

# ODREĐIVANJE NAJNIŽE CIJENE PARE ZA PROIZVODNJU TOPLINSKE I ELEKTRIČNE ENERGIJE

Vedran U r a n, Rijeka

UDK 697.34:621.311.22  
STRUČNI ČLANAK

U radu je postavljen matematički model za određivanje najniže cijene pare po jedinici eksergije metodom optimizacije. Model se temelji na termoekonomskim parametrima kao što su cijena, troškovi, eksergetski protok pojedinih fluida energetskeg sustava, te cijena, troškovi i eksergetski stupanj djelovanja komponenti postrojenja energetskeg sustava ili samog postrojenja. Postavljeni matematički model testiran je na primjeru protutlačnog parnoturbinskog postrojenja pogonjenog drvnom biomasa. Rezultat ovog rada jest ustvrditi kompromis između najniže cijene pare kao produkta razmatranog sustava u ovisnosti o njegovim godišnjim troškovima pri određenom vremenu rada postrojenja tog istog razmatranog sustava u godini dana.

**Ključne riječi:** matematički model, najniža cijena pare, jedinica eksergije, termoekonomski parametri, cijena, troškovi, eksergetski protok, eksergetski stupanj djelovanja, komponente postrojenja, energetskeg sustav protutlačno parnoturbinsko postrojenje, drvena biomasa, godišnji troškovi, vrijeme rada postrojenja.

## 1. UVOD

Osnovna zadaća i interes energetskeg sustava jest proizvodnja toplinske i električne energije uz što manje pogonske troškove. Pri tome se očekuje da će energetske i eksergetski stupanj djelovanja tako dimenzioniranog sustava biti najmanji. Sustav može biti dimenzioniran i uz najveće energetske i eksergetske stupnjeve djelovanja, no tada se očekuje da će pogonski troškovi sustava biti najveći.

U red pogonskih troškova energetskeg sustava spadaju troškovi za gorivo, za kemikalije i za dodatnu napojnu vodu. U red fiksnih troškova energetskeg sustava spadaju troškovi za radnu snagu i amortizaciju sustava. Vrlo je važno odrediti i cijenu svježeg pare potrebnu za proizvodnju toplinske i električne energije. Ta se cijena određuje na temelju bilanci troškova koja uključuje cijene pojedinih struja fluida koje ulaze i izlaze iz energetskeg sustava, te cijenu komponenti koje čine taj sustav.

Bilancia troškova uključuje termoekonomsku analizu energetskeg sustava. To je analiza koja uključuje termodinamske parametre (eksergiju pojedinih struja fluida ili eksergetski protok ako je eksergija izražena po jedinici vremena) i ekonomske parametre (cijenu struja fluida). Da bi se odredila najniža cijena one struje fluida koja predstavlja produkt u energetskeg sustavu (a to je svježeg para), potrebno je primijeniti termoekonomsku optimizaciju sustava. Takva se opti-

mizacija zasniva na jednadžbama koje funkcionalno povezuju sve utjecajne faktore i uvjete ograničenja vezane za određivanje najniže cijene produkta energetskeg sustava (u daljnjem tekstu *najniža cijena pare*). Bitni ulazni parametri za određivanje najniže cijene pare kod energetskeg sustava su: eksergetski protok pare, eksergetski stupanj djelovanja energetskeg sustava i ukupne investicije za energetskeg sustav.

## 2. TERMODINAMSKA ANALIZA ENERGETSKOG SUSTAVA

Termodinamska analiza podrazumijeva prvi i drugi zakon termodinamike.

Prvi zakon termodinamike govori o održivosti i neuništivosti energije. Princip održanja energije dovodi do energetske bilance kojom je obuhvaćena promjena oblika energije u termodinamičkom sustavu i količine energije koje prelaze granicu sustava, u obliku mehaničke energije i topline. Termički stupanj djelovanja pokazuje koliki se dio dovedene topline pretvara u mehaničku što već upućuje na drugi zakon termodinamike.

Drugi zakon termodinamike govori o sposobnosti pretvorbe jednog oblika energije u drugi oblik energije te o ograničenjima pri pretvorbi toplinske energije sustava u mehaničku energiju. Iz toga slijedi da je eksergija energija koja se može neograničeno transformirati u

druge energetske oblike. Suprotna definicija eksergiji je anergija pa se može sljedeće napisati:

$$\begin{aligned} \text{Energija} &= \text{Eksergija} + \text{Anergija} \\ \text{Eksergija} &= \text{Korisna eksergija} + \text{Eksergetski gubitci} \end{aligned}$$

$$\text{Energija} = \text{Korisna eksergija} + \text{Eksergetski gubitci} + \text{Anergija}$$

Drugi zakon termodinamike izražava se kroz eksergetski stupanj djelovanja. Ako je  $\dot{E}_G$  eksergija goriva koja se po jedinici vremena (eksergetski protok goriva!) dovodi energetskom sustavu onda će on biti jednak

$$\dot{E}_G = \dot{E}_P + \dot{E}_V + \dot{E}_N \quad (\text{kW}) \quad (1)$$

gdje su redom

$\dot{E}_P$  – eksergetski protok produkta energetskog sustava (npr. svježe pare, ekspanzirane pare, plinova izgaranja itd.)

$\dot{E}_V$  – gubitak eksergetskog protoka goriva koji se pretvara u anergiju (izgubljena toplina zbog njezinog nepovratnog prijelaza u okolinu)

$\dot{E}_N$  – (neposredni) gubitak eksergetskog protoka goriva (nastalih npr. kod procesa izgaranja goriva u ložištu generatora pare).

Eksergetski stupanj djelovanja može se definirati na sljedeći način:

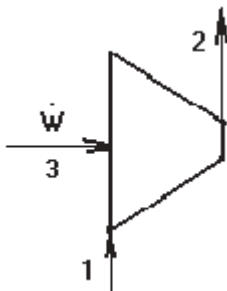
$$\frac{\dot{E}_P}{\dot{E}_G} = 1 - \frac{\dot{E}_V + \dot{E}_N}{\dot{E}_G} \quad (2)$$

### 3. TERMOEKONOMSKA ANALIZA KOMPONENTI ENERGETSKOG SUSTAVA

Cijena proizvedene toplinske i električne energije iskazuje se kroz cijenu eksergije pojedinih struja fluida koje ulaze i izlaze iz energetskog sustava. Ta se cijena određuje na temelju bilance troškova koja uključuje cijenu pojedinih struja fluida unutar energetskog sustava, cijene produkata i cijene komponenti energetskog sustava.

Tipične komponente energetskog sustava koje se javljaju bilo u parnom bilo u plinskom procesu su sljedeće: kompresor, crpka, turbina, izmjenjivač topline, jedinica miješanja tople i hladne struje fluida (toplinska miješalica), rasplinjač ili komora izgaranja, generator pare.

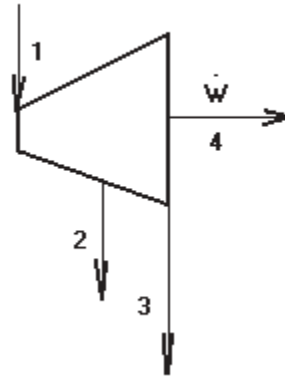
#### a) Kompresor (crpka, ventilator)



Slika 1. Shema kompresora (crpke, ventilatora)

Visina tekućih troškova<sup>1</sup> produkta iz kompresora (komprimirani zrak) prema slici 1. jednaka je  $\dot{C}_2 - \dot{C}_1$ . Visina tekućih troškova goriva za pokretanje kompresora (električna energija) jednak je  $\dot{C}_W$ . Pomoćnih termoekonomskih relacija nema. Određuje se cijena produkta (komprimiranog zraka) po jedinici njegove eksergije,  $c_2$ .

