

OPTIMIZACIJA SUSTAVA ZA ZAJEDNIČKU PROIZVODNJU TOPLINSKE I ELEKTRIČNE ENERGIJE U DRVNOJ INDUSTRIJI¹

Mr. sc. Vedran U r a n, Zagreb

UDK 697.34:621.311
IZVORNI ZNANSTVENI CLANAK

Sektor drvene industrije u gospodarstvu Hrvatske predstavlja jednu od strateških izvoznih grana. Cijena i troškovi energije značajno utječu na konkurentnost proizvoda pojedinih drveno-prerađivačkih tvrtki. Na osnovi analize potrošnje toplinske i električne energije u drvanoj industriji te navođenja pretpostavki i uvjeta, postavljen je matematički model za toplinsko-ekonomsku optimizaciju sustava za zajedničku proizvodnju toplinske i električne energije koristeći drvenu biomasu kao pogonsko gorivo. Tim se matematičkim modelom određuje najniža toplinska snaga pri kojoj zajednička proizvodnja toplinske i električne energije postaje isplativija u odnosu na odvojenu proizvodnju. Isplativost ulaganja u sustav zajedničke proizvodnje toplinske i električne energije utvrđuje se na osnovi vremena povratka kapitala kao veličini koja ovisi o vrijednostima toplinske snage. Primjena matematičkog modela prikazana je na primjeru drveno-prerađivačke tvrtke u Hrvatskoj. Osjetljivost postavljenog matematičkog modela ispitana je promjenom vrijednosti pojedinih veličina koje utječu na isplativost ulaganja u sustav za zajedničku proizvodnju toplinske i električne energije. Pri kraju rada uslijedila je diskusija i izrada zaključka.

Ključne riječi: drvena industrija, drvena biomasa, zajednička proizvodnja toplinske i električne energije, optimizacija.

POPIS VELIČINA

Q , kW	toplinska snaga
τ_q , h/god	vrijeme opterećenja potrošača toplinske energije
τ_w , h/god	vrijeme opterećenja potrošača električne energije
TKI , kn	troškovi kapitalnih investicija
i , %	kamatna stopa
N , god	ugovoreno razdoblje trajanja ugovora
T , kn/god	godišnji troškovi
c_w , kn/kWh	cijena električne energije
c_q , kn/kWh	cijena toplinske energije
χ , -	odnos između mehaničke (električne) snage i toplinske snage
U , kn/god	godišnje uštede
n , god	vrijeme povratka kapitala
h_{sp} , kJ/kg	entalpija svježe pare
h_p , kJ/kg	entalpija ispušne pare/pare pri tlaku oduzimanja
h_k , kJ/kg	entalpija zasićene pare
h'_{sp} , h'_p , h'_k , kJ/kg	entalpija kondenzata
h_m , kJ/kg	entalpija napojne vode
H_{dt} , kJ/kg	donja ogrjevna vrijednost goriva
η_{gt} , %	iskoristivost generatora topline
η_t , %	unutarnji stupanj korisnosti turbine
q , kg/kJ (t/MWh)	količina drvene biomase po jedinici (predane) topline
K_v , kg/kJ	količina (rashladne) vode po jedinici (odvedene) topline
c_v , kn/kg	cijena vode za ukapljivanje pare
c_g , kn/kJ (kn/GJ)	cijena goriva (drvene biomase)
c_{est} , kn/kWh	cijena električne energije kupljene od elektro-distributera
c_{ot} , kn/kWh	cijena električne energije koju otkupljuje elektro-distributer

1. UVOD

Drvo se u pogonima drveno-prerađivačkih tvrtki prerađuje na različite načine. U tim pogonima kao popratni produkt nastaju određene količine drvene biomase. Drveno-prerađivačke tvrtke, u najvećem broju slučajeva, koriste tu drvenu biomasu kao pogonsko gorivo za proizvodnju topline namijenjene tehnologiji te grijanju pogona i prostorija. Sa nešto ili znatno većom količinom drvene biomase moguće je, sa stajališta drveno-prerađivačkih tvrtki, pored vlastite toplinske energije proizvesti i vlastitu električnu energiju. U tom će slučaju investicijski troškovi za sustav zajedničke proizvodnje toplinske i električne energije biti veći, ali isplativiji kroz određeno vrijeme i kod određene toplinske snage u odnosu na sustav odvojene proizvodnje toplinske i električne energije. Takva toplinska snaga u ovom radu predstavlja najnižu toplinsku snagu.

Odvojena proizvodnja toplinske i električne energije podrazumijeva toplinsku energiju proizvedenu u generatoru topline (nosilac topline može biti topla voda, vrela voda ili para) i električnu energiju kupljenu od elektro-distributera. Zajednička proizvodnja toplinske i električne energije odnosi se na proizvodnju tih oblika ener-

¹ Ovaj izvorni znanstveni članak predstavlja skraćenu verziju magistarskog rada "Optimiranje sustava za kombiniranu proizvodnju toplinske i električne energije u drvanoj industriji" kojeg je na Tehničkom fakultetu u Rijeci u siječnju 2004. godine obranio autor ovog članka.

gije u sljedećim tipovima energetskih postrojenja: protutlačnom parnoturbinskom postrojenju i kondenzacijskom parnoturbinskom postrojenju sa jednim reguliranim ili nereguliranim oduzimanjem pare.

Nekolicina autora probleme oblikovanja i usavršavanja procesa u energetskim sustavima rješavaju eksergetsko-ekonomskom analizom i optimizacijom uz primjenu 2. zakona termodinamike. Tim zakonom autori iz [1 – 5] pronalaze postupke reduciranja eksergetskih gubitaka koji stvaraju dodatne troškove. Da bi se ti troškovi smanjili, nužno je sniziti cijenu struje tvari izražene po jedinici eksergije na najnižu moguću vrijednost [1, 2].

U ovom će se radu primjenom 1. zakona termodinamike umjesto najnižeg eksergetskog toka (ili eksergije po jedinici vremena) [1] određivati najniža toplinska snaga (jer je u praksi češće primjenjivana veličina). S tom je svrhom postavljen matematički model za toplinsko-ekonomsku optimizaciju proizvodnje toplinske i električne energije. Tome prethodi analiza potrošnje toplinske i električne energije u drvenoj industriji uz navođenje pretpostavki i uvjeta [6].

Za dobivanje najniže toplinske snage potrebno je odrediti vrijeme povratka kapitala uloženog u određeni tip energetskog postrojenja koje će kao veličina ovisiti o toplinskoj snazi tog istog postrojenja. Prethodno će biti definirani popratni troškovi za i prihodi od proizvodnje toplinske i električne energije kao i njihove cijene.

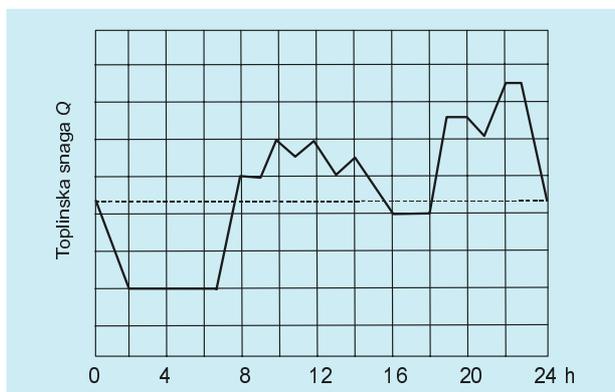
Primjena matematičkog modela za toplinsko-ekonomsku optimizaciju prikazat će se na primjeru energetskog sustava drveno-prerađivačke tvrtke DI "Spačva" iz Vinokovaca. U obzir je uzet utjecaj promjene vrijednosti pojedinih veličina na isplativost ulaganja u sustav za zajedničku proizvodnju toplinske i električne energije. Pri kraju rada uslijedila je diskusija te izrada zaključka.

