

Sl. 2: Neizkoriščani turbini z generatorjema v strojnici.

Slednje je v najstrožji inačici tako ali tako mogoče v strojni stroki samo v opremljenih laboratorijih, kakršnih žal — z izjemo tehnološkega — nimamo na uporabo. Vzlic temu je bilo mnogo takega dela zasnovanega in opravljenega po novih in izvirnih načinih.

Spričo vseh teh okoliščin nas na oddelku leto za letom težko prizadevajo delitve investicijskih

kreditov, po katerih ostajamo praznih rok. Naj kot najbolj kričeč primer navedemo, da ima naša stavba deset let po otvoritvi še vedno zasilno leseno ograjo na stopnišču, med hodnikom in stopniščem pa sploh nič. V kaloričnem laboratoriju, ki obsega kotlarno s parnim kotlom (24 atn, 350° C, 1 t/h) in strojnico z dvema turbinama (skupaj 100 kW) ter tremi parnimi stroji leži neizkoriščeno veliko premoženje že 16 let! Takrat so bile namreč v inozemstvu nakupljene vse strojne naprave in instrumenti za popolno 100 kW toplarno. Takrat si pač ne bi bil nihče mislil, da za nabavo domače črne pločevine, kotnikov, cevi in drugega preprostega materiala ne bo denarja. Sliki 1 in 2 kažeta današnje stanje v kotlarni in strojnici. Upamo, da bo družbeno upravljanje uredilo tudi to zadevo.

H kraju bi bilo kazno omeniti, da se strojni oddelk živo zaveda svojih nalog in dolžnosti do skupnosti, med katerimi je prva vzgoja široko razgledanega in visoko kvalificiranega kadra strojne stroke. Za napredek, kakršen je v bodočnosti neogibno potreben, pa bo treba kakovost inženirjev še dvigniti. Tega pa ne bo mogoče doseči samo s skrbno sestavljenimi predavanji in tehtno izbranimi besedami. Razvoj materialnih sredstev te stroke bo moral imeti svoj odsev tudi v laboratorijih, ki jih bo treba stalno dopolnjevati, razširjati in izpopolnjevati, da bomo šli za naprednejšimi narodi vsaj v taki oddaljenosti, v kakršni smo danes.

Avtorja: prof. ing. Albert Struna in prof. ing. Leopold André, Oddelk za strojništvo Tehniške fakultete v Ljubljani.

DK 620 . 92 : 536 . 7

Vrednost in obračunavanje energije

Zoran Rant

Energija ima vrednost samo, kolikor se da prevajati iz ene svojih oblik v drugo. Kadar prehaja energija iz enega akumuliranega stanja v drugo, se pojavljajo bežne prehodne oblike energije, ki jih izkoriščamo v tehniške namene. Tako lahko s kinetično energijo nekega sistema dvignemo utež: v kinetični obliki akumulirana energija gibalnega sistema prehaja v potencialno akumulirano energijo dvignjene uteži; pri tem se bežno pojavlja posebna prehodna oblika energije: mehansko delo. Mehansko delo je posebno dragocena oblika energije. Druga dragocena oblika energije je energija električnega toka, elektroenergija. Pri prehodu notranje energije iz enega sistema v drugega zaradi temperaturne razlike se pojavlja toplota kot prehodna energija. Tudi toploto izkoriščamo v tehniške namene. Da se da energija prevajati iz ene oblike v drugo, je že dolgo znano; prav tako pa je tudi znano, da ta pretvorljivost ni neomejena: so oblike energije, ki se dajo prevajati v druge oblike popolnoma, so pa tudi take oblike energije, pri katerih je pretvarjanje v druge oblike omejeno. Tako se da

n. pr. vsaka vrsta energije popolnoma pretvoriti v notranjo energijo; notranja energija pa se pretvarja v mehansko delo le z določenimi omejitvami.

Jasno je, da so tiste vrste energije, ki so neomejeno pretvorljive v druge oblike, več vredne kakor pa vrste, katerih pretvorljivost je omejena ali je pa sploh ni. Čudno je le, da se te različne vrednosti energij pri njihovi uporabi le malo zavedamo in je pri obračunavanju sploh ne upoštevamo. Sicer pa je že skrajni čas, da se razčistijo pojmi na tem važnem področju.

Mehansko delo ali njemu ekvivalentna elektroenergija sta najbolj uporabljivi vrsti energije. Vrednost neke vrste energije lahko tedaj ocenjujemo po njeni pretvorljivosti v (mehansko) delo. Medtem ko se da večina znanih energij v celoti spreminjati v delo, tega ni mogoče doseči pri toploti niti pri notranji energiji.