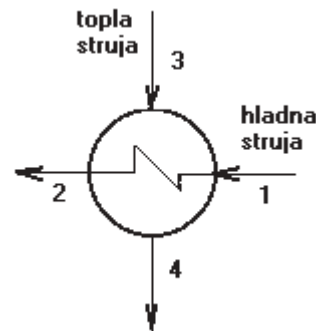
#### b) Turbina



Slika 2. Shema turbine s jednim oduzimanjem pare

Visina tekućih troškova produkta iz turbine (para, plinovi izgaranja) prema slici 2. jednaka je  $\dot{C}_W$ . Visina tekućih troškova goriva (svježa para, plinovi izgaranja) za proizvodnju električne energije jednaka je  $\dot{C}_1 - \dot{C}_2 - \dot{C}_3$ . Pomoćne termoekonomske relacije su ako se izjednače specifične cijene svih triju struja fluida 1, 2 i 3 (pare ili plinova izgaranja). Iz ove se bilance troškova izračunava specifična cijena električne snage po jedinici njezine energije,  $\dot{C}_W$ .

#### c) Izmjenjivač topline



Slika 3. Shema izmjenjivača topline u slučaju kad se grije hladna struja fluida

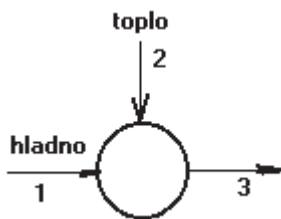
Visina tekućih troškova produkta iz izmjenjivača topline (ugrijana hladna struja fluida) prema slici 3. jednaka je  $\dot{C}_2 - \dot{C}_1$ . Visina tekućih troškova goriva (topla struja fluida koja se hladi) iznosi  $\dot{C}_3 - \dot{C}_4$ . Pomoćna termoekonomska relacija jest ako se izjednači specifična cijena tople struje ( $c_3$ ) sa specifičnom cijenom tople

<sup>1</sup> tekući troškovi – troškovi izraženi po jedinici vremena (kuna po sekundi)

struje koja je ohlađena zbog prijenosa topline na hladnu struju fluida ( $c_4$ ). Iz ove se bilance troškova izračunava specifična cijena zagrijane izlazne struje fluida ( $c_2$ ).

Drugi je slučaj zagrijavanje tople struje fluida putem hladne struje fluida pomoću izmjenjivača topline (kada je  $T_3 = T_{okoline}$ ). Tada je visina tekućih troškova produkta iz izmjenjivača topline (ugrijana topla struja fluida) jednaka  $C_4 - C_3$ . Visina tekućih troškova goriva (hladna struja fluida kojoj se odvodi toplota) iznosi  $C_1 - C_2$ . Pomoćna termoeekonomska relacija jest ako se izjednači specifična cijena hladne struje fluida ( $c_2$ ) sa specifičnom cijenom hladne struje kojoj je oduzet dio eksergije ( $c_1$ ). Iz ove se bilance troškova izračunava specifična cijena zagrijane tople struje fluida ( $c_4$ ).

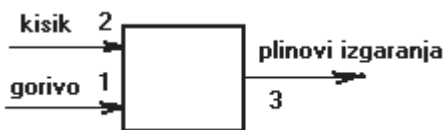
**d) Jedinica miješanja tople i hladne struje fluida (toplinska miješalica)**



Slika 4. Shema jedinice miješanja tople i hladne struje fluida (toplinska miješalica)

Visina tekućih troškova produkta iz miješalice (izmiješana struja fluida) prema slici 4. jednaka je  $C_3$ . Visina tekućih troškova za gorivo (hladna i topla struja fluida) iznosi  $C_1 + C_2$ . Pomoćnih termoekonomskih relacija nema. Iz ove se bilance troškova izračunava specifična cijena struje fluida koja je nastala miješanjem hladne i tople struje fluida ( $c_3$ ).

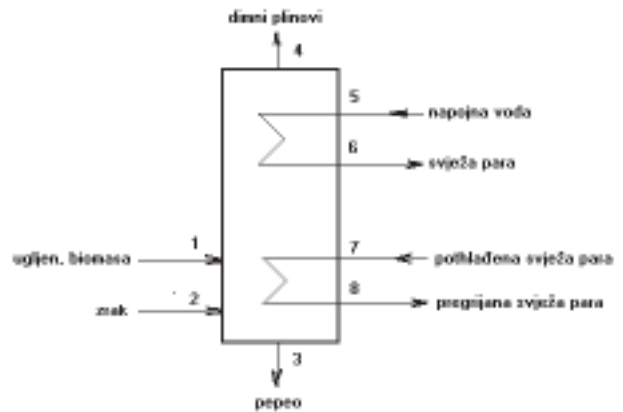
**e) Komora izgaranja ili rasplinjač**



Slika 5. Shema komore izgaranja ili rasplinjač

Visina tekućih troškova produkta iz komore izgaranja (plinovi izgaranja) prema slici 5. jednaka je  $C_3$ . Visina tekućih troškova za gorivo i zrak iznosi  $C_1 + C_2$ . Pomoćnih termoekonomskih relacija nema. Iz ove se bilance troškova izračunava specifična cijena plinova izgaranja,  $c_3$ .

**f) Generator pare**

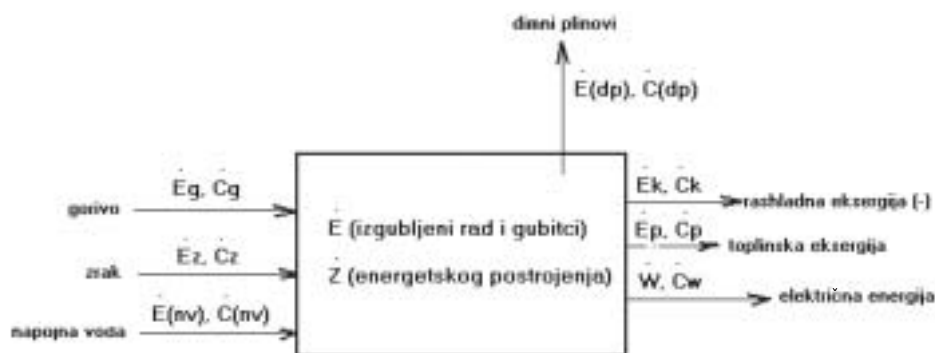


Slika 6. Shema generatora pare

Visina tekućih troškova za produkt (pregrijana svježa para) prema slici 6. jednaka je  $(C_6 - C_5) + (C_8 - C_7)$ . Visina tekućih troškova za gorivo (ugljen ili biomasa, zrak, napojna voda) iznosi  $(C_1 - C_2) - (C_3 - C_4)$ . Pomoćne termoeekonomske relacije temelje se na odnosima tekućih troškova napojne vode, svježe pare i pregrijane svježe pare s njihovim eksergetskim protocima,  $\frac{(C_6 - C_5)}{(E_6 - E_5)} = \frac{(C_8 - C_7)}{(E_8 - E_7)}$ . Iz ove se bilance troškova izračunava specifična cijena svježe pare ( $c_6$ ) ili specifična cijena pregrijane svježe pare ( $c_8$ ).

