

Sl. 2: Neizkoriščani turbini z generatorjema v strojnici.

Slednje je v najstrožji inačici tako ali tako mogoče v strojni stroki samo v opremljenih laboratorijskih, 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 leta za letom težko prizadevajo delitve investicijskih

kreditov, po katerih ostajamo praznih rok. Naj kot najbolj kričč 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 atm, 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. Slike 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 oddelek živo zaveda svojih nalog in dolžnosti do skupnosti, med katerimi je prva vzgoja široko razgledanega in visoko kvalificiranega kadra strojne stroke. Za napreddek, 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 laboratorijskih, 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 Andrej, Oddelek za strojnoštvo 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 dvigemo 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 toplota 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 uporabljeni vrsti energije. Vrednost neke vrste energije lahko tedaj ocenjujemo po njeni pretvorljivosti v (mehansko) delo. Medtem ko se da večina znanih energij v celoti spremenjati v delo, tega ni mogoče doseči pri toploti niti pri notranji energiji.

Pri dobivanju dela iz toplotne, ki jo črpamo iz toplotnega vira temperature T_1 , moramo del toplotne oddati telesu ali sistemu, čigar temperatura je nižja od T_1 . Iz dane količine toplotne 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_o . Največje delo, ki ga lahko pridobimo iz toplote Q , je tedaj:

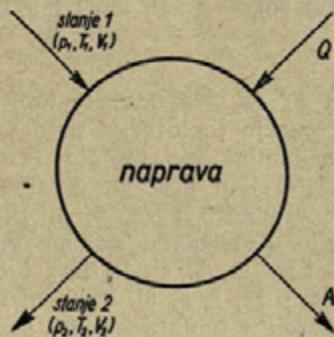
$$A_{max} = Q (T_t - T_o) : T_t \quad (1)$$

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

$$Q_o = Q (T_o : T_t)$$

Ta energija je brez vsake vrednosti, enako kar 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 turbogenerator ali pa tudi cela termoelektrarna s kotli, stroji itd. Tudi ni potrebno, da je njen namen dobivanje dela ali elektroenergije; lahko je kemičen 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 ($p_2 = p_o, T_2 = T_o$). 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 najenostavnnejšega.

Z izentropno (adiabatno) ekspanzijo izenačimo temperaturo snovi s temperaturo okolice T_o ; pri tem ostane entropija snovi nespremenjena. Sledi izotermna ekspanzija do tlaka okolice p_o , 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

$$Q = T_o (S_2 - S_1)$$

izstopajo: notranja energija snovi U_2
delo iznašanja snovi $p_o V_2$
dobljeno delo A_{max}

$$\text{torej } U_1 + p_1 V_1 + T_o (S_2 - S_1) = U_2 + p_o V_2 + A_{max}$$

Upoštevamo, da je

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

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

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

Ponavljamo, da sta I_1 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 zaslubi svoje posebno ime. Beseda »energija« je izvedena iz dveh grških besed: ϵ = v in γ = delo; pomeni torej »delo«, ki tiči »v« nekem sistemu. Delo, ki ga lahko dobimo »iz« (grško ϵ ali ξ) tega sistema, je potem takem eksnergija. Maksimalno delo, ki ga lahko dobimo iz energije, bomo imenovali eksnergijo E . Vsaki energiji pripada določena eksnergija. Eksnergija je tisti del energije, ki ima vrednost. Energija brez eksnergije je brez vrednosti.

Za razne oblike energije obstajajo določila za izračunanje ustrezne eksnergije:

za toploto Q temperature T_t :

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

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

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

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

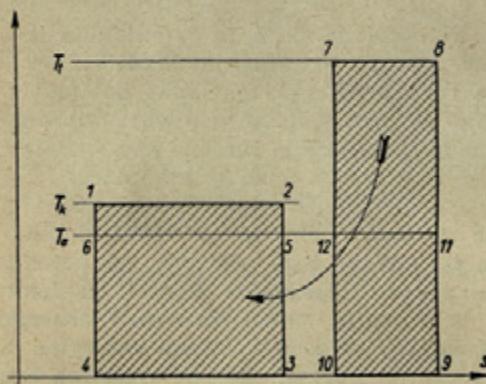
Iz gornjih obrazcev vidimo, da je eksnergija toplotne enake nič, kadar je toplota na temperaturi okolice. Prav tako je tudi eksnergija neke snovi ali nekega sistema enaka nič, kadar je ta sistem v ravnotežju z okolico.

Eksnergijo merimo z enakimi enotami kakor energijo (J, kcal, kWh...). Eksnergija pa se bistveno razlikuje od energije po tem, da vsota vseh energij v zaključenem sistemu ni konstantna. Vsek ne-povračljiv proces zmanjša eksnergijo sistema. Eksnergija 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 eksnergijo. Zakaj vsaka izguba eksnergie je dokončna in nepopravljiva.