2. TOPLINSKO-EKONOMSKA ANALIZA I OPTIMIZACIJA

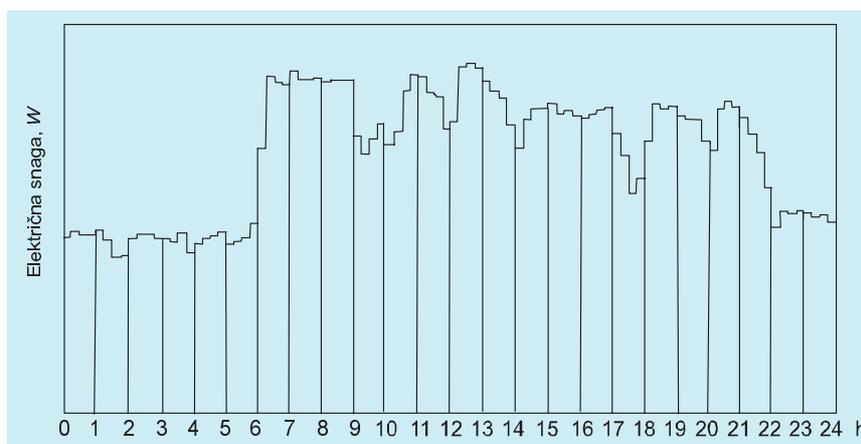
2.1. Analiza potrošnje toplinske i električne energije u drvenoj industriji

U proizvodnim procesima prerade drva istodobno se troši toplinska i električna energija. Raspodjelom potrošača topline prati se potrošnja toplinske energije, dok se raspodjelom potrošača električne energije prati potrošnja električne energije. Svrha praćenja potrošnje energije jest određivanje satne, dnevne i mjesečne potrošnje toplinske i električne energije izradom odgovarajućih dijagrama. Tipični dijagram dnevne potrošnje topline prikazan je na slici 1, dok je na slici 2 prikazan tipični dijagram dnevne potrošnje električne energije.

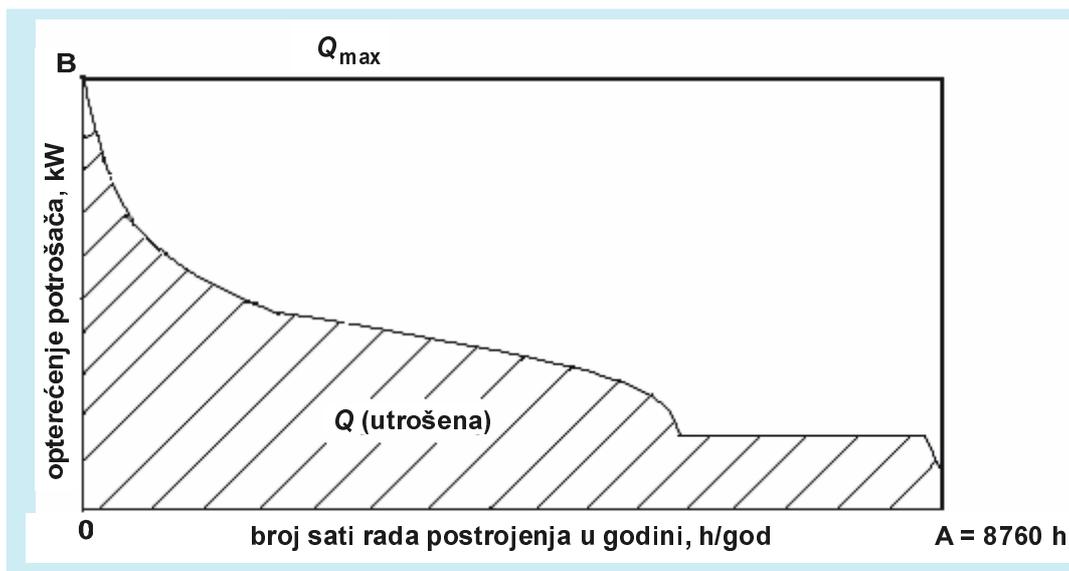
Na temelju satnog, dnevnog i mjesečnog dijagrama izrađuje se uređeni dijagram opterećenja posebno za toplinsku energiju, a posebno za električnu energiju, prikazanih redom na slikama 3 i 4.



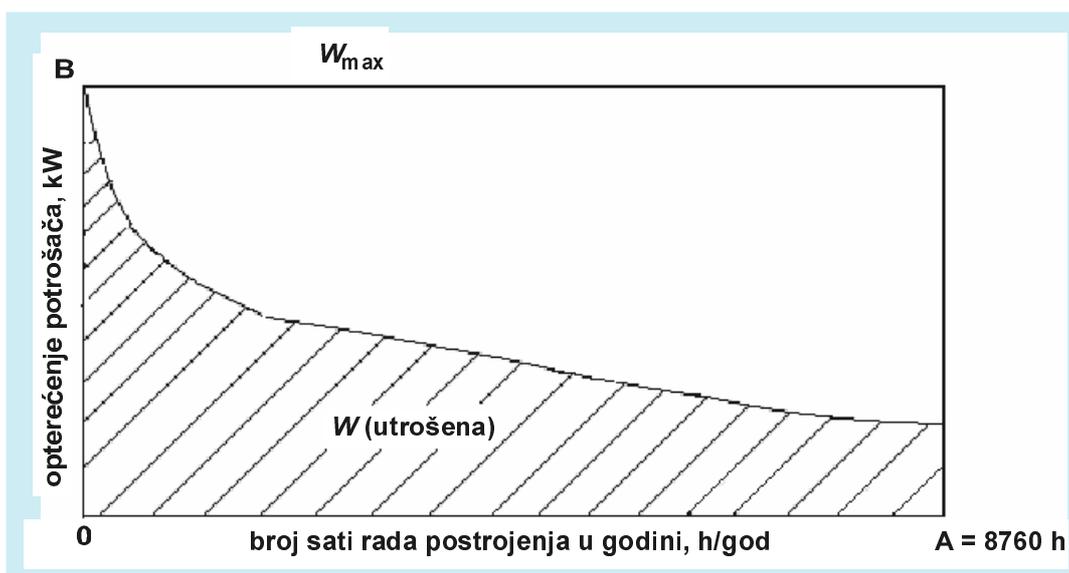
Slika 1. Dnevna 24 satna potrošnja toplinske energije [7]



Slika 2. Dnevna 24 satna potrošnja električne energije [7]



Slika 3. Godišnji dijagram opterećenja potrošača topline



Slika 4. Godišnji dijagram opterećenja potrošača električne energije

Potrošnju toplinske energije u godinu dana (što je jednako 8 760 sati) moguće je odrediti ukoliko se izvrši broj beskonačno malih površina ispod krivulje AB slike 3 na sljedeći način:

$$Q(\text{utrošena}) = \int_0^A Q(t) dt \quad (2.1)$$

gdje je $Q(t)$ snaga opterećenja potrošača topline u trenutku t . Na isti se način, prema slici 4, određuje potrošnja električne energije u godinu dana:

$$W(\text{utrošena}) = \int_0^A W(t) dt \quad (2.2)$$

gdje je $W(t)$ snaga opterećenja potrošača električne energije u trenutku t .

Godišnja potrošnja toplinske i električne energije, $Q(\text{utrošena})$ i $W(\text{utrošena})$, kao i vršna toplinska i vršna električna snaga, Q_{\max} i W_{\max} , često su sa stajališta analize potrošnje toplinske i električne energije poznate. Stoga preostaje da se odredi vrijeme opterećenja potrošača topline, τ_q , i vrijeme opterećenja potrošača električne energije, τ_w , na sljedeći način:

$$\tau_q = \frac{Q(\text{utrošena})}{Q_{\max}} \quad (2.3)$$

$$\tau_w = \frac{W(\text{utrošena})}{W_{\max}} \quad (2.4)$$

Potrebno je naglasiti da se energetska sustav, odnosno rad energetskeg postrojenja prilagođava energetskim potrebama dravno-prerađivačke tvrtke.