**4. TERMOEKONOMSKA ANALIZA ENERGETSKOG SUSTAVA ZA SUPROIZVODNJU TOPLINSKE I ELEKTRIČNE ENERGIJE**

Energetski sustav za suproizvodnju toplinske i električne energije promatrat će se iz aspekta crne kutije (black box).



Slika 7. Shema energetskog sustava za suproizvodnju toplinske i električne energije

Bilanca troškova energetskog sustava sa slike 7. glasi:

$$\dot{C}_g \dot{C}_z \dot{C}_{nv} \dot{Z}_{KP} \dot{C}_w \dot{C}_q \dot{C}_{dp} - \dot{C}_k \text{ (kn/s)} \quad (3a)$$

odakle proizlazi da je

$$\begin{aligned} c_g \dot{E}_g \quad c_z \dot{E}_z \quad c_{nv} \dot{E}_{nv} \quad Z_{kp} \\ c_w \dot{W} \quad c_p \dot{E}_p \quad c_{dp} \dot{E}_{dp} \quad c_k \dot{E}_k \text{ (kn/s)} \end{aligned} \quad (3b)$$

Uz pretpostavku da je

$$c_p \quad c_w \quad c_{nv} \text{ (radi pojednostavljenja) (kn/kJ)} \quad (3c)$$

$$\dot{E}_z = 0 \text{ (jer zrak u sustav ulazi} \\ \text{s temperaturom okoline) (kW)} \quad (3d)$$

slijedi da je cijena pare po jedinici eksergije

$$c_p \frac{c_g \dot{E}_g \quad \dot{Z}_{KP} \quad c_k \dot{E}_k - c_{dp} \dot{E}_{dp}}{\dot{W} \quad \dot{E}_p - \dot{E}_{nv}} \text{ (kn/kJ)} \quad (3e)$$

gdje  $\dot{Z}_{KP}$  predstavlja visinu tekućih troškova energetskog postrojenja za suproizvodnju toplinske i električne energije.

Eksergetski stupanj djelovanja ovakvog tipa energetskog sustava iznosi:

$$\frac{\dot{W} \quad \dot{E}_p - \dot{E}_k - \dot{E}_{dp}}{\dot{E}_g \quad \dot{E}_{nv}} \quad (4)$$

## 5. TERMOEKONOMSKI FAKTORI

Faktori bitni za termoekonomsku analizu i optimizaciju su:

a) faktor relativne cijene produkta i goriva za komponentu ili čitav energetski sustav

$$r = \frac{c_p - c_g}{c_g} \quad (5)$$

gdje je  $c_p$  specifična cijena produkta, a  $c_g$  specifična cijena goriva.

Prema [3] ovaj se faktor može pisati i u sljedećem obliku

$$r = \frac{1 - \frac{\dot{Z}}{c_g \dot{E}_p}}{\dot{E}_p} \quad (6)$$

b) termoekonomski faktor za n-tu komponentu sistema

$$f = \frac{\dot{Z}}{\dot{Z} \quad c_g (\dot{E}_v \quad \dot{E}_n)} \quad (7)$$

Ovaj se faktor upotrebljava radi utvrđivanja odnosa između troškova investicija za određeni energetski sustav i eksergetski stupanj djelovanja. Ukoliko je on visok tada je poželjno smanjiti troškove investiranja, i suprotno, tj. povećati eksergetski stupanj djelovanja.

## 6. TERMOEKONOMSKA OPTIMIZACIJA ODABRANIH SUSTAVA

### 6.1. Pretpostavke

Rezultate termoekonomske analize odabranih sustava moguće je privesti optimumu ukoliko se u obzir uzmu sljedeće pretpostavke:

a) Eksergetski protok produkta  $\dot{E}_p$  i specifična cijena goriva  $c_g$  ostaju konstantni.

b) Za pojedini odabrani sustav očekuje se da će mu se visina ukupnih troškova kapitalnog investiranja  $TKI$  povećavati eksponencijalno s povećanjem njegovog eksergetskog stupnja djelovanja  $\epsilon$  te mase produkta i njegovog eksergetskog protoka,  $\dot{m}_p, \dot{E}_p$ . Može se stoga sljedeće pretpostaviti

$$TKI = B \left( \frac{\dot{E}_p}{1 - \epsilon} \right)^n \dot{E}_p^m \text{ (kn)} \quad (8)$$

gdje su  $B, n, m$  konstante koje se određuju na temelju poznatih realnih cijena odabranih sustava istoga tipa a različitog eksergetskog stupnja djelovanja  $\epsilon$  i eksergetskog protoka produkta  $\dot{E}_p$ .

c) Visina ukupnih tekućih troškova  $\dot{Z}$  za odabrani energetski sustav jednak je zbroju tekućih troškova za komponente tog sustava  $\dot{Z}^K$  i tekućih troškova za njegov pogon i održavanje  $\dot{Z}^{PO}$  tj.

$$\dot{Z} = \dot{Z}^K + \dot{Z}^{PO} \text{ (kn/s)} \quad (9)$$

Ekonomska analiza odabranog sustava pojednostavljuje se ukoliko se izbjegnu složeni oblici financiranja, utjecaj inflacije, poreza, osiguranja i vremena za izgradnju, transport, montažu, ispitivanje i puštanja sustava u rad. Pri tome se visina ukupnih troškova kapitalnih investicija množe s faktorom povratka kapitala  $\beta$ , pa je

$$\dot{Z}^K = (TKI) \text{ (kn/s)} \quad (10)$$

Tekući troškovi za pogon i održavanje odabranog sustava računaju se prema izrazu

$$\dot{Z}^{PO} = \gamma (TKI) \text{ (kn/s)} \quad (11)$$

gdje je  $\gamma = 0.1$  kod industrijskih energetskih sustava. [3]

Uvrštavanjem izraza (10) i (11) u izraz (9) slijedi

$$\dot{Z} = \frac{TKI}{1 - \gamma} \text{ (kn/s)} \quad (12)$$

Uvrštavanjem izraza (8) u izraz (12) slijedi da je

$$\dot{Z} = \frac{B \left( \frac{\dot{E}_p}{1 - \epsilon} \right)^n \dot{E}_p^m}{1 - \gamma} \text{ (kn/s)} \quad (13)$$

### 6.2. Određivanje optimalnog ekonomski-eksergetskog stupnja djelovanja

Za odabrani sustav moguće je napisati sljedeće

$$c_p \dot{E}_p \quad c_g \dot{E}_g \quad \dot{Z} \text{ (kn/s)} \quad (14a)$$

gdje je  $c_p$  cijena produkta (pare) za odabrani sustav, a  $c_g$  cijena goriva, sve izraženo po jedinici eksergije. Dijeljenjem čitavog izraza (14a) sa  $\dot{E}_p$  dobiva se

$$c_p \quad c_g \frac{\dot{E}_g}{\dot{E}_p} \quad \frac{\dot{Z}}{\dot{E}_p} \text{ (kn/kJ)} \quad (14b)$$

<sup>2</sup> faktor povratka kapitala  $\beta$  – faktor kojim se određuju jednake količine posuđenog novca po anuitetu  $A$ , tj. po jednakim serijama transakcija novaca u  $n$  godina ( $n \tau 1$ ), i to prema sadašnjoj vrijednosti novaca  $P$ . Pri tome je vrlo važno odrediti efektivnu kamatnu stopu  $i_{eff}$ . U proračunima će se uzimati da je faktor povratka kapitala jednak 0,26.