O pomenu eksnergie pri dobivanju dela smo se hitro prepričali. Toda, ali je eksnergija 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

primerih ne želimo pretvarjati toploto ali notranjo energijo v delo. Na prvi pogled se zdi, da je v teh primerih kalorija, ki jo dobimo iz nekega vira toplotne, enakovredna kaloriji, ki jo dovajamo v kurjeni sistem. Zato ne bi bilo potrebno ocenjevati energije po ustreznih eksergijah. To pa ne drži, kakor bomo takoj videli.

V nekem sistemu, recimo kurjenem prostoru, potrebujemo določeno količino toplotne (Q_k) pri temperaturi T_k (sl. 2). V diagramu $T-s$ predstavlja to



Sl. 2.

toplotno površino pravokotnika (1, 2, 3, 4). Toplotna je na razpolago pri temperaturi T_t (n. pr. srednja temperatura dimnih plinov v peči), temperatura okolice pa je T_o . Najpreprostejši način kurjenja je neposreden odvzem toplotne iz topotnega vira in njen prenos na topotnega potrošnika. Pri tem načinu porabimo prav toliko topotne energije Q_t iz vira temperature T_t , kolikor je dovedemo v kurjeni sistem:

$$Q_t = Q_k$$

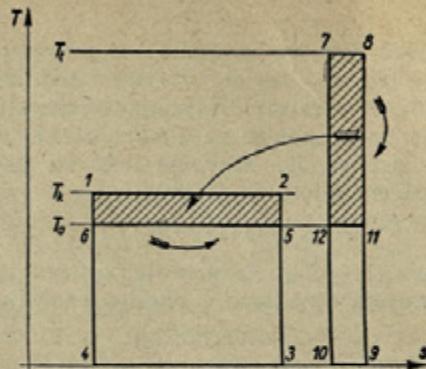
Na sliki 2 je Q_t enaka površini $\square(7, 8, 9, 10)$, ki je seveda enaka površini $\square(1, 2, 3, 4)$. Z »energetičnega« vidika ni nobenih izgub.

Kaj pa je z eksergijami? Toplotna Q_t ima eksergijo $E_t = Q_t (T_t - T_o) : T_t$; ta eksergija je enaka površini $\square(7, 8, 11, 12)$; kurična topota Q_k pa ima eksergijo $E_k = Q_k (T_k - T_o) : T_k$; $E_k = \square(1, 2, 5, 6)$; ker je $Q_k = Q_t$ in $T_k < T_t$, je tudi $E_k < E_t$. Pri tem procesu se je eksergija zmanjšala. Vzrok za izgubo eksergije je nepovračljiv prestop toplotne iz vira v sistem ob končni — in po navadi — veliki temperaturni razliki $T_t - T_k$; kjer pa imamo nepovračljivosti, tam kljub nasprotnjemu videzu tudi energetično ni vse v redu.

Način kurjenja lahko namreč bistveno poboljšamo takole (sl. 3):

Iz vira temperature T_t odvzamemo samo toliko toplotne Q'_t , da je njena eksergija E_t enaka eksergiji E_k kurične topote Q_k . Dobimo

$$Q'_t = Q_k \frac{T_k - T_o}{T_k} \cdot \frac{T_t}{T_t - T_o} \quad (5)$$



Sl. 3.

Ker je $(T_k - T_o) : T_k < (T_k - T_o) : T_t$
je tudi $Q'_t < Q_t$

Na sliki 3 je

$$\begin{aligned} Q_k &= \square(1, 2, 3, 4), & E_k &= \square(1, 2, 5, 6), \\ Q'_t &= \square(7, 8, 9, 10), & E'_t &= \square(7, 8, 11, 12), \\ E_k &= E'_t, \end{aligned}$$

Eksergijo E'_t iz vira odvzete toplotne Q'_t pretvorimo s pomočjo topotnega procesa v delo in s tem delom gonimo levi topotni (krožni) proces (1, 6, 5, 2). Pri tem procesu črpamo iz okolice toplotno brez vrednosti $\square(6, 5, 3, 4)$; ta topota nima eksergije. Kurjenemu sistemu pa dovajamo toplotno $Q_k = \square(1, 2, 3, 4)$, ki ima tudi potrebno eksergijo $E_k = \square(1, 2, 5, 6)$. Pri tem načinu kurjenja smo odvzeli iz topotnega vira manj energije, kakor je potrebujemo za kurjenje; pač pa je topotnemu viru odvzeta eksergija enaka porabljeni.

To je načelo topotne črpalke.