2.2. Pretpostavke i uvjeti

Rezultati toplinsko-ekonomske analize proizvodnje toplinske i električne energije privode se optimumu ukoliko se u obzir sljedeće pretpostavke i uvjeti:

- a) troškovi kapitalnog investiranja kod energetskih sustava sa generatorom topline, TKI_{gt} , te energetskog sustava s protutlačnim parnoturbinskim agregatom, TKI_{pt} , povećavaju se nelinearno s povećanjem toplinske snage \dot{Q} (→ sl. 5) ili

$$TKI_{pt} = B \cdot \dot{Q}^m \quad \text{za protutlačno parnoturbinsko postrojenje} \quad (2.5)$$

$$TKI_{gt} = B_1 \cdot \dot{Q}^{m_1} \quad \text{za generator topline} \quad (2.6)$$

gdje su B i m , i B_1 i m_1 konstante određene na temelju poznatih cijena razmatranih tipova energetskih postrojenja različitih toplinskih snaga [6];

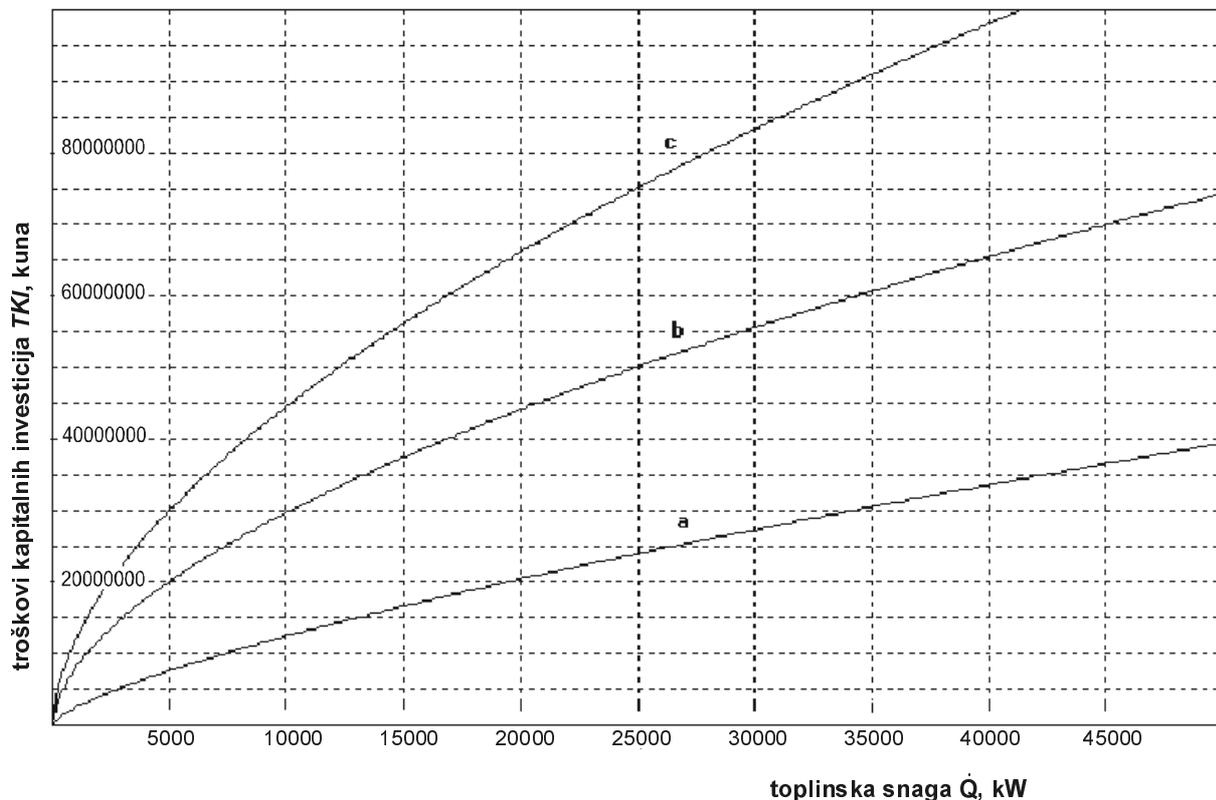
- b) troškovi kapitalnog investiranja u energetske sustave s kondenzacijskim parnoturbinskim agregatom i jednim oduzimanjem pare, TKI_{kt} , su u prosjeku za jedan i po puta veći od troškova kapitalnog investiranja u energetske sustave s protutlačnim parnoturbinskim agregatom (→ sl. 5) tj.

$$TKI_{kt} = \frac{3}{2} \cdot TKI_{pt} = \frac{3}{2} \cdot B \cdot \dot{Q}^m \quad (2.7)$$

gdje su B i m konstante jednake konstantama za energetski sustav s protutlačnim parnoturbinskim agregatom;

- c) godišnji troškovi odvojene proizvodnje toplinske i električne energije T_{gt} veći su od godišnjih troškova zajedničke proizvodnje toplinske i električne energije T_{pt} i T_{kt} .

Konstante B i m određuju se poznavanjem troškova kapitalnih investicija za pojedine tipove energetskih postrojenja različitih toplinskih i električnih snaga. Način određivanja konstanti je sljedeći:



Slika 5. Ovisnost troškova kapitalnih investicija o toplinskoj snazi energetskog sustava (a – krivulja energetskog sustava s generatorom topline, b – krivulja energetskog sustava s protutlačnim parnoturbinskim agregatom, c – krivulja energetskog sustava s kondenzacijskim parnoturbinskim agregatom i jednim oduzimanjem pare)

$$TKI_1 = B \cdot \dot{Q}_1^m$$

$$TKI_2 = B \cdot \dot{Q}_2^m \quad (2.8)$$

pri čemu su TKI_1 , TKI_2 , i \dot{Q}_1 , \dot{Q}_2 poznati pa proizlazi da je

$$B = \frac{TKI_1}{\dot{Q}_1^m} = \frac{TKI_2}{\dot{Q}_2^m} \quad (2.9)$$

$$m = \frac{\log TKI_1 - \log TKI_2}{\log \dot{Q}_1 - \log \dot{Q}_2}$$

Izraz (2.9) odnosi se na generator topline te na protutlačno parnoturbinsko postrojenje. U tablici 1 prikazani su troškovi kapitalnih investicija odabranih tipova energetskih postrojenja različitih toplinskih i električnih snaga.

Tablica 1. Prikaz troškova kapitalnih investicija za odabrane tipove energetskih postrojenja¹

	TKI_1 , kn	TKI_2 , kn	\dot{Q}_1 , kW	\dot{Q}_2 , kW
Generator topline	7,500.000	25,000.000	5000	25000
Protutlačno parnoturbinsko postrojenje	20,000.000	50,000.000	5000	25000

¹ na osnovi realne ponude proizvođača energetskih postrojenja

Uvrštavanjem vrijednosti iz tablice 1 u izraze (2.8) i (2.9) dobivaju se sljedeće konstante: $B = 155\,818$, $m = 0,57$ za protutlačno parnoturbinsko postrojenje, $B_1 = 16285$, $m_1 = 0,72$ za generator topline. Dakle, eksponenti m i m_1 su manji od jedan što znači da su krivulje a , b i c sa slike 5 logaritamske. Drugim riječima, što je toplinska snaga razmatranih tipova energetskih postrojenja viša to su troškovi kapitalnih investicija po jedinici toplinske snage manji, i obratno.

2.3. Toplinsko-ekonomska optimizacija proizvodnje toplinske i električne energije

2.3.1. Definiranje troškova i prihoda

Pri proizvodnji toplinske i električne energije potrebno je računati na određene troškove i prihode. Troškovi mogu biti fiksni i promjenjivi. Pod fiksne troškove podrazumijevaju se:

a) troškovi kapitala, T_{KAP} , koji su jednaki:

$$T_{KAP} = TKI \cdot \frac{i(1+i)^N}{(1+i)^N - 1} \quad (2.10)$$

gdje izraz nakon TKI (troškovi kapitalnih investicija) predstavlja recipročnu vrijednost dinamičkog diskontnog faktora ovisnog o kamatnoj stopi i te o razdoblju trajanja ugovora N . Ta se vrijednost prema [1] još naziva faktor povratka kapitala β pa izraz (2.10) poprima sljedeći oblik:

$$T_{KAP} = \beta \cdot TKI \quad (2.11)$$

b) troškovi za pogon i održavanje energetskog postrojenja, T_{PO} , koji uzimaju u obzir troškove za kemikalije, vodu, obradu vode, radnu snagu te vlastiti utrošak topline i električne energije. Prema iskustvu ti troškovi iznose ne više od 6% ($\gamma = 0,06$) ukupnih troškova kapitalnih investicija u razmatrane tipove energetskih postrojenja.

Pod promjenjive troškove ubrajaju se:

- godišnji troškovi za gorivo, T_g ,
- godišnji troškovi za kupnju električne energije od elektrodistributera, T_{ees} .