Putem izraza  $\frac{\dot{E}_p}{\dot{E}_g}$  i izraza (13) moguće je napisati sljedeću jednadžbu

$$c_p f( ) \frac{c_g}{\dot{E}_p^{1-m}} \frac{B}{1-}^n \text{ (kn/kJ)} \quad (14c)$$

Najniža cijena pare dobiva se difrenciranjem jednadžbe (14c) te svođenjem njene prve derivacije na nulu, tj.

$$\frac{dc_p}{d} = 0.$$

Rezultat derivirane jednadžbe (14c) daje veličinu optimalnog ekonomski-eksergetskog stupnja djelovanja izraženog na sljedeći način

$$F^{OPT} = \frac{1}{1 - F} \quad (15)$$

gdje je

$$F = \frac{Bn}{c_p \dot{E}_p^{1-m}} \quad (16)$$

Najniža cijena pare  $c_{p,min}$  dobiva se ako se  $F^{OPT}$  uvrsti u jednadžbu (34c)

$$c_{p,min} = f^{OPT} \frac{c_g}{\dot{E}_p^{1-m}} \frac{B}{1 - F^{OPT}}^n \text{ (kn/kJ)} \quad (17)$$

Izraz (15) može se napisati i u obliku

$$F = \frac{1 - F^{OPT}}{F^{OPT}} \quad (18a)$$

ili u kombinaciji s izrazom (2)

$$F = \frac{\dot{E}_V \dot{E}_N}{\dot{E}_p} \quad (18b)$$

Nadalje slijedi da je

$$\dot{E}_V \dot{E}_N^{OPT} \dot{E}_p F \dot{E}_p \frac{1 - F^{OPT}}{F^{OPT}} \text{ (kW)} \quad (19)$$

Izraz (14c) može se izraziti i u formi sa  $\dot{E}_V \dot{E}_N$  kao

$$c_p f \frac{\dot{E}_V \dot{E}_N}{\dot{E}_p} \frac{B}{\dot{E}_p^{1-m}} \frac{\dot{E}_p}{\dot{E}_V \dot{E}_N} \text{ kn/kJ} \quad (20)$$

Diferenciranjem jednadžbe (20) i svođenjem derivacije na nulu, tj.

$$\frac{dc_p}{d \dot{E}_V \dot{E}_N} = 0,$$

slijedi da je

$$n \frac{c_g \dot{E}_V \dot{E}_N^{OPT}}{\dot{Z}^{OPT}} \quad (21)$$

S jednadžbama (19) i (21) proizlazi da je

$$\dot{Z}^{OPT} = c_g \dot{E}_p \frac{F}{n} \text{ (kn/s)} \quad (22)$$

$$r^{OPT} = \frac{n}{n} F \quad (23)$$

$$f^{OPT} = \frac{1}{1 - n} \quad (24)$$

gdje su redom

$\dot{Z}^{OPT}$  – optimalni ukupni tekući troškovi za odabrani energetska sustav

$r^{OPT}$  – optimalni faktor relativne cijene pare i goriva za odabrani energetska sustav

$f^{OPT}$  – optimalni termoeekonomski faktor za odabrani energetska sustav.

### 7. ODREĐIVANJE KONSTANTI B, n, m

Za određivanje konstanti B, n i m nužno je poznavati sljedeće:

- ukupnu cijenu energetskog sustava s cijenama njegovih komponenti;
- pogonske parametre energetskog sustava koji bi trebali biti jednaki za najmanje tri varijante energetskog sustava koji se između sebe razlikuju po ukupnoj cijeni i izlaznoj električnoj ili toplinskoj snazi.

Tablica 1. Podaci potrebni za izračunavanje konstanti B, n, m

Električna snaga postrojenja W, kW	1000	5000	10000
Kapacitet generator apare $\dot{m}_p$ , kg/s	2,22	11,1	22,2
Masa goriva $\dot{m}_g \frac{\dot{m}_p(h_{izl} - h_{NV})}{H_d}$ , kg/s	0,5	2,42	4,74
Eksergetski protok goriva $\dot{E}_G$ , kW	7229	34 990	68 533
Eksergetski protok pare na izlazu iz turbine $\dot{E}_p \dot{m}_p (h_p - h_0 - T_0 (s_p - s_0))$ , kW	1052	5261	10 523
Eksergetski stupanj djelovanja $\frac{\dot{E}_p W}{\dot{E}_G}$	0,284	0,293	0,3
Cijena energetskog sustava TKI, kn	20,000.000	50,000.000	90,000.000

$$\begin{array}{l} 20000000 \quad B \frac{0,284}{1-0,284} \quad 1052^m \\ 50000000 \quad B \frac{0,293}{1-0,293} \quad 5261^m \\ 90000000 \quad B \frac{0,3}{1-0,3} \quad 10523^m \end{array} \rightarrow \mathbf{B = 134\ 730\ 539; n = 5,8; m = 0,488}$$

U tablici 1. dani su podaci potrebni za izračunavanje konstanti  $B$ ,  $n$  i  $m$  na primjeru protutlačnog parnoturbinskog postrojenja u varijantama različitih izlaznih električnih snaga od 1MW, 5MW i 10MW. Postrojenje je pogonjeno drvnom biomasom donje ogrjevnice moći  $H_d = 15\,300$  kJ/kg [4]. Iskoristivost generatora pare je  $\eta = 0,85$ .

Zajednički podaci za protutlačno parnoturbinsko postrojenje u trima različitim varijantama po izlaznoj električnoj snazi su:

- parametri svježje pare (tlak/temperatura) : 4 MPa/ 450°C
- entalpija svježje pare  $h_{izl} = 3329$  kJ/kg i njena entropija  $s_{izl} = 6,933$  kJ/kg K
- parametri pare na izlazu iz parnoturbinskog agregata (tlak/temperatura) : 0,05 MPa/ 115°C
- entalpija pare na izlazu iz turbine  $h_p = 2710$  kJ/kg i njena entropija  $s_p = 7,77$  kJ/kg K
- entalpija napojne vode  $h_{NV} = 420$  kJ/kg i njena entropija  $s_{NV} = 1,4$  kJ/kg K.

## 8. UTJECAJ POGONSKIH PARAMETARA ENERGETSKOG SUSTAVA NA ODREĐIVANJE NAJNIŽE CIJENE PARE

Parametri koji mogu utjecati na određivanje najniže cijene pare su: eksergetski protok pare, vrijeme rada energetskog postrojenja u godini i cijena goriva. Kod promjene eksergetskog protoka pare može se utjecati sljedećim parametrima: entalpijom i entropijom pare, tj. njenim tlakom i temperaturom te masenim protokom pare.