Iz tega pa izhaja tole:

Tudi za kurične in podobne procese je potrebna energija z eksergijo. Energija brez eksergije ni uporabljiva. Eksergijo za kurjenje lahko črpamo iz poljubnega vira in v poljubni obliki, n. pr. kot električno energijo iz hidrocentrale ali pa iz delovnega procesa med temperaturama T_t in T_o itd.

S pomočjo te eksergije si nabavimo iz okolice toliko nič vredne notranje energije, kolikor je še potrebujemo za kurjenje, in jo dvignemo na ustrezeno temperaturo T_k . Z eksergijo smo to nič vredno energijo oplemenitili.

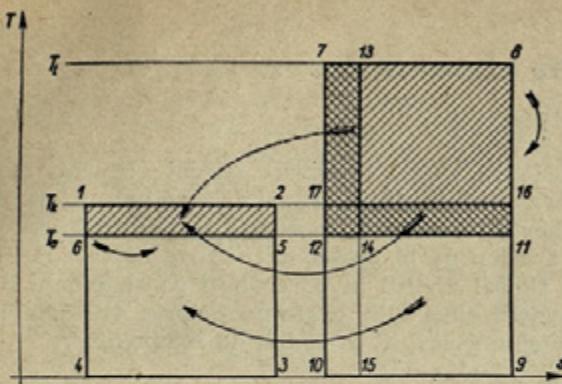
Tudi pri kuričnih in podobnih procesih je mera za vrednost energije njena eksergija.

Oglejmo si še tale primer (sl. 4)!

(1, 2, 3, 4) je naš že znani kurični proces. Razen njega izvajamo še topotni delovni proces (7, 8, 9, 10) med temperaturama T_t in T_o . Širina tega delovnega procesa je enaka širini kuričnega procesa

$$S_9 - S_{10} = S_3 - S_4$$

Delovni proces odvzema iz topotnega vira energijo, ki je enaka površini $\square(7, 8, 9, 10)$ in ima eksergijo $\square(7, 8, 11, 12)$. Iz procesa odvajamo energijo $\square(12, 11, 9, 10)$, ki nima nobene eks-



Sl. 4.

gije. En del eksnergije tega procesa bomo uporabili za kurilni proces, enako kakor v prejšnjem primeru, ostala eksnergija pa je poljubno na razpolago. Analogno sliki 3 bomo uporabili za pogon kurilnega procesa (toplote črpalk) eksnergijo $\square(7, 13, 14, 12)$. Preostala eksnergija je enaka površini $\square(13, 8, 11, 14)$. Ni pa nikjer predpisano, da moramo za kurilni proces uporabljati ravno omenjeni del eksnergije 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 eksnergijo, ki jo predstavlja pravokotnik $\square(17, 16, 11, 12)$. Tedaj je eksnergija za preostale potrebe enaka $\square(7, 8, 16, 17) = \square(13, 8, 11, 14)$. Za kurilni proces porabljeni eksnergiji $\square(17, 16, 11, 12)$ pa leži sedaj v diagramu popolnoma na istem mestu, kjer leži eksnergija kurilne toplotne $\square(1, 2, 5, 6)$ — 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 eksnergie.

Možno pa je delovni in kurilni proces tesneje povezati:

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

Vprašamo se, ali je sploh potrebno pretvarjati eksnergijo $\square(17, 16, 11, 12)$ v delo in s tem delom gnati toplotno črpalko. Saj lahko pustimo to eksnergijo kar pri toploti $\square(12, 11, 9, 10)$, ki jo odvajamo iz delovnega procesa, da bi ji pozneje dodali prav to isto eksnergijo. 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 dovođu 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 eksnergijo $\square(7, 8, 11, 12)$. Za proizvodnjo dela porabimo eksnergijo $\square(7, 8, 16, 17)$, za kurjavo pa eksnergijo $\square(16, 11, 12, 17)$.

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 eksnergija pare za dobivanje elektroenergije; v kombinirani napravi pa se porabi za elektroenergijo razlika eksnergij vstopne in izstopne pare, eksnergija izstopne pare pa se porabi za kurjavo. Ker se izkoristki kondenzacijskih in protitlačnih turbogeneratorjev bistveno ne razlikujejo, je tudi kakovost transformacije eksnergije pare v elektroenergijo pri obeh vrstah strojev približno enaka: razmerje med porabljenimi eksnergijami 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 eksnergije, je kombinirani proces glede tega enakovreden kurjenju s toplotno črpalko (sl. 3), kjer se teoretično lahko izključijo vse nepovračljivosti. Praktično pa ima kombinirani proces pred toplotno črpalko 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 eksnergij, 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.

Vir:

Fr. Bošnjaković: Kampf den Nichtumkehrbarkeiten, 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.