Prihodi se ostvaruju na račun prodaje viškova električne energije elektrodistributeru kao i na moguću prodaju toplinske energije okolnom naselju i drugim industrijskim tvrtkama.

2.3.2. Određivanje cijene toplinske energije i cijene električne energije

Za investitora i vlasnika dravno-prerađivačke tvrtke vrlo je važno odrediti cijenu toplinske energije i cijenu električne energije kako bi procijenili da li se isplati ulagati u energetsko postrojenje za zajedničku proizvodnju toplinske i električne energije ili ne. Definiranjem konstanti B i m za pojedine je tipove energetskih postrojenja moguće izračunati najvišu cijenu električne energije. Prema metodi tržišne vrijednosti iz [8] najviša cijena električne energije se dobiva ukoliko se svi troškovi energetskog postrojenja pripišu samo proizvodnji električne energije, odnosno:

$$c_{w,\max} = \frac{\Sigma T}{W \cdot \tau_w} = \frac{T_g + T_{KAP} + T_{PO}}{\chi \cdot \dot{Q} \cdot \tau_w} \quad (2.12)$$

pri čemu je cijena toplinske energije jednaka nuli. U izrazu (2.12) ΣT predstavlja sumu godišnjih troškova za proizvodnju električne energije, a to su kod energetskog postrojenja troškovi za gorivo, T_g , troškovi kapitala, T_{KAP} , i troškovi za pogon i održavanje, T_{PO} . Ako se izrazi (2.5) i (2.11) uvrste u izraz (2.12) dobiva se:

$$c_{w,\max} = \frac{T_g + (\beta + \gamma) \cdot B \cdot \dot{Q}^m}{\chi \cdot \dot{Q} \cdot \tau_w} \quad (2.13)$$

za protutlačno parnoturbinsko postrojenje, a za kondenzacijsko parnoturbinsko postrojenje s jednim oduzimanjem pare najviša se cijena električne energije povisuje na:

$$c_{w,\max} = \frac{T_g + 1,5 \cdot (\beta + \gamma) \cdot B \cdot \dot{Q}^m}{\chi \cdot \dot{Q} \cdot \tau_w} \quad (2.14)$$

Koeficijent χ predstavlja odnos između izlazne mehaničke (električne) snage i izlazne toplinske snage.

Godišnji troškovi za zajedničku proizvodnju toplinske i električne energije iznose:

$$T = c_q \dot{Q} \tau_q + c_w W \tau_w \quad (2.15)$$

gdje je c_q cijena toplinske energije, umnožak $\dot{Q} \tau_q$ proizvedena toplinska energija u godinu dana, c_w cijena električne energije, a umnožak $W \tau_w$ proizvedena električna energija u godinu dana.

Ukoliko se izraz (2.15) uvrsti u izraz (2.12) proizlazi sljedeće:

$$c_{w,\max} = c_w + \frac{1}{\chi} c_q \quad (2.16)$$

Cijena toplinske energije dobiva se uređenjem izraza (2.16)

$$c_q = \chi \cdot (c_{w,\max} - c_w) \quad (2.17)$$

Uzme li se granični uvjet pri kome je cijena električne energije jednaka nuli, i kao takva se uvrsti u izraz (2.17) slijedi da je

$$c_{q,\max} = \chi \cdot \frac{\tau_w}{\tau_q} \cdot c_{w,\max} \quad (2.18)$$

pri čemu je $c_{q,\max}$ najviša cijena toplinske energije. Uvrštavanjem izraza (2.14) u izraz (2.18) dobiva se preuređeni oblik:

$$c_{q,\max} = \frac{T_g + (\beta + \gamma) \cdot B \cdot \dot{Q}^m}{\dot{Q} \cdot \tau_q} \quad (2.19)$$

gdje je $c_{q,\max}$ najviša cijena toplinske energije kod protutlačnog parnoturbinskog postrojenja. Ta će cijena za kondenzacijsko parnoturbinsko postrojenje s jednim oduzimanjem pare zbog dodatnih investicijskih ulaganja iznositi:

$$c_{q,\max} = \frac{T_g + 1,5 \cdot (\beta + \gamma) \cdot B \cdot \dot{Q}^m}{\dot{Q} \cdot \tau_q} \quad (2.20)$$

2.3.3. Određivanje vremena povratka kapitala

Vrijeme povratka kapitala uloženog u novo energetske postrojenje za zajedničku proizvodnju toplinske i električne energije određuje se utvrđivanjem godišnjih ušteda. Te su uštede jednake:

$$U = T_{gt} - T_{pt} \quad (\text{i } U = T_{gt} - T_{kt}) \quad (2.21)$$

gdje su T_{gt} godišnji troškovi odvojene proizvodnje toplinske i električne energije, a T_{pt} (i T_{kt}) godišnji troškovi zajedničke proizvodnje toplinske i električne energije.

Na osnovi uštede računa se vrijeme povratka kapitala uloženog u novo energetske postrojenje za zajedničku proizvodnju toplinske i električne energije, i to:

$$n = \frac{TKI_{pt}}{U} \quad (\text{i } n = \frac{TKI_{kt}}{U}) \quad (2.22)$$

gdje TKI_{pt} (i TKI_{kt}) predstavlja ukupne troškove investiranja u novo energetske postrojenje za zajedničku proizvodnju toplinske i električne energije, a U godišnju uštedu na troškovima između odvojene i zajedničke proizvodnje toplinske i električne energije. Pri tome će vrijeme povratka kapitala n biti u funkciji toplinske snage \dot{Q} :

$$n = f(\dot{Q}) \quad (2.23)$$

Za određivanje najniže toplinske snage pri kojoj zajednička proizvodnja toplinske i električne energije postaje isplativija od odvojene proizvodnje potrebno je odrediti:

- vrijeme povratka kapitala uloženog u generator topline, n_{gt} ,
- vrijeme povratka kapitala uloženog u protutlačno parnoturbinsko postrojenje, n_{pt} i
- vrijeme povratka kapitala uloženog u kondenzacijsko parnoturbinsko postrojenje s jednim oduzimanjem pare, n_{kt} ,

uz pretpostavku da su troškovi za drvenu biomasu, T_g , jednaki nuli budući da se sakupljanje, transportiranje te priprema za loženje obavlja u krugu drvno-industrijskog pogona.

- Vrijeme povratka kapitala uloženog u generator topline

Ovisi o troškovima kapitalnih investicija za generator topline, TKI_{gt} , te različiti troškova kupljene toplinske energije iz CTsa (centraliziranog toplinskog sustava), T_{kup} i toplinske energije proizvedene u vlastitom generatoru topline, T_{gt} , tj.

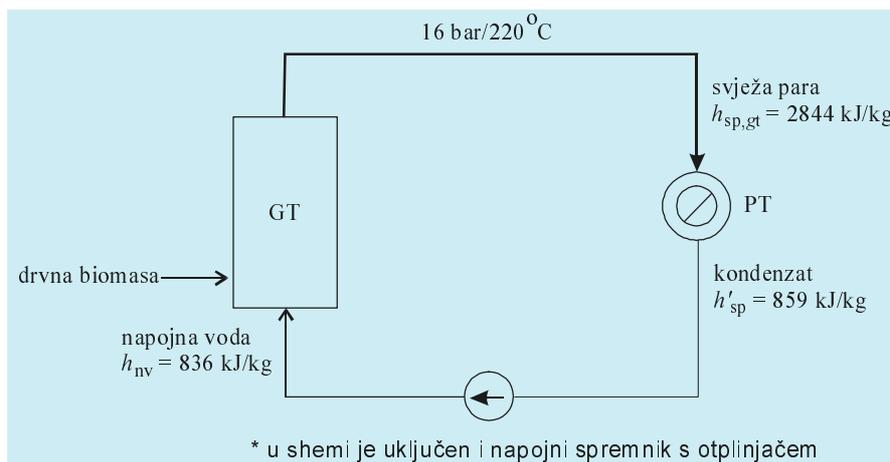
$$n_{gt} = \frac{TKI_{gt}}{T_{kup} - T_{gt}} \quad (2.24)$$

odnosno prema [6]

$$n_{gt} = \frac{B_1 \dot{Q}^{m_1}}{c_{q,kup} \dot{Q} \tau_q - (\beta + \gamma) B_1 \dot{Q}^{m_1}} \quad (2.25)$$

gdje je $c_{q,kup}$ cijena toplinske energije kupljene od CTSa.

Na slici 6 prikazana je pojednostavljena shema generatora topline u slučaju kad je nosilac topline svježa para.



Slika 6. Energetski sustav s generatorom topline (GT – generator topline, PT – potrošači topline)

Za daljnja razmatranja važno je odrediti izraz kojim se određuje količina drvene biomase po jedinici topline u sustavu s generatorom topline, q_{gt} . Ta se veličina određuje na osnovu bilance uložene energije sadržane u drvnjoj biomasi te iskorištene topline koja se predaje potrošačima (→ sl. 6). Prema [6] ta veličina jest jednaka sljedećem izrazu:

$$q_{gt} = \frac{h_{sp,gt} - h_{nv}}{h_{sp,gt} - h_{sp}} \cdot \frac{1}{H_d \eta_{gt}} \quad (2.26)$$

gdje su redom $h_{sp,gt}$ entalpija svježe pare, h_{sp} entalpija kondenzata, h_{nv} entalpija napojne vode, H_d njegova donja ogrjevna vrijednost, η_{gt} iskoristivost generatora topline.

b) Vrijeme povratka kapitala uloženog u protutlačno parnoturbinsko postrojenje

Ovisi o troškovima kapitalnih investicija za protutlačno parnoturbinsko postrojenje, TKI_{pt} , troškovima proizvedene toplinske i kupljene električne energije kod sustava sa generatorom topline, T_{gt} , troškovima proizvedene toplinske i električne energije kod sustava s protutlačnim parnoturbinskim postrojenjem i vršnim generatorom topline, T_{pt} odnosno razlici tih troškova, $U = T_{gt} - T_{pt}$, tj.

$$n_{pt} = \frac{TKI_{pt}}{T_{gt} - T_{pt}} \quad (2.27)$$

odnosno prema [6]

$$n_{sp} = \frac{B \dot{Q}^m}{-3600 \dot{Q} (q_{pt} - q_{vgt}) c_g \tau_q + (\beta + \gamma) \left(B_1 \dot{Q}^{m_1} - B \dot{Q}^m \right) + c_{ees} \chi \dot{Q} \tau_q + c_{ot} \chi \dot{Q} (8760 - \tau_q)} \quad (2.28)$$

te u slučaju da se radi o novom vršnom generatoru topline

$$n_{sp} = \frac{B \dot{Q}^m + B_1 \dot{Q}^{m_1}}{-3600 \dot{Q} (q_{pt} - q_{vgt}) c_g \tau_q + (\beta + \gamma) \left(B_1 \dot{Q}^{m_1} - B \dot{Q}^m \right) + c_{ees} \chi \dot{Q} \tau_q + c_{ot} \chi \dot{Q} (8760 - \tau_q)} \quad (2.29)$$

Potrebno je naglasiti da je vršni generator topline istih ili sličnih toplinsko-ekonomskih karakteristika kao i generator topline kod sustava za odvojenu proizvodnju toplinske i električne energije pa će u tom slučaju biti zadovoljeno sljedeće:

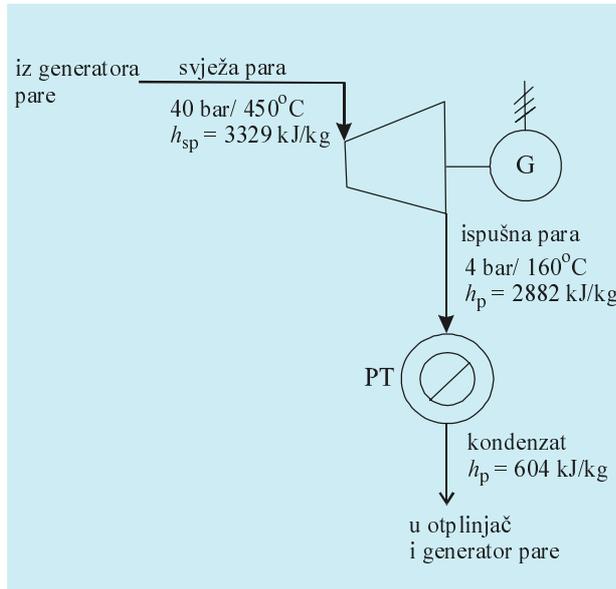
$$q_{gt} = q_{vgt} \quad (2.30)$$

U izrazu (2.29) su c_{ees} cijena električne energije kupljene od elektrodistributera, c_{ot} cijena viška električne energije po kojoj elektrodistributer otkupljuje od drvno-predrađivačke tvrtke (što znači da se radi o prihodima) i to godišnje (8760 - τ_q) sati.

Na slici 7 prikazana je pojednostavljena shema protutlačnog parnoturbinskog agregata. Veličina q_{pt} predstavlja količinu drvene biomase po jedinici topline kod sustava s protutlačnim parnoturbinskim postrojenjem (koji je proizašao iz bilance uložene energije sadržane u drvnjoj biomasi i iskorištene toplinske energije predanoj potrošačima). Prema [6] ta veličina jest jednaka sljedećem izrazu:

$$q_{pt} = \frac{h_{sp,pt} - h_{nv}}{h_p - h_p'} \cdot \frac{1}{H_d \eta_{gp}} \quad (2.31)$$

gdje su redom h_{sp} entalpija svježe pare, h_p politropska entalpija ispušne pare h'_p , entalpija kondenzata h_{nv} , entalpija napojne vode, H_d donja ogrjevna vrijednost drvene biomase, η_{gp} iskoristivost generatora pare (budući da je za pogon turbina isključivo potrebna svježa para).



Slika 7. Energetski sustav s protutlačnim parnoturbinskim agregatom (G – generator električne energije, PT – potrošači toplote)

Izraz u jednadžbi (2.29), $3600 \cdot \dot{Q} \cdot (q_{pt} - q_{vgp}) \cdot c_g \cdot \tau_q$, predstavlja razliku troškova potrebne količine drvene biomase između sustava za odvojenu proizvodnju i sustava za zajedničku proizvodnju toplinske i električne energije. Brojka 3 600 prisutna je iz razloga jer se količina drvene biomase mjeri u kilogramima po sekundi, a vrijeme opterećenja potrošača u satima, iz kojeg proizlazi da jedan sat ima 3 600 sekundi.

c) Vrijeme povratka kapitala uloženog u kondenzacijsko parnoturbinsko postrojenje s jednim oduzimanjem pare

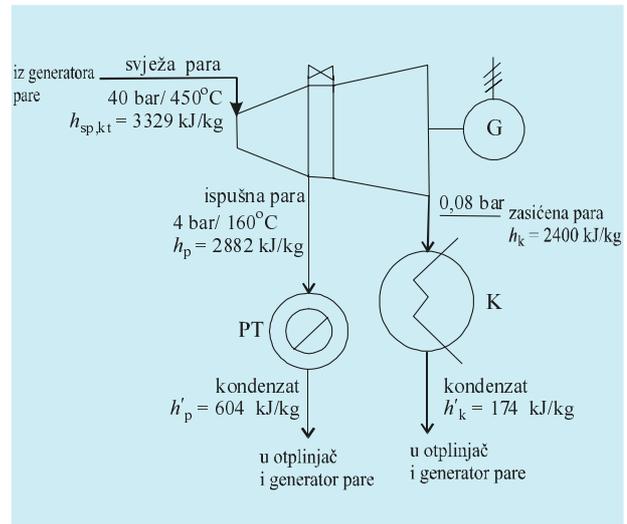
Ovisi o troškovima kapitalnih investicija za kondenzacijsko parnoturbinsko postrojenje s jednim oduzimanjem pare, TKI_{kt} , troškovima proizvedene toplinske i kupljene električne energije kod sustava s generatorom toplote, T_{gt} , troškovima proizvedene toplinske i električne energije kod sustava s kondenzacijskim parnoturbinskim postrojenjem i jednim oduzimanjem pare te vršnim generatorom pare T_{pt} , odnosno razlici tih troškova, $U = T_{gt} - T_{kt}$, odnosno

$$n_{kt} = \frac{TKI_{kt}}{T_{gt} - T_{kt}} \quad (2.32)$$

odnosno prema [6]

$$\eta_{iz} = \frac{1,5B \dot{Q}^{0,8}}{-3600 \left(q_p + q_{kt} \frac{\dot{W}_{max}}{\dot{Q}} - \gamma \right) \tau_{gp} + (\beta + \gamma) \left(B \cdot \dot{Q}^{0,8} - 1,5B \dot{Q}^{0,8} \frac{1}{\tau_{gp}} \right) - 3600 \cdot c_v \left(\dot{W}_{max} - \gamma \dot{Q} \right) K \tau_v + c_{v,1} \dot{W}_{max} \tau_v + c_{v,2} \dot{W}_{max} (8760 - \tau_v)} \quad (2.33)$$

gdje su pored parametara preuzetih iz slučajeva a) i b) još c_v cijena vode za ukapljivanje pare, K_v količina (rashladne) vode po jedinici odvedene toplote iz konden-



Slika 8. Energetski sustav s kondenzacijskim parnoturbinskim postrojenjem i jednim oduzimanjem pare (G – generator električne energije, PT – potrošači toplote, K – kondenzator)

zatora koja se prema [6] izračunava na sljedeći način (\rightarrow sl. 8):

$$K_v = \frac{1}{q_v \Delta t_v} \left(\frac{h_k - h'_k}{h_p - h_{k(t)}} \cdot \frac{1}{\eta_{i(od-k)}} \right) \quad (2.34)$$

gdje su h_p entalpija pare kod tlaka oduzimanja, $h_{k(t)}$ adijabatska entalpija zasićene pare h_k , politropska entalpija zasićene pare h'_k , entalpija kondenzata, $\eta_{i(od-k)}$ unutarnji stupanj korisnosti turbine od oduzimanja do izlaza, $q_v = 4,1868 \text{ kJ/kgK}$ – specifična toplina (rashladne) vode, $\Delta t_v = 8^\circ\text{C}, 12^\circ\text{C}$ – temperaturna razlika (rashladne) vode na ulazu i izlazu iz kondenzatora.

Veličina q_{kt} predstavlja količinu drvene biomase po jedinici toplote kod sustava s kondenzacijskim parnoturbinskim postrojenjem i jednim oduzimanjem pare (koji je proizašao iz bilance uložene energije sadržane u drvnoj biomasi i iskorištene toplinske energije predanoj potrošačima). Prema [6] ta veličina jest jednaka sljedećem izrazu:

$$q_{kt} = \frac{h_{sp,kt} - h_{nv}}{h_p - h_{k(t)}} \cdot \frac{1}{\eta_{i(od-k)} \eta_{gp} H_d} \quad (2.35)$$

gdje su redom već objašnjeni parametri iz ovog i prethodnih slučajeva a) i b) kao i zbog čega se pojavljuje izraz u jednadžbi (2.33)

$$„3600\dot{Q}\left(q_{pt} + q_{kt}\left(\frac{\dot{W}_{max}}{\dot{Q}} - \lambda\right) - q_{vgp}\right)c_g\tau_q”.$$

2.4. Određivanje najniže toplinske snage

Najniža vrijednost toplinske snage označena sa \dot{Q}_{min} jest ona pri kojoj sustav zajedničke proizvodnje toplinske i električne energije postaje isplativiji od sustava odvojene proizvodnje toplinske i električne energije.

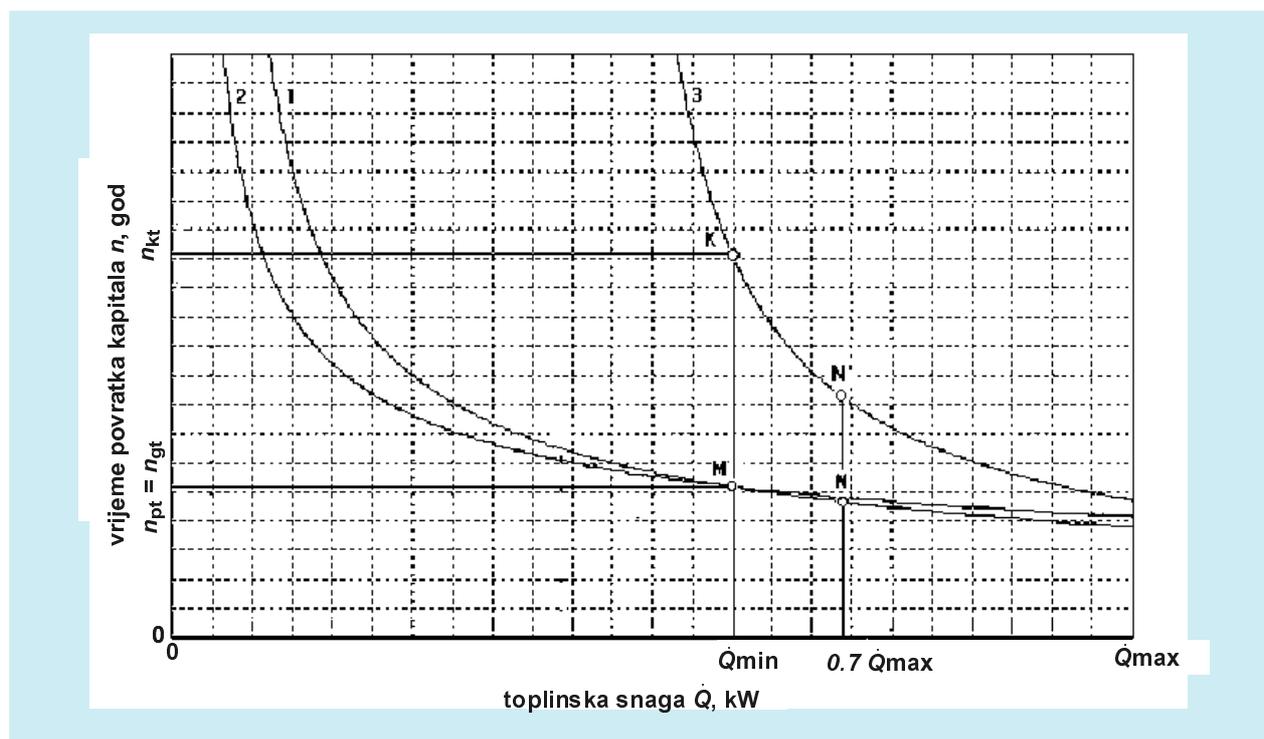
Na slici 9 je dijagramski prikazana ovisnost vremena povratka kapitala (izražena u godinama) o toplinskoj snazi energetskog sustava u rasponu od 0 do \dot{Q}_{max} (\dot{Q}_{max} se odnosi na instaliranu toplinsku snagu u drvno-industrijskom pogonu). Krivulje se izrađuju uz pomoć kompjutorskog programa *GRAPHMATICA 1.60e*.

proizvodnje toplinske i električne energije (protutlačno parnoturbinsko postrojenje + vršni generator pare);

– krivuljom 2 prikazuje se ovisnost snage \dot{Q} o vremenu povratka kapitala uloženog u sustav odvojene proizvodnje toplinske i električne energije (generator pare + električna energija kupljena od elektrodistributera);

– krivuljom 3 prikazuje se ovisnost snage \dot{Q} o vremenu povratka kapitala uloženog u sustav zajedničke proizvodnje toplinske i električne energije (kondenzacijsko parnoturbinsko postrojenje s jednim oduzimanjem pare + vršni generator pare);

– točka M odgovara toplinskoj snazi \dot{Q}_{min} pri kojoj sustav zajedničke proizvodnje toplinske i električne energije postaje isplativiji od sustava odvojene proizvodnje (kad je povrat kapitala uloženog u te sustave istodoban, tj. $n_{pt} = n_{gt}$);



Slika 9. Ovisnost vremena povratka kapitala o toplinskoj snazi energetskog sustava za odvojenu i zajedničku proizvodnju toplinske i električne energije (1 – krivulja energetskog sustava s protutlačnim parnoturbinskim agregatom i vršnim generatorom topline, 2 – krivulja energetskog sustava s generatorom topline, 3 – krivulja energetskog sustava s kondenzacijskim parnoturbinskim agregatom s jednim oduzimanjem pare te vršnim generatorom topline)

Dijagram sa slike 9 očitava se na sljedeći način:

– krivuljom 1 prikazuje se ovisnost snage \dot{Q} o vremenu povratka kapitala uloženog u sustav zajedničke

Zajedničko svim krivuljama prikazanih na slici 9 jest to što su eksponencijalne. Drugim riječima, veća toplinska snaga kraće vrijeme povratka kapitala, i obratno. To proizlazi iz zakonitosti logaritamskih krivulja sa

slike 5 kod kojih što veća toplinska snaga znači to manje troškove kapitalnih investicija po jedinici toplinske snage, i obratno. U nastavku rada će se kroz rezultate postavljenog matematičkog modela na konkretnom primjeru dravno-prerađivačke tvrtke ispitati utjecaj promjenjivosti vrijednosti određenih veličina na isplativost ulaganja u sustave za zajedničku proizvodnju toplinske i električne energije.

3. REZULTATI TOPLINSKO-EKONOMSKE OPTIMIZACIJE

3.1. Ulazni podaci za određivanje najniže toplinske snage

Rukovoditelj tehničke službe tvrtke DI "Spačva" ispunio je anketni upitnik o potrošnji energije i karakteristikama energetskog sustava za 2000. godinu. U tom je upitniku upisao sljedeće podatke [9]:

1. godišnja potrošnja toplinske energije, $Q(\text{utrošeno}) = 48\,000$ MWh,
2. godišnja potrošnja električne energije, $W(\text{utrošeno}) = 8\,000$ MWh,
3. instalirana toplinska snaga u dravno-industrijskom pogonu, $Q_{\max} = 12$ MW = 12 000 kW,
4. vršna električna snaga, $W_{\max} = 2$ MW = 2 000 kW,
5. raspoloživa količina drvene biomase: $m_{\text{rasp}} = 1,92$ kg/s,
6. donja ogrjevna vrijednost drvene biomase: $H_d = 11\,000$ kJ/kg
7. okvirna cijena drvene biomase: $c_g \approx 0$ kn/kJ
8. cijena električne energije kupljene od elektrodistributera: $c_{\text{ees}} = 0,57$ kn/kWh [9] (dobiveno dijeljenjem vrijednosti godišnjih troškova za električnu energiju s vrijednošću godišnje potrošnje električne energije)
9. cijena toplinske energije kupljene od CTSa: $c_{q,\text{kup}} = 0,1$ kn/kWh [10] (odnosi se na usporednu cijenu tehnološke pare iz EL-TO Zagreb)
10. cijena otkupne električne energije: $c_{\text{ot}} = 0,7$ $c_{\text{ees}} = 0,4$ kn/kWh
11. udio troškova kapitala, pogona i održavanja jest 10% od troškova kapitalnih investicija: $\beta + \gamma = 0,10$.

Pogonski parametri energetskih sustava

1. Generator topline (nosilac topline svježeg para) (\rightarrow sl. 6)
 - tlak/temperatura svježeg pare: 16 bar / 220°C
 - entalpija svježeg pare: $h_{\text{sp,gt}} = 2844$ kJ/kg
 - entalpija kondenzata: $h'_{\text{sp}} = 859$ kJ/kg
 - iskoristivost generatora topline $\eta_{\text{gt}} = 0,8$

- entalpija napojne vode $h_{\text{mv}} = 856$ kJ/kg
- količina drvene biomase po jedinici topline, prema izrazu (2.26):

$$q_{\text{gt}} = \frac{h_{\text{sp,gt}} - h_{\text{mv}}}{h_{\text{sp,gt}} - h'_{\text{sp}}} \cdot \frac{1}{H_d \eta_{\text{gt}}} = \frac{2844 - 856}{2844 - 859} \cdot \frac{1}{11000 \cdot 0,8}$$

$$q_{\text{gt}} = 113,8 \text{ kg/GJ} = 406,4 \text{ kg/MWh.}$$

2. Protutlačno parnoturbinsko postrojenje (\rightarrow sl. 7)

- tlak/temperatura svježeg pare: 40 bar / 450°C
- entalpija svježeg pare: $h_{\text{sp,pt}} = 3329$ kJ/kg
- tlak/temperatura ispušne pare: 4 bar / 160°C
- adijabatska entalpija ispušne pare: $h_{p(t)} = 2776$ kJ/kg
- politropska entalpija ispušne pare: $h_p = 2882$ kJ/kg
- entalpija kondenzata: $h'_p = 604$ kJ/kg
- entalpija napojne vode $h_{\text{mv}} = 677$ kJ/kg
- unutarnji stupanj korisnosti parne turbine: $\eta_i = 0,8$
- iskoristivost generatora pare: $\eta_{\text{gp}} = 0,8$
- odnos između izlazne mehaničke (električne) snage i toplinske snage postrojenja:

$$\chi = \frac{h_{\text{sp}} - h_{p(t)}}{h_p - h'_p} \eta_i = \frac{3329 - 2776}{2882 - 604} \cdot 0,8 = 0,2$$

- količina drvene biomase po jedinici topline, prema izrazu (2.26):

$$q_{\text{pt}} = \frac{h_{\text{sp,pt}} - h_{\text{mv}}}{h_p - h'_p} \cdot \frac{1}{H_d \eta_{\text{gp}}} = \frac{3329 - 677}{2882 - 604} \cdot \frac{1}{11000 \cdot 0,8}$$

$$q_{\text{pt}} = 132,3 \text{ kg/GJ} = 472,5 \text{ kg/MWh.}$$

3. Kondenzacijsko parnoturbinsko postrojenje s jednim oduzimanjem pare (\rightarrow sl. 8)

- tlak/temperatura svježeg pare: 40 bar / 450°C
- entalpija svježeg pare: $h_{\text{sp,kt}} = 3329$ kJ/kg
- tlak/temperatura oduzimanja pare: 4 bar / 160°C
- adijabatska entalpija ispušne pare: $h_{p(t)} = 2776$ kJ/kg
- politropska entalpija ispušne pare: $h_p = 2882$ kJ/kg
- entalpija kondenzata pri tlaku oduzimanja: $h'_p = 604$ kJ/kg
- tlak kondenzacije: 0,08 bar
- adijabatska entalpija zasićene pare: $h_{k(t)} = 2280$ kJ/kg
- politropska entalpija zasićene pare: $h_k = 2400$ kJ/kg
- entalpija kondenzata pri tlaku kondenzacije: $h'_k = 174$ kJ/kg
- unutarnji stupanj korisnosti turbine od oduzimanja do izlaza: $\eta_{i(\text{od-k})} = 0,8$
- unutarnji stupanj korisnosti turbine do oduzimanja: $\eta_{i(\text{sp-od})} = 0,8$

– entalpija napojne vode: $h_{nv} = 677$ kJ/kg

– količina rashladne vode po kJ topline:

$$K_v = \frac{1}{c_v \Delta t_v} \left(\frac{h_k - h'_k}{h_p - h_{k(t)}} \cdot \frac{1}{\eta_{i(od-k)}} \right) = \frac{1}{4,186 \cdot 8} \left(\frac{2400 - 174}{2882 - 2280} \cdot \frac{1}{0,8} \right)$$

$K_v = 0,137$ kg/kJ odvedene topline

– cijena vode za ukapljivanje pare: $c_v = 0,003$ kn/kg

– količina drvene biomase po jedinici topline, prema izrazu (2.35):

$$q_{kt} = \frac{h_{sp,kt} - h_{nv}}{h_p - h_{k(t)}} \cdot \frac{1}{\eta_{i(od-k)} \eta_{gp} H_d} = \frac{3329 - 677}{2882 - 2280} \cdot \frac{1}{0,8 \cdot 0,8 \cdot 11000}$$

$q_{kt} = 625,7$ kg/GJ = 2235 kg/MWh.

Uvrštavanjem zadanih vrijednosti za razmatranu drvno-prerađivačku tvrtku u izraze (2.25), (2.28) i (2.33) te uz pomoć kompjutorskog programa *GRAPHMATICA 1.60e* dobiva se dijagram prikazan na slici 10.

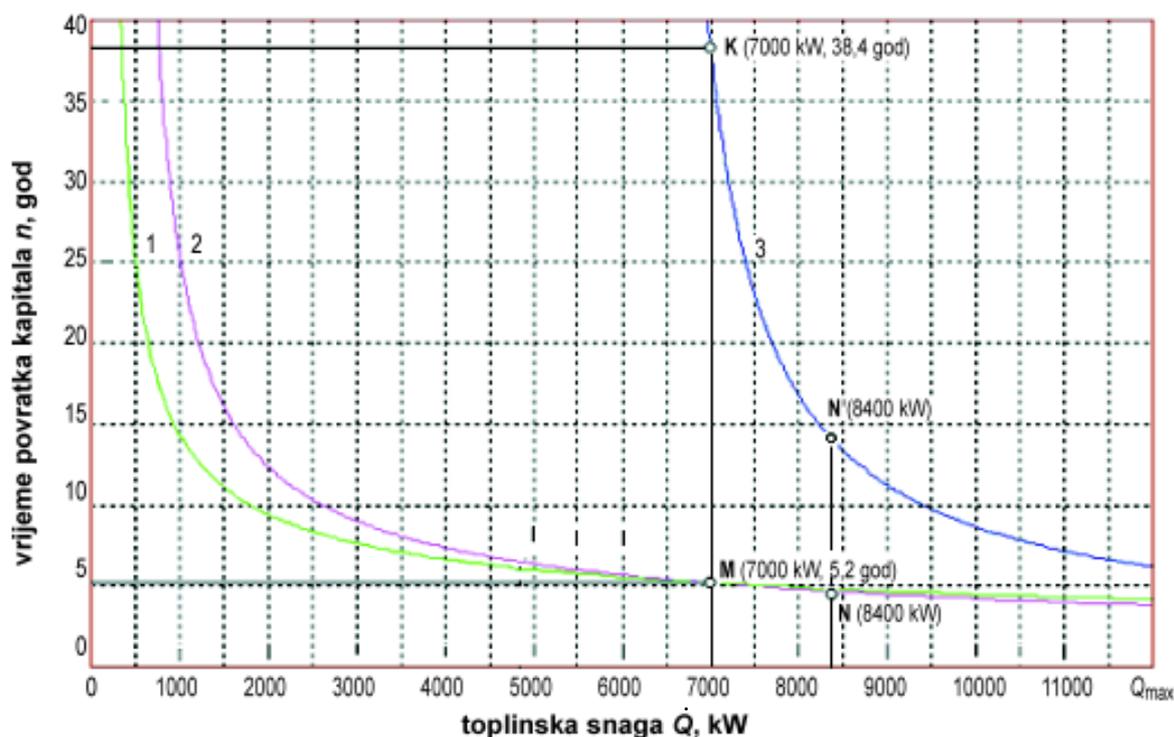
Prema dijagramu na slici 10 najniža vrijednost toplinske snage pri kojoj sustav zajedničke proizvodnje toplinske i električne energije postaje isplativiji u odnosu na sustav odvojene proizvodnje iznosi 7 000 kW. Ta vrijednost odgovara točki M. Protutlačno parnoturbin-

ska postrojenje je tip energetskog postrojenja za zajedničku proizvodnju toplinske i električne energije s kojim se ostvaruje ta najniža toplinska snaga (\rightarrow *krivulja 2*). Vrijeme povratka kapitala uloženo u takvo postrojenje iznosi 5,2 godine. To je vrijeme jednako vremenu povratka kapitala uloženo u generator topline izlazne toplinske snage od 7 000 kW (\rightarrow *krivulja 1*). Za kondenzacijsko parnoturbinsko postrojenje s jednim oduzimanjem pare kao drugim tipom energetskog postrojenja za zajedničku proizvodnju toplinske i električne energije vrijeme povratka kapitala pri toplinskoj snazi od 7 000 kW iznosi 38,4 godina.

3.2. Utjecaj promjene vrijednosti veličina na isplativost ulaganja

Najniža toplinska snaga za razmatranu drvno-prerađivačku tvrtku odredila se prema unaprijed zadanim veličinama čije se vrijednosti mogu mijenjati. Te veličine su:

- cijena električne energije kupljene od elektrodistributera, c_{ees} ,
- vrijeme opterećenja potrošača toplinske i električne energije, τ_q i τ_w ,
- radni parametri svježe pare (putem promjene koeficijenta χ),



Slika 10. Ovisnost vremena povratka kapitala o toplinskoj snazi energetskih sustava na primjeru konkretne drvno-prerađivačke tvrtke (1 – krivulja energetskog sustava s generatorom topline 2 – krivulja energetskog sustava s protutlačnim parnoturbinskim agregatom i vršnim postojećim generatorom topline, 3 – krivulja energetskog sustava s kondenzacijskim parnoturbinskim agregatom i jednim oduzimanjem te vršnim postojećim generatorom topline)

- d) troškovi kapitalnih investicija uloženi u energetska postrojenja, TKI ,
 e) cijena goriva (drvene biomase), c_g ,
 f) cijena vode za ukapljivanje pare, c_v .

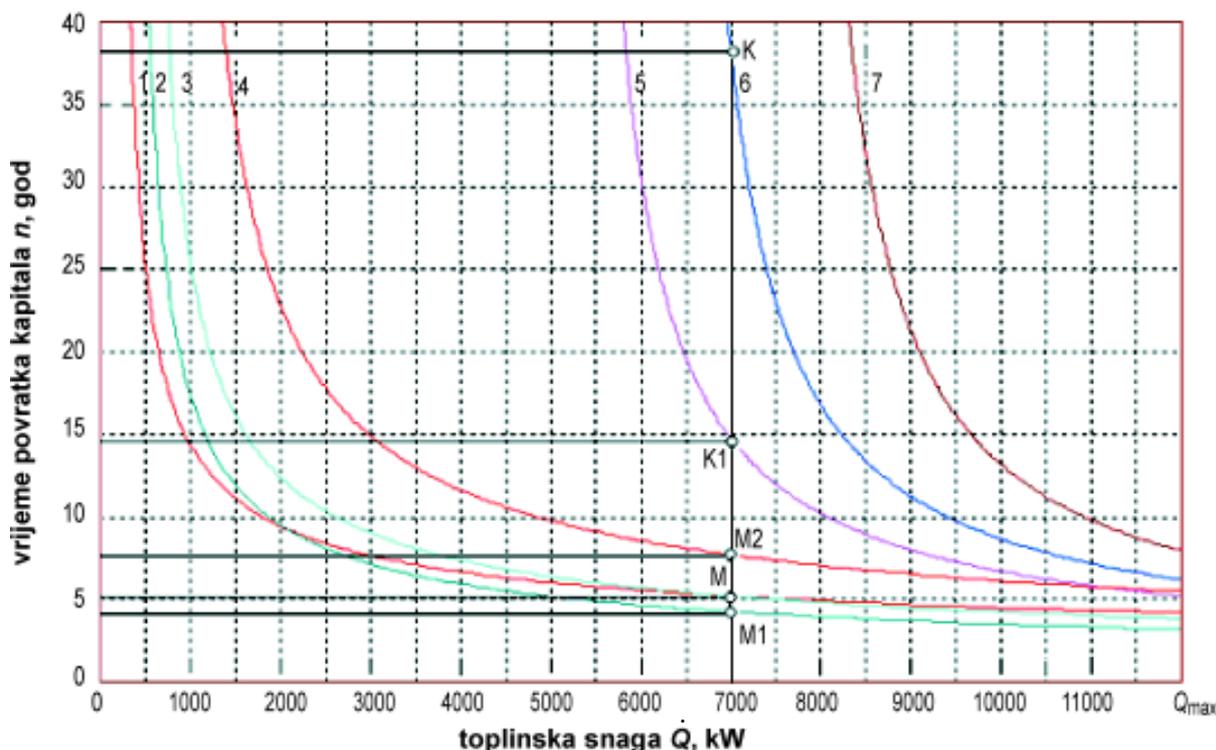
a) Promjena cijene električne energije kupljene od elektrodistributera c_{ees} ,

Ovisnost vremena povratka kapitala uloženi u energetska postrojenja o njegovoj toplinskoj snazi pri promjeni cijene električne energije kupljene od elektrodistributera prikazana je dijagramski na slici 11.

nim oduzimanjem pare vrijeme povratka kapitala pri vrijednosti toplinske snage od 7 000 kW veće od 40 godina.

b) Promjena trajanja opterećenja potrošača toplinske i električne energije, τ_q i τ_w

Ovisnost vremena povratka kapitala uloženi u energetska postrojenja o njegovoj toplinskoj snazi pri promjeni trajanja opterećenja potrošača toplinske i električne energije u godini dana prikazana je dijagramski na slici 12. Sa te je slike uočljivo da što je trajanje op-