Da bi mogli mijenjati različite pogonske parametre pare na izlazu iz protutlačnog parnog turboagregata, navode se sljedeći podatci:

1. masa raspoloživog drvnog ostatka:  $\dot{m}_g = 1,5$  kg/s ;
2. donja ogrjevna moć drvnog ostatka:  $H_d = 15\,300$  kJ/kg ;
3. iskoristivost generatora pare:  $\eta = 0,85$  ;
4. cijena drvnog ostatka:  $c_g = 1,96 \cdot 10^{-6}$  kn/kJ [5] ;
5. vrijeme rada postrojenja u godini:  $\tau = 5700$  h/god ;
6. entalpija svježje pare na izlazu iz generatora pare  $h_{izl}$  kao i entalpija napojne vode  $h_{NV}$  preuzete su iz prethodnog poglavlja ;
7. proizvodnja svježje pare:

$$\dot{m}_p \frac{\dot{m}_g H_d}{h_{izl} - h_{NV}} = 6,7 \text{ kg/s } (\approx 25 \text{ t/h}).$$

Na dijagramu 1. prikazana je krivulja ovisnosti najniže cijene pare (izražene po jedinici eksergije!) na izlazu iz parnoturbinskog agregata o promjeni njenog eksergetskog toka. Krivulja je određena uvrštavanjem poznatih vrijednosti u jednažbe (16) i (17). Pri tome treba imati na umu da maseni protok pare uvijek iznosi 6,7 kg/s. Mijenjaju se samo pogonski parametri pare koja ek-

spandira u protutlačnom parnoturbinskom agregatu. U tablici 2. se navodi nekoliko primjera pogonskih parametara pare.

**Tablica 2. Primjeri pogonskih parametara pare na izlazu iz parnoturbinskog agregata radi određivanja najniže cijene pare**

Tlak pare $p$ , bar	Temperatura pare $T$ , °C	Entalpija pare $h$ , kJ/kg	Entropija pare $s$ , kJ/kgK	Eksergetski protok pare $\dot{E}_p$ , kW	Najniža cijena pare $c_{p, \min}$ , kn/GJ
0,4	120	2723	7,899	3012	14,55
0,4	160	2799	7,981	4067	14,50
0,5	120	2722	7,795	3206	14,525
0,5	140	2761	7,890	3284	14,528
0,6	140	2760	7,804	3444	14,515
0,6	160	2799	7,895	3530	14,511

Iz tablice 2. dade se zaključiti da se niže cijene pare na izlazu iz parnoturbinskog agregata postižu kod njegovih viših pogonskih parametara, osobito viših temperatura.

## 9. UTJECAJ GODIŠNJEG RADA ENERGETSKOG POSTROJENJA NA ODREĐIVANJE NAJNIŽE CIJENE PARE

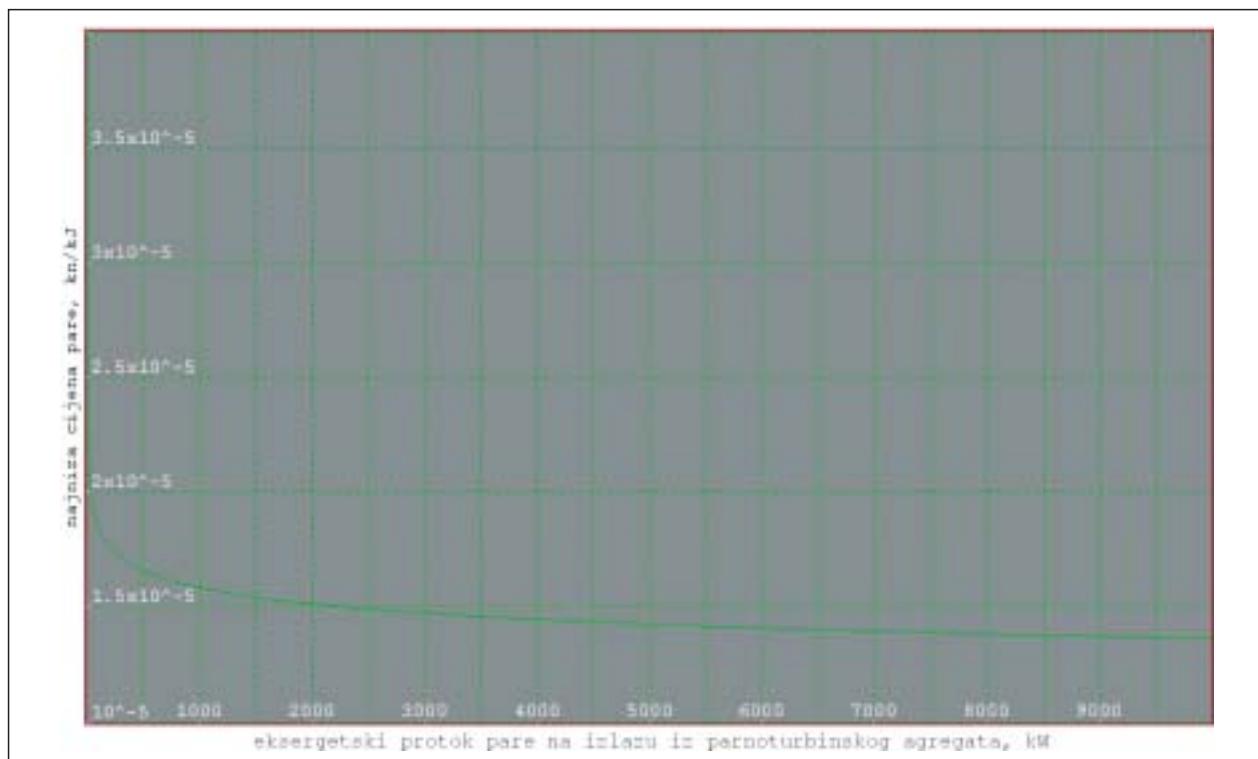
Za određivanje najnižih cijena pare na izlazu iz parnoturbinskog agregata u ovisnosti o njegovom radu u godini dana, potrebno je odrediti sljedeće nepromjenjive parametre:

1. masa raspoloživog drvnog ostatka:  $\dot{m}_g = 1,5$  kg/s ;
2. donja ogrjevna moć drvnog ostatka:  $H_d = 15\,300$  kJ/kg ;
3. iskoristivost generatora pare:  $\eta = 0,85$  ;
4. cijena drvnog ostatka:  $c_g = 1,96 \cdot 10^{-6}$  kn/kJ [5] ;
5. parametri svježje pare (tlak/temperatura) : 4 MPa/ 450°C ;
6. entalpija svježje pare  $h_{izl} = 3329$  kJ/kg i njena entropija  $s_{izl} = 6,933$  kJ/kg K ;
7. parametri pare na izlazu iz parnoturbinskog agregata (tlak/temperatura) : 0,05 MPa/ 115°C ;
8. entalpija pare na izlazu iz turbine  $h_p = 2710$  kJ/kg i njena entropija  $s_p = 7,77$  kJ/kg K ;
9. entalpija napojne vode  $h_{nv} = 420$  kJ/kg i njena entropija  $s_{NV} = 1,4$  kJ/kg K ;
10. proizvodnja svježje pare:

$$\dot{m}_p \frac{\dot{m}_g H_d}{h_{izl} - h_{NV}} = 6,7 \text{ kg/s } (\approx 25 \text{ t/h})$$