Pri dobivanju dela iz toplote, ki jo črpamo iz toplotnega vira temperature T_1 , moramo del toplote oddati telesu ali sistemu, čigar temperatura je nižja od T_1 . Iz dane količine toplote do-

bimo največ dela, če izvajamo ves proces povračljivo in odvajamo toploto v sistem najnižje razpoložljive temperature. Najnižja temperatura, ki jo imamo na razpolago za take namene, je temperatura okolice T_0 . Največje delo, ki ga lahko pridobimo iz toplote Q , je tedaj:

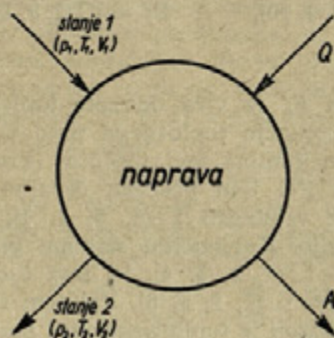
$$A_{max} = Q(T_t - T_0) : T_t \quad (1)$$

Ulomek $(T_t - T_0) : T_t$ imenujemo Carnotov faktor. Iz procesa odvajamo v okolico energijo

$$Q_0 = Q(T_0 : T_t)$$

Ta energija je brez vsake vrednosti, enako kakor je brez vrednosti tudi ostala notranja energija okolice. Zato tudi ne moremo v tem primeru govoriti o izgubah energije. Kar nima vrednosti, tudi ni izgubljeno.

Snovi, ki so nosilke energije, predelavamo v tehničnih napravah: v strojih ali tovarnah. Na sliki 1 je postopek pokazan shematično. Naprava



Sl. 1.

je lahko popolnoma poljubna, n. pr. samo turbo-generator ali pa tudi cela termoelektrarna s kotli, stroji itd. Tudi ni potrebno, da je njen namen dobivanje dela ali elektroenergije; lahko je kemični aparat ali pa cela kemična tovarna itd.

V to napravo vnesemo snov s stanjem 1 ($p_1, T_1, V_1 \dots$), v napravi snov predelamo in jo končno iznesemo s stanjem 2 ($p_2, T_2, V_2 \dots$). Pri tem smo iz procesa dobili delo A . Maksimalno delo dobimo, če je proces v celoti povračljiv in če snov izstopa v ravnotežju s stanjem okolice ($p_2 = p_0, T_2 = T_0$). Ker so med istimi končnimi stanji vsi povračljivi procesi energetično ekvivalentni, si lahko izberemo za računsko zasledovanje kateri koli povračljiv proces; seveda si bomo izbrali najenostavnejšega.

Z izentropno (adiabatno) ekspanzijo izenačimo temperaturo snovi s temperaturo okolice T_0 ; pri tem ostane entropija snovi nespremenjena. Sledi izotermna ekspanzija do tlaka okolice p_0 , pri čemer dovajamo iz okolice toploto Q . Entropija snovi naraste pri tem od S_1 na S_2 .

Napravimo bilanco energij okoli naprave:

vstopajo: notranja energija snovi U_1
 delo vnašanja snovi $p_1 V_1$
 toplota $Q = T_0(S_2 - S_1)$

izstopajo: notranja energija snovi U_2

delo iznašanja snovi $p_0 V_2$

dobljeno delo A_{max}

torej $U_1 + p_1 V_1 + T_0(S_2 - S_1) = U_2 + p_0 V_2 + A_{max}$

Upoštevamo, da je

$$U + pV = I \text{ (entalpija),}$$

in preuredimo; tako dobimo izraz, ki ga je prvi izvedel BOŠNJAKOVIČ:

$$A_{max} = I_1 - I_2 - T_0(S_1 - S_2) \quad (2)$$

Ponavljamo, da sta I_2 in S_2 entalpija in entropija snovi pri temperaturi in tlaku okolice.

Maksimalno delo, ki ga lahko dobimo iz neke energije, je prav gotovo zelo važna in imenitna veličina in zasluži svoje posebno ime. Beseda »energija« je izvedena iz dveh grških besed: $\dot{\epsilon}\nu = v$ in $\dot{\epsilon}\rho\gamma\upsilon\nu = \text{delo}$; pomeni torej »delo«, ki tiči »v« nekem sistemu. Delo, ki ga lahko dobimo »iz« (grško $\dot{\epsilon}\zeta$ ali $\dot{\epsilon}\xi$) tega sistema, je potemtakem »eksergija«. Maksimalno delo, ki ga lahko dobimo iz energije, bomo imenovali eksergijo E . Vsaki energiji pripada določena eksergija. Eksergija je tisti del energije, ki ima vrednost. Energija brez eksergije je brez vrednosti.

Za razne oblike energije obstajajo določila za izračunavanje ustrezne eksergije:

za toploto Q temperature T_t :

$$E_Q = Q(T_t - T_0) : T_t \quad (3)$$

za energijo, ki je vezana na snovi (materijo):

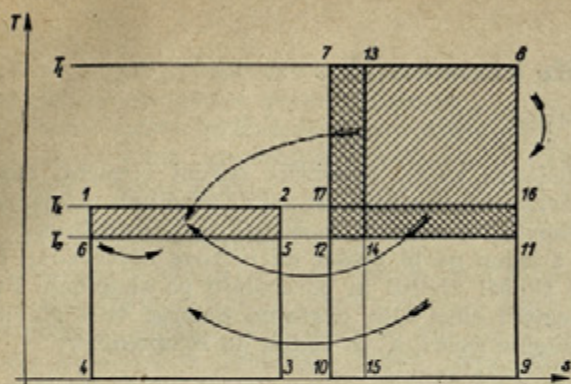
$$E_M = I_1 - I_2 - T_0(S_1 - S_2) \quad (4)$$

Za vse ostale znane oblike energije, n. pr. kinetično, potencialno, električno itd. je eksergija enaka energiji. Ni pa izključeno, čeprav je le malo verjetno, da obstajajo danes še neznane oblike energije, katerih eksergija bi se morala računati po drugih določilih.

Iz gornjih obrazcev vidimo, da je eksergija toplote enaka nič, kadar je toplota na temperaturi okolice. Prav tako je tudi eksergija neke snovi ali nekega sistema enaka nič, kadar je ta sistem v ravnotežju z okolico.

Eksergijo merimo z enakimi enotami kakor energijo (J, kcal, kWh...). Eksergija pa se bistveno razlikuje od energije po tem, da vsota vseh energij v zaključenem sistemu ni konstantna. Vsak nepovračljiv proces zmanjša eksergijo sistema. Eksergija torej ni »neuničljiva« kakor energija. Nasprotno: z njo moramo ravnati posebno previdno in razumno, da jo ohranimo. Najvažnejša naloga energetskega inženirja je, da čim manj zapravlja eksergijo. Zakaj vsaka izguba eksergije je dokončna in nepopravljiva.

O pomenu eksergije pri dobivanju dela smo se hitro prepričali. Toda, ali je eksergija res univerzalen kriterij za vrednost energije? Saj je nešteto primerov, kjer ne gre za dobivanje dela, marveč se energija uporabi za kurjenje ali pa za izvedbo kemičnih, metalurških in drugih procesov. V teh



Sl. 4.

gije. En del eksergije tega procesa bomo porabili za kurilni proces, enako kakor v prejšnjem primeru, ostala eksergija pa je poljubno na razpolago. Analogno sliki 3 bomo uporabili za pogon kurilnega procesa (toplotne črpalke) eksergijo $\square(7, 13, 14, 12)$. Preostala eksergija je enaka površini $\square(13, 8, 11, 14)$. Ni pa nikjer predpisano, da moramo za kurilni proces uporabljati ravno omenjeni del eksergije delovnega procesa; vsak drug poljubni del pravokotnika $\square(7, 8, 11, 12)$ bo opravljal enako delo, z edinim pogojem, da je njegova površina enaka $\square(1, 2, 5, 6)$. Zato tudi lahko vzamemo eksergijo, ki jo predstavlja pravokotnik $\square(17, 16, 11, 12)$. Tedaj je eksergija za preostale potrebe enaka $\square(7, 8, 16, 17) = \square(13, 8, 11, 14)$. Za kurilni proces porabljena eksergija $\square(17, 16, 11, 12)$ pa leži sedaj v diagramu popolnoma na istem mestu, kjer leži eksergija kurilne toplote $\square(1, 2, 5, 6)$ — ob enakih temperaturah in entropijskih razlikah. Energija, ki jo oddaja delovni proces v okolico $\square(12, 11, 9, 10)$, je enaka energiji, ki jo črpa kurilni proces iz okolice $\square(6, 5, 3, 4)$. Obe energiji sta brez eksergije.

Možno pa je delovni in kurilni proces tesneje povezati:

Toploto brez eksergije $\square(12, 11, 9, 10)$, ki bi jo morali odvajati iz delovnega procesa v okolico, prepustimo neposredno kurilnemu procesu. Tako dobiva kurilni proces energijo brez eksergije iz delovnega procesa in je ne črpa več iz okolice. Kurilni proces samo še dviga to toploto s toplotno črpalke na raven kurilne temperature T_k . V toplotni črpalci se dodaja toploti $\square(12, 11, 9, 10) = \square(6, 5, 3, 4)$ eksergija $\square(1, 2, 5, 6)$, ki je ne samo po velikosti, temveč tudi po legi enaka eksergiji iz delovnega procesa $\square(17, 16, 11, 12)$.

Vprašamo se, ali je sploh potrebno pretvarjati eksergijo $\square(17, 16, 11, 12)$ v delo in s tem delom gnati toplotno črpalke. Saj lahko pustimo to eksergijo kar pri toploti $\square(12, 11, 9, 10)$, ki jo odvajamo iz delovnega procesa, da bi ji pozneje dodali prav to isto eksergijo. Kurilni proces lahko neposredno izvajamo z energijo: $\square(12, 11, 9, 10) + \square(17, 16, 11, 12) = \square(17, 16, 9, 10) = \square(1, 2, 3, 4)$. Ovinek preko toplotne črpalke je v tem primeru nepotreben.

Tako se izognemo dvema transformacijama energije: dobivanju dela iz procesa (17, 16, 11, 12) in dovodu dela preko toplotne črpalke v proces (1, 6, 5, 2).

Tako smo prišli do kombiniranega procesa, v katerem dobivamo delo ali elektroenergijo in energijo za kurjenje. V proces vstopa energija $\square(7, 8, 9, 10)$ z eksergijo $\square(7, 8, 11, 12)$. Za proizvodnjo dela porabimo eksergijo $\square(7, 8, 16, 17)$, za kurjavo pa eksergijo $\square(16, 11, 12, 17)$.

Prav tak proces se izvaja v toplotnih napravah, v katerih iz pare visokih začetnih parametrov dobivamo elektroenergijo in paro nizkih parametrov za kurjavo.

V parni napravi s kondenzacijo se porabi vsa eksergija pare za dobivanje elektroenergije; v kombinirani napravi pa se porabi za elektroenergijo razlika eksergij vstopne in izstopne pare, eksergija izstopne pare pa se porabi za kurjavo. Ker se izkoristki kondenzacijskih in protitlačnih turbogeneratorjev bistveno ne razlikujejo, je tudi kakovost transformacije eksergije pare v elektroenergijo pri obeh vrstah strojev približno enaka: razmerje med porabljeno eksergijo in proizvedeno elektroenergijo je v obeh primerih praktično enako. Zmotno je torej splošno razširjeno naziranje, da se s kombinacijo proizvodnje elektroenergije in kurjave izboljša način proizvodnje elektroenergije.

Nasprotno pa se bistveno izboljšajo pogoji kurjave. Medtem ko imamo pri neposredni kurjavi (sl. 2) velike izgube zaradi nepovračljivosti, kar se pokaže v prekomerni porabi eksergije, je kombinirani proces glede tega enakovreden kurjenju s toplotno črpalke (sl. 3), kjer se teoretično lahko izključijo vse nepovračljivosti. Praktično pa ima kombinirani proces pred toplotno črpalke še veliko prednost, da izhaja v svojem kurilnem delu brez transformacij energij in zato tudi brez vseh dodatnih strojev in izgub, ki so zvezane s temi stroji.

Iz tega je treba tudi za obračunavanje energij povzeti naslednje neogibne zaključke:

Dosedanji način obračunavanja energij v kombiniranih obratih na podlagi porabljenih entalpij je načeloma nepravilen. Namesto njega se mora uvesti obračunavanje na podlagi porabljenih eksergij, ki je edino pravilno. Posledica tega bo zvišanje cene elektroenergije in znižanje cene kurilne energije, kar pa je tudi v skladu z vrednostjo teh dveh energij.

Viri:

Fr. Bošnjaković: Kampf den Nichtumkehrbarkeit, Archiv für Wärmewirtschaft, 1938, 1.

Fr. Bošnjaković: Nauka o toplini, Prvi i drugi dio, 1950.

Z. Rant: Energetska ocenitev postopka fabrikacije sode, 1951.

Avtor: prof. dr. ing. Zoran Rant, Oddelek za strojništvo Tehniške fakultete, Ljubljana.