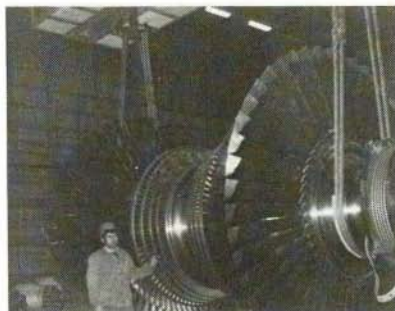
S širokimi potezami, ne da bi se spuščali v tehnične nianse, opišimo največjo, to je četrto enoto šoštanjske elektrarne.

Druge so ji precej podobne, le da so manjše.

Iz bližnjega rudnika dovaja lignit tekoči trak na veliko odlagališče, kamor odložijo tudi premog iz železniških vagonov. Tam nalagata velika nakladalna stroja premog na tekoča trakova, ki ga preneseta do bunkerjev ob kotlih (1 na sl.2). Od tam pride v mlino (2), ki ga sproti meljejo. Mešanico premogovega prahu in vročega zraka (3) vpihajo skozi gorilnike (4) v gorilno komoro (5), kjer premog zgori. Tok vročih dimnih plinov poganja velik ventilator (6) navzgor. Nekoliko ohlajene dimne pline vodita nato navzdol kanala (7) skozi grelnik svežega zraka (8). V električnem filtru (9) odložijo prah, nakar jih ventilator (10) odčrpa skozi 230 metrov visoki dimnik (11). Pepel odlagajo v rudniške ugreznine, nekaj pepela iz električnih filtrov pa porabijo za izdelavo zidakov.

Skoraj sto metrov visoki *kotel* (12) visi na štirih nosilnih stebrih. Ko se kotel segreje, se zaradi temperaturnega raztezanja raztegne za pol metra navzdol. Skupaj z ogrodjem in pomožnimi napravami tehta kotel 15 tisoč ton in vsebuje cevi s skupno dolžino več kot 350 tisoč metrov in skupno površino skoraj 45 tisoč kvadratnih metrov. Med cevmi je 35 tisoč zvarov.

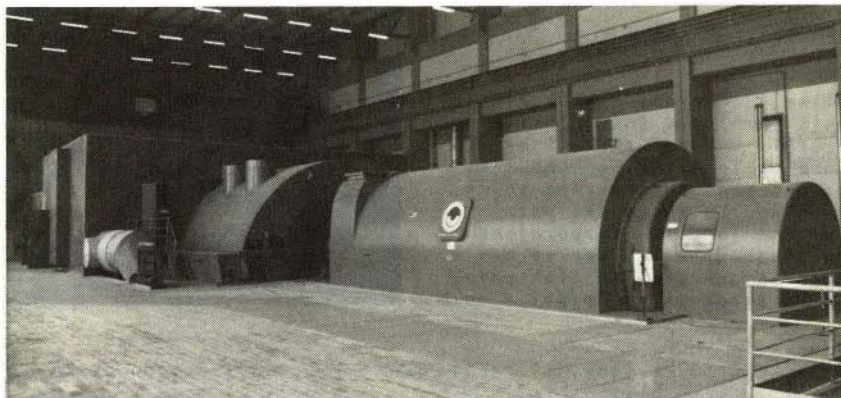
Slika 3 Montaža nizkotlačnega dela turbine v šoštanjski elektrarni. V parni turbini brizga para na lopatice, podobno kot brizga voda na lopatice vodne turbine, le da so pri parni turbini lopatice razporejene na poseben način, ker se manjšata temperatura in tlak pare, ko se razpenja in opravlja delo.



Orjaške črpalke (13), ki rabijo moč 6 MW, tlačijo vodo preko predgrelnikov (14) v kotel. Voda gre najprej v grelnik (15) na vrhu kotla in nato v uparjalnik (16). Nastala para pusti vodo v izločevalniku (17) in se v pregrevalniku (18) pregreje, tako da doseže pri tlaku 187 barov temperaturo  $545^{\circ}\text{C}$ . Pregreeta para - kotel je da več kot tisoč ton na uro - poganja visokotlačni del turbine (19). Nato se vrne v pregrevalnik (20) na pregrevanje in poganja še srednjetačni (21) in nizkotlačni (22) del turbine. Naposled odteče v kondenzator (23), v katerem se utekočini in ohladi na okoli  $32^{\circ}\text{C}$ . Črpalke jo potisnejo skozi predgrelnik (25) v napajalno posodo (26) in tako sklenejo krožno pot vode in pare.

Toploto, ki jo odda para, ko se utekočini in ohladi v kondenzatorju, prevzame voda v drugem, ločenem krogu. V njem potiskajo črpalke (27) vodo v hladilni stolp (28), v katerem se ohladi od okoli  $45^{\circ}\text{C}$  na okoli  $32^{\circ}\text{C}$  in se vrne v kondenzator. (Na ti temperaturi vpliva temperatura zunanjega zraka.) V hladilnem stolpu voda izhlapeva, ko curlja navzdol po kanalih in se razprši. To se dogaja v spodnjem delu stolpa; preostali del stolpa poskrbi, da se tok vlažnega zraka s kapljicami hitreje dviga (da stolp "vleče"). Izhlapelo vodo nadomestijo iz zajetja v bližnjem potoku, potem ko odstranijo iz nje raztopljeni apnenec in jo filtrirajo.





Slika 4 Parna turbina četrte enote v termoelektrarni Šoštanj z dinamostrojem za moč 335 MW. V hišici na levi sta visokotlačni in srednjetačni del turbine, nato sledita na skupni osi nizkotlačni del turbine in dinamostroj.

V hladilnem stolpu četrte enote izhlapi okoli 140 kilogramov vode v sekundi. Kilogramu vode je treba za izhlapevanje pri  $30^{\circ}\text{C}$  dovesti kaka 2,4 milijona joulov toplote (to je nekaj več, kot jo je treba dovesti za izparevanje pri  $100^{\circ}\text{C}$ ). Samo za izhlapevanje vode gre tedaj v sekundi okoli 340 milijonov joulov toplote. Upoštevati je treba še, da se zrak v hladilnem stolpu segreje. Tako odda četrta enota v sekundi 670 milijonov joulov toplote in 330 milijonov električnega dela, prejme pa okoli 1000 milijonov joulov toplote. Večino toplote prejme pri visoki temperaturi v kotlu in večino je odda pri nizki temperaturi v kondenzatorju. Naposled jo prevzame vlažni zrak, ki izhaja iz hladilnega stolpa. Nekaj prejete toplote, več kot desetina, gre v izgubo s prevajanjem v okolico in z vročimi plini v dimniku.

Omrežje ne prejme vsega električnega dela, ki ga oddaja dinamostroj, precej ga porabi elektrarna zase. Ta *lastna raba* gre za pogon mlinov za premog, črpalk za vodo, ventilatorjev in podobno. Pri računanju je treba povedati, katero dovedeno delo in katero dovedeno toploto imamo v mislih. Če upoštevamo električno delo na pragu omrežja in vso toploto, ki jo odda premog, je termoelektrarna Šoštanj kot celota v obliki dela oddala slabo tret-

jino dovedene toplote. Enote so se pri tem odrezale takole: prvi dve skupaj 27 %, tretja 31 % in četrta 33 %.

Izkoristimo obisk elektrarne za kratko razmišljanje o *toplotnih strojih*, na katerih "sloni naša civilizacija". To so poleg parne turbine in že zastarelega batnega parnega stroja še stroji na notranje zgorevanje: bencinski stroj in dieselski stroj. Že v času, ko so poznali samo parne stroje, se je poskušal dokopati do njihove teoretične osnove Sadi Carnot (sl.5). Svoje misli je objavil v knjižici *Razmišljanja o gibalni moči ognja in o strojih za izrabljanje te moči* leta 1824. Čeprav je šlo Carnotu bolj za izboljšanje delovanja parnih strojev kot za zakone narave, ga imajo nekateri za začetnika termodinamike.



Slika 5 Sadi Carnot (\*1796, Pariz - +1832, Pariz). S svojo knjižico je hotel predvsem opozoriti francosko gospodarstvo, ki je tedaj zaostajalo za angleškim, na prednosti parnega stroja. Umril je mlad v epidemiji kolere in po tedanji navadi so z njim pokopali večino njegovih rokopisov. Preostanek rokopisov je leta 1878 njegov brat izročil Francoski akademiji znanosti. Odlošek rokopisa iz leta 1825 kaže, da je S.Carnot tedaj že zavrgel misel o toploti kot snovi. Sodil je, da je toplota v zvezi z gibanjem molekul in je celo slutil energijski zakon (namigoval je na možnost poskusov, ki jih je pozneje naredil J.P.Joule). Vendar te njegove misli niso vplivale na nadaljnji razvoj. Njegovo knjižico so začeli prav ceniti šele po letu 1850. Zasluge za to ima William Thomson (lord Kelvin), ki je vpeljal absolutno temperaturo, zapisal izkoristek Carnotovega stroja in skupaj z Rudolfom Clausiusom postavil entropijski zakon.

Zamislil si je *idealni toplotni stroj*, ki odda v danih okoliščjih največ dela. Tak zamišljeni stroj, ki ga imenujemo danes po Carnotu, združuje glavne značilnosti vseh toplotnih strojev. Periodično ponavlja spremembo, za katero je značilno dvoje. Prvič: sprememba je *reverzibilna*, kar naj pomeni, da jo je mogoče takole obrniti: če pri prvotni spremembi stroju dovedemo toploto in odvedemo od njega delo, odvedemo pri obrnjeni spremembi prav tolikšno toploto in mu dovedemo prav tolikšno delo. Drugič: stroj prejema toploto samo pri višji temperaturi  $T_2$  in jo oddaja samo pri nižji temperaturi  $T_1$ .

Čeprav lahko stroj dela z različnimi snovmi, mislimo ta hip na vodo. V prvem koraku dovedemo vodi v kotlu toploto, da izpari pri temperaturi  $T_2$  pri konstantnem visokem tlaku. V drugem koraku se para razširi, ne da bi ji dovajali toploto in opravi delo. V tretjem koraku se para v kondenzatorju pri temperaturi  $T_1$  utekočini pri konstantnem nizkem tlaku in odda toploto. V četrtem koraku stisne črpalka vodo v kotel, ne da bi ji pri tem dovajali toploto. Tako spremembo iz štirih korakov - prvega izotermnega (pri konstantni temperaturi), drugega adiabatnega (brez dovajanja toplote), tretjega izotermnega in četrtega adiabatnega - imenujemo *Carnotova krožna sprememba*. Sprememba je *krožna*, ker je delovna snov po spremembi v enakem stanju kot pred njo. S. Carnot je pomislil na druge delovne snovi, tudi na zrak, in zaslugil ob tem možnost strojev na notranje zgorevanje.

S. Carnot je primerjal parni stroj z mlinskim kolesom. Voda z maso  $m$ , ki pade z višine  $z_2$  na višino  $z_1$ , odda v idealnem primeru kolesu kot delo spremembo potencialne energije:

$$-A = mg(z_2 - z_1)$$

Delo  $A$  je negativno, ker ga stroj odda. S. Carnot je privzel, da pri parnem stroju ustreza masi toplota  $Q$  in višini temperatura. V idealnem primeru odda tedaj stroj delo, ki je sorazmerno s prenešeno toploto in temperaturno razliko:

$$-A = konst. Q(T_2 - T_1) \quad (1)$$



Premislek je bil zanj dokaj naraven, saj je v njegovem času veljala toplota za neuničljivo snov - kalorikum. Toplota teče v naravi z mesta z višjo temperaturo na mesto z nižjo temperaturo in naj bi v stroju mimogrede oddala delo, kot ga odda voda, ki teče z večje višine k manjši.

S. Carnot je dokazal, da noben stroj v enakih okoliščinah, to je pri danih temperaturah  $T_2$  in  $T_1$  in toploti  $Q$ , ne more oddati več dela kot idealni toplotni stroj. Denimo, da tak stroj odda več dela  $A_0$ , ko mu dovedemo toploto  $Q$ . Povežimo ga z obrnjenim idealnim toplotnim strojem, ki mu dovajamo delo  $-A$  in ki odda toploto  $Q$ . Povezana stroja bi oddala razliko dela  $-(A_0 - A)$ , ne da bi jima dovajali toploto (ali delo). To pa bi bil perpetuum mobile, za katerega vemo, da je neuresničljiv.

Carnotovo enačbo (1) so podpirale obsežne eksperimentalne izkušnje. Načrtovalci strojev so namreč ugotovili, da toplotni stroj zares ne more oddajati dela, če je vsa okolišča pri enaki temperaturi, če je torej  $T_2 = T_1$ . To bi bil *izotermni toplotni stroj*. Zato pravzaprav ni presenetljivo, da nekateri Carnotovi sklepi veljajo še danes, čeprav S. Carnot ni vedel, da s toploto in z delom sistemi le izmenjujejo energijo in da velja energijski zakon (glej na primer Presek 9 (1981/82) str. 216). Po energijskem zakonu stroj, ki ponavlja krožno spremembo, to je sistem, katerega energija se ne spremeni, odda delo  $-A$ , če mu dovedemo toploto  $Q_2$  in odvedemo manjšo toploto  $Q_1$

$$-A = Q_2 - |Q_1| \quad (2)$$

Idealnemu toplotnemu stroju dovedemo tedaj pri temperaturi  $T_2$  toploto  $Q_2$  in odvedemo od njega pri temperaturi  $T_1$  toploto  $Q_1$ . Če bi stroj oddal tolikšno toploto, kot jo prejme, ne bi oddal nič dela.

Privoščimo si še nekoliko ugibanja. Ali lahko hkrati obveljata Carnotovo spoznanje, da je oddano delo sorazmerno s temperaturno razliko (1), in nasledek energijskega zakona (2)? Da, seveda, če postavimo, da je dovedena toplota sorazmerna z višjo temperaturo, pri kateri jo stroj prejme, in odvedena toplota z nižjo temperaturo, pri kateri jo odda:

$$Q_2 / |Q_1| = T_2 / T_1 \quad (3)$$

Tedaj je oddano delo

$$-A = Q_2(1 - T_1/T_2)$$

V enačbi (1) nastopa le temperaturna razlika in merimo lahko temperaturo v poljubni lestvici. Za zadnjo enačbo, v kateri se pojavi kvocient temperatur, pa to ne drži. Enačba velja le, če merimo temperaturo v *absolutni* ali *Kelvinovi lestvici*. Temperatura v tej lestvici dobimo, če temperaturi v Celzijevi lestvici prištejemo 273,15. Nova enota za temperaturo, kelvin K, je enako velika kot stopinja Celzija, le ničli sta v obeh lestvicah premaknjeni. 0°C ustreza 273,15 K, absolutni ničli 0 K pa -273,15°C. Pri naši natančnosti smemo računati kar z 273.

Enačbo za Carnotovo krožno spremembo (3) uporabimo za definicijo temperaturne lestvice. Dostaviti moramo le še dogovor, da je temperatura trojnega stanja vode, v katerem so v ravnovesju led, voda in vodna para 273,16 K. Ta *termodinamična definicija* je dandanes v veljavi.

Vpeljimo še *izkoristek toplotnega stroja* kot kvocient oddanega dela in dovedene toplote

$$\eta = -A/Q_2$$

*Izkoristek idealnega toplotnega stroja* ali Carnotovega stroja je tedaj

$$\eta_C = 1 - T_1/T_2$$

Tega izraza Carnot ni mogel zapisati, saj je mislil, da stroj odda prav tolikšno toploto, kot jo dobi, in še ni poznal absolutne temperaturne lestvice.

Izkoristek toplotnih strojev, ki so praktično v rabi, je nekako dvakrat manjši od  $\eta_C$ . Pri njih so namreč spremembe tako hitre, da niso reverzibilne, poleg tega prejme delovna snov del toplote pri temperaturah pod  $T_2$  in je del odda pri temperaturah nad  $T_1$ . S podatki za najvišjo temperaturo pare (v kotlu po vrsti 515, 530, 540 in 545°C) in za najnižjo temperaturo vode (v kondenzatorju 32°C) za štiri enote šoštanjske elektrarne bi dobili za izkoristek idealnega toplotnega stroja po vrsti 61,3%, 62,0%, 62,5% in 62,7%.

Nazadnje tvegajmo še kratek premislek. *Energijski zakon* ali *prvi zakon termodinamike* prepoveduje toplotni stroj, ki bi ponavljal krožno spremembo in oddajal delo, ne da bi mu dovajali delo ali toploto. To bi bil *perpetuum mobile prve vrste*. Zakon pa ne nasprotuje izotermnemu toplotnemu stroju, ki bi oddajal samo delo, ko bi mu dovajali toploto: kar postavimo v enačbo (2)  $Q_1 = 0$ . Za izkušnjami, da takega stroja ni mogoče uresničiti, se skriva nov zakon narave, ki je nad energijskim zakonom. To je *entropijski zakon* ali *drugi zakon termodinamike*.

V orjaški tovarni - naravi - sedi entropijski zakon na mestu direktorja, ki določa vrsto poslovanja in njegov potek. Energijski zakon ima samo vlogo knjigovodje, ki izravnava prejeme in izdatke.

Po J.Meixnerju, *Physikalische Blätter* 16 (1960) 506

Ta zakon prepoveduje izotermni toplotni stroj, ki mu pravimo tudi *perpetuum mobile druge vrste*. Kdaj drugič bi kazalo spregovoriti o tem zakonu naravnost, ne pa se vrteti okoli njega kot mačka okoli vrele kaše. Tedaj bi bilo treba skrbneje vpletati pojma *reverzibilnost* in *ireverzibilnost*. Za zdaj pa se zadovoljimo s spoznanjem, da toplotni stroj potrebuje temperaturno razliko in da mora poleg dela oddajati tudi toploto pri nižji temperaturi. To spoznanje smo zgradili na praktičnih izkušnjah, tudi na izkušnjah, ki smo jih dobili pri obisku elektrarne.

---

*Janez Strnad*

---

Zahvaljujem se dipl.inž.Marjanu Jerneju iz Termoelektrarne Šoštanj za vse podatke in pojasnila ter za fotografije,