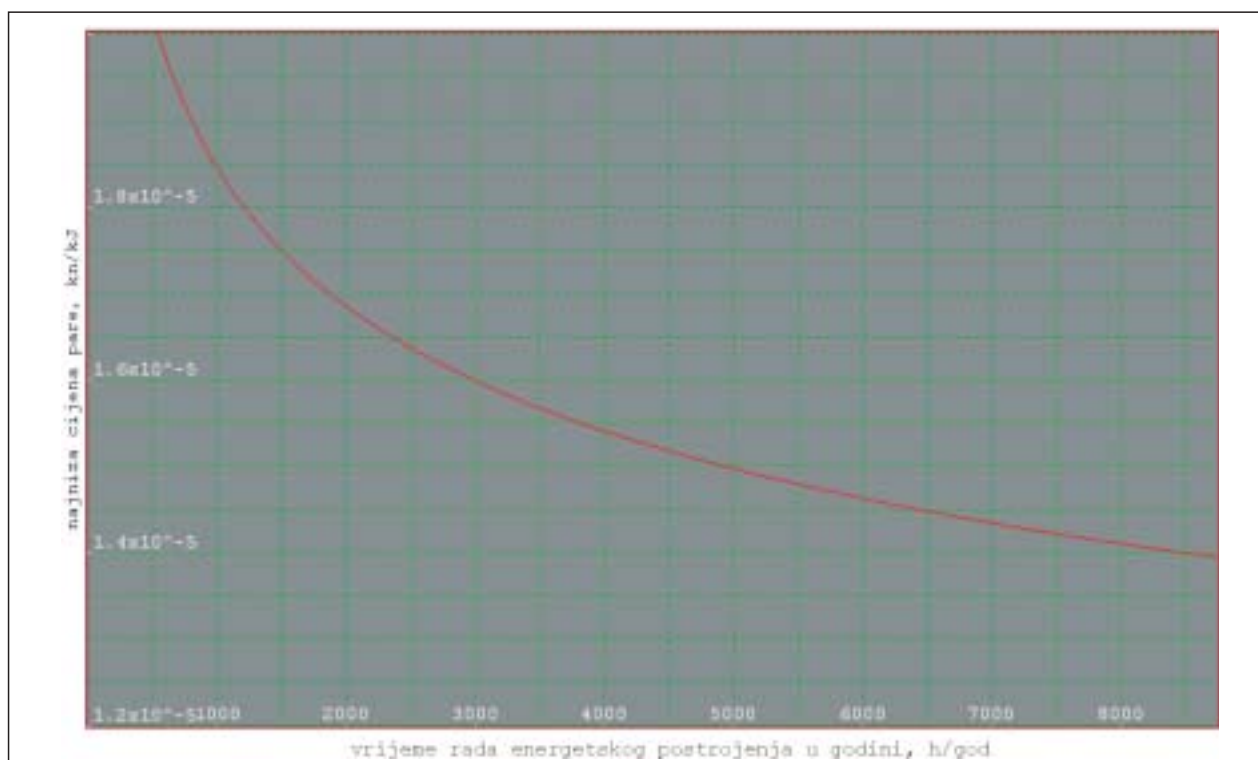
11. eksergetski protok pare:

$$\dot{E}_p \dot{m}_p h_p - h_0 - T_0 s_p - s_0 = 3174 \text{ kW}.$$



Dijagram 1. Ovisnost najniže cijene pare na izlazu iz parnoturbinskog agregata o njenom eksergetskom protoku

Prema dijagramu 1. proizlazi da (što) je eksergetski protok pare na izlazu iz parnoturbinskog postrojenja veći, što je njezina cijena po jedinici eksergije manja.



Dijagram 2. Ovisnost najniže cijene pare na izlazu iz parnoturbinskog agregata o radu energetskog postrojenja u godini

Iz dijagrama 2. može se zaključiti sljedeće: što je postrojenje duže u radnom pogonu tijekom godine, to je cijena pare niža.

Dijagram 2. prikazuje ovisnost najniže cijene pare na izlazu iz parnoturbinskog agregata u ovisnosti o radu energetskog postrojenja u godini. Krivulja je dobivena na temelju uvrštavanja poznatih vrijednosti parametara u izraz (17). Vrijeme se mijenja u rasponu od 0 sati do 8760 sati (toliko sati sadrži jedna godina).

#### 10. UTJECAJ POGONSKIH PARAMETARA PARE NA ODREĐIVANJE GODIŠNJIH TROŠKOVA ZA ENERGETSKI SUSTAV

Godišnji troškovi za energetski sustav određuju se na temelju izraza (22). Ti se troškovi mogu mijenjati s obzirom na promjenu pogonskih parametara pare na izlazu iz parnoturbinskog agregata, na promjenu cijene goriva te na vrijeme rada energetskog postrojenja u godini.

Ako uzmemo u obzir samo utjecaj pogonskih parametara pare na određivanje godišnjih troškova za energetski sustav, tada su sljedeći parametri konstantni:

1. masa raspoloživog drvnog ostatka:  $\dot{m}_g = 1,5 \text{ kg/s}$  ;

2. donja ogrjevna moć drvnog ostatka:

$$H_d = 15\,300 \text{ kJ/kg} ;$$

3. iskoristivost generatora pare:  $\eta = 0,85$  ;

4. cijena drvnog ostatka:  $c_g = 1,96 \cdot 10^{-6} \text{ kn/kJ}$  [5] ;

5. vrijeme rada postrojenja u godini:  $\tau = 5700 \text{ h/god}$  ;

6. entalpija svježe pare  $h_{izl} = 3329 \text{ kJ/kg}$  i njena entropija  $s_{izl} = 6,933 \text{ kJ/kg K}$  ;

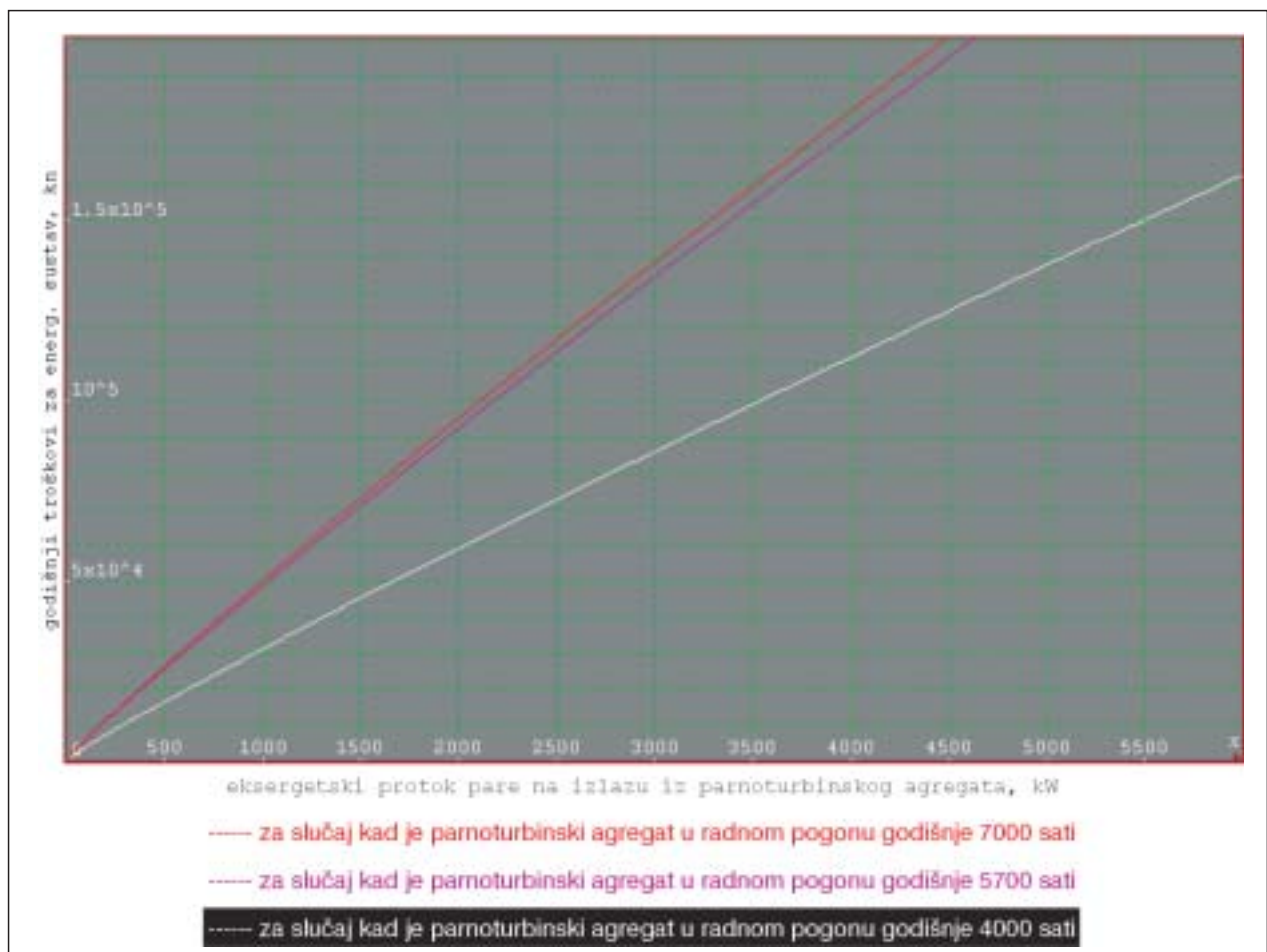
7. entalpija napojne vode  $h_{NV} = 420 \text{ kJ/kg}$  i njena entropija  $s_{NV} = 1,4 \text{ kJ/kg K}$  ;

8. proizvodnja svježe pare:

$$\dot{m}_p \frac{\dot{m}_g H_d}{h_{izl} - h_{NV}} = 6,7 \text{ kg/s} (\approx 25 \text{ t/h}).$$

Dijagram 3. prikazuje ovisnost godišnjih troškova za energetskih sustav o pogonskim parametrima pare na izlazu iz parnoturbinskog postrojenja.

Sljedeća zakonitost koja proizlazi iz različitih krivulja jest: **što je energetsko postrojenje više u radnom pogonu godišnje, to su i godišnji troškovi za energetski sustav veći.**



Dijagram 3. Ovisnost godišnjih troškova za energetski sustav o eksergetskom protoku pare na izlazu iz parnoturbinskog agregata

Dijagram 3. prikazuje zakonitost povećanja godišnjih troškova za energetski sustav prema određenim parametrima usporedo s povećanjem eksergetskog protoka pare na izlazu iz parnoturbinskog postrojenja.



## 11. UTJECAJ GODIŠNJIH TROŠKOVA ZA ENERGETSKI SUSTAV NA ODREĐIVANJE NAJNIŽE CIJENE PARE

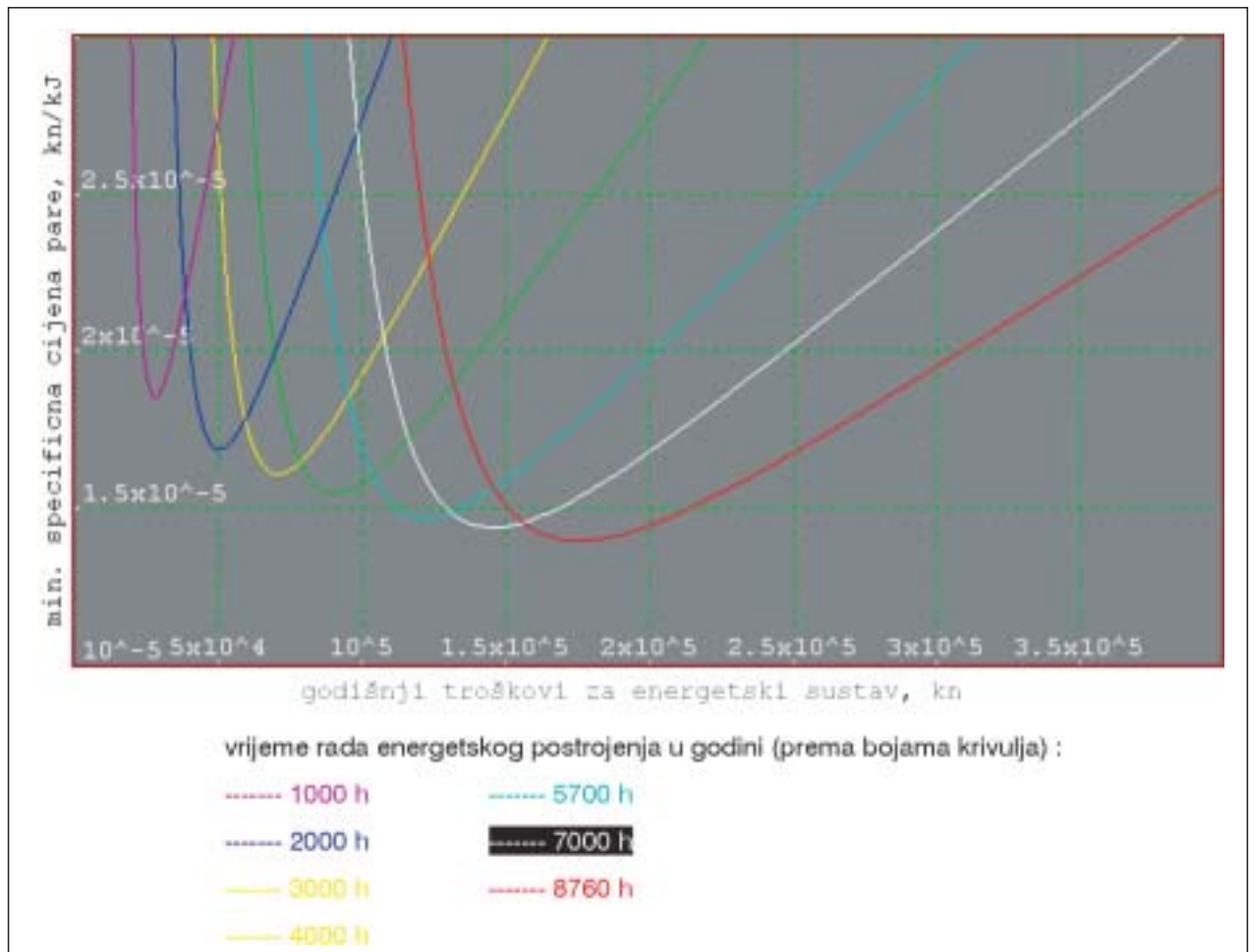
Troškovi za energetski sustav odnose se na troškove amortizacije postrojenja, troškove goriva, te troškove za pogon i održavanje sustava. Na dijagramu 4. prikazana je ovisnost najniže specifične cijene pare na izlazu iz parnoturbinskog agregata o godišnjim troškovima za energetski sustav s nekoliko različitih sati pogonskog rada energetskog postrojenja u godini.

2. eksergijski protok pare na izlazu iz parnoturbinskog agregata

(pogonski parametri pare: 0.05 MPa/115°C):

$$\dot{E}_p \dot{m}_p h_p - h_0 - T_0 (s_p - s_0) = 3174 \text{ kW.}$$

Krivulje s različitim vremenima rada energetskog postrojenja u godini predstavljaju kompromis između onih godišnjih troškova za energetski sustav kod kojih je moguće postići najnižu cijenu pare u mreži najnižih cijena pare po jedinici eksergije. Iz dijagrama se može zaključiti da se najpovoljniji kompromis između nave-



Dijagram 4. Ovisnost najniže cijene pare po jedinici eksergije ili minimalne specifične cijene pare na izlazu iz parnoturbinskog agregata o godišnjim troškovima za energetski sustav

Na dijagramu 4. prikazano je nekoliko krivulja koje su rezultat uvrštavanja izraza (22) u izraz (17):

$$c_{p,\min} = c_g \left[ 1 + \frac{n \dot{Z}^{OPT}}{c_g \dot{E}_p} \right] \frac{3600}{n \dot{Z}^{OPT}} \quad (25)$$

$$\frac{B}{\dot{E}_p^{1-m}} = \frac{c_g \dot{E}_p}{n \dot{Z}^{OPT}} \frac{3600}{n \dot{Z}^{OPT}}$$

unutar kojeg su uvršteni sljedeći nepromjenjivi parametri:

1. cijena drvnog ostatka:  $c_g = 1,96 \cdot 10^{-6} \text{ kn/kJ}$  [5];

denih relacija «godišnji troškovi – najniža cijena pare» postiže kad je energetsko postrojenje u radnom pogonu 5700 sati u godini. Povoljan je kompromis i kod rada postrojenja od 3000 sati u godini.

## 12. ZAKLJUČAK

U radu je postavljen matematički model za određivanje optimalnog ekonomski-eksergetskog stupnja djelovanja putem kojeg se može odrediti najniža cijena produkta. Taj model primjenjiv je, kako za kompo-

nente energetskog sustava, tako i za sam sustav (metoda *crna kutija!*).

Nakon kratkog objašnjenja o vezi između prvog i drugog zakona termodinamike dana je termoeкономска analiza tipičnih komponenti za energetski sustav na bazi plinskog i parnog procesa kao i termoeкономска analiza energetskog sustava za suproizvodnju toplinske i električne energije.

Dobiveni matematički model primijenjen je na protutlačnom parnoturbinskom postrojenju pogonjenom drvnom biomasom, s određenim pogonskim parametrima i njegovom realnom cijenom. Na temelju tih podataka i trima danim varijantama takovog postrojenja istih pogonskih parametara, a različitih izlaznih električnih i toplinskih snaga određene su konstante  $B$ ,  $n$ ,  $m$ . Te konstante ovise o cijeni koštanja, eksergetskom protoku produkta (pare) i eksergetskom stupnju djelovanja razmatranog energetskog sustava.

Uvrštavanjem poznatih izraza u matematički model za izračunavanje najniže cijene pare razvijena je mreža najnižih cijena pare na izlazu iz parnoturbinskog agregata, i to u ovisnosti o eksergetskom protoku pare te u ovisnosti o vremenu rada energetskog postrojenja sustava u godini. Nakon toga je razvijen dijagram u kojem godišnji ukupni troškovi sustava ovise o eksergetskom protoku pare za slučaj različitog vremena rada energetskog postrojenja u godini.

Na kraju je prikazan dijagram krivulja za različito vrijeme rada postrojenja energetskog sustava u godini, i to u ovisnosti najniže cijene pare o ukupnim godišnjim troškovima promatranog energetskog sustava. Pri tome se tražilo ono vrijeme rada razmatranog postrojenja energetskog sustava u godinu dana u kojem se ostvaruje što povoljniji kompromis između ukupnih godišnjih troškova za energetski sustav te najniže cijene pare za suproizvodnju toplinske i električne energije.

## LITERATURA

- [1] H. POŽAR: "Osnove energetike 1", Školska knjiga, Zagreb, 1992.
- [2] Z. PRELEC: "Energetika u procesnoj industriji", Školska knjiga, Zagreb, 1994.
- [3] A. BEJAN, G. TSATSARONIS, M. MORAN: "Thermal design and optimization", A Wiley-Interscience Publication, New York, USA, 1996.
- [4] B. KRAUT: "Strojarski priručnik", Tehnička knjiga, Zagreb, 1976., str. 193.
- [5] *GROWING POWER* – "Advanced solutions for bio-energy technology from Finland", pp 13, Found in <http://www.tekes.fi>
- [6] K. RAŽNJEVIĆ: "Termodinamičke tablice", Školska knjiga, Zagreb, 1975.
- [7] V. URAN: "Optimizacija industrijskih energana s kogeneracijskim sustavom proizvodnje energije", Seminarski rad, Tehnički fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka, 2002.
- [8] L. KRNIĆ, Z. ŠIKIĆ: "Račun, diferencijalni i integralni", I. Dio, Školska knjiga, Zagreb, 1992.

### DETERMINATION OF LOWEST STEAM PRICE FOR HEAT AND ELECTRIC ENERGY PRODUCTION

In the work a mathematical model for the lowest steam price determination by exergy unit using optimisation method has been given. The model is based on thermal-economic parameters such as price, costs, exergy flow of certain fluids of the energy system, as well as price, costs, exergy efficiency degree of energy system components or the system itself. The model has been tested on a condensed steam-turbine facility using wooden biomass as a fuel. The result of this work is a compromise between the lowest steam price as a product of the system observed depending on its annual costs, for a certain period of operation of the same system observed during a year.

### DIE BESTIMMUNG DES NIEDRIGSTEM DAMPPREISES FÜR DIE STROM- UND WÄRMEERZEUGUNG

Innerhalb des Artikels ist ein die Optimierungsmethode nützendes Modell aufgebaut, mit welchem der Dampfpreis je Exergieeinheit bestimmt wird. Das Modell beruht auf numerischen wärmewirtschaftlichen Kennzeichen wie Preis, Kosten, exergetischer Durchfluss einzelner Medien des energetischen Systems, sowie Preis, Kosten, exergetischer Wirkungsgrad der Bestandteile dieses Systems, oder einer seiner Anlagen.

Das aufgestellte mathematische Modell ist am Beispiel einer mit Holzbiomasse betriebenen Gegendruckdampfturbinenanlage getestet. Das Ergebnis dieser Arbeit ist der festgestellte Kompromiß zwischen dem niedrigsten Preis des Erzeugnisses des beobachteten Systems, also des Dampfes, und seiner Jahreskosten bei bestimmter Jahresbetriebszeit desselben Systems.

Naslov pisca:

**Vedran Uran, dipl. ing.**  
**"CASE" d.o.o.**  
**Šetalište XIII. divizije 28**  
**51000 Rijeka, Hrvatska**

Uredništvo primilo rukopis:  
 2002 – 12 – 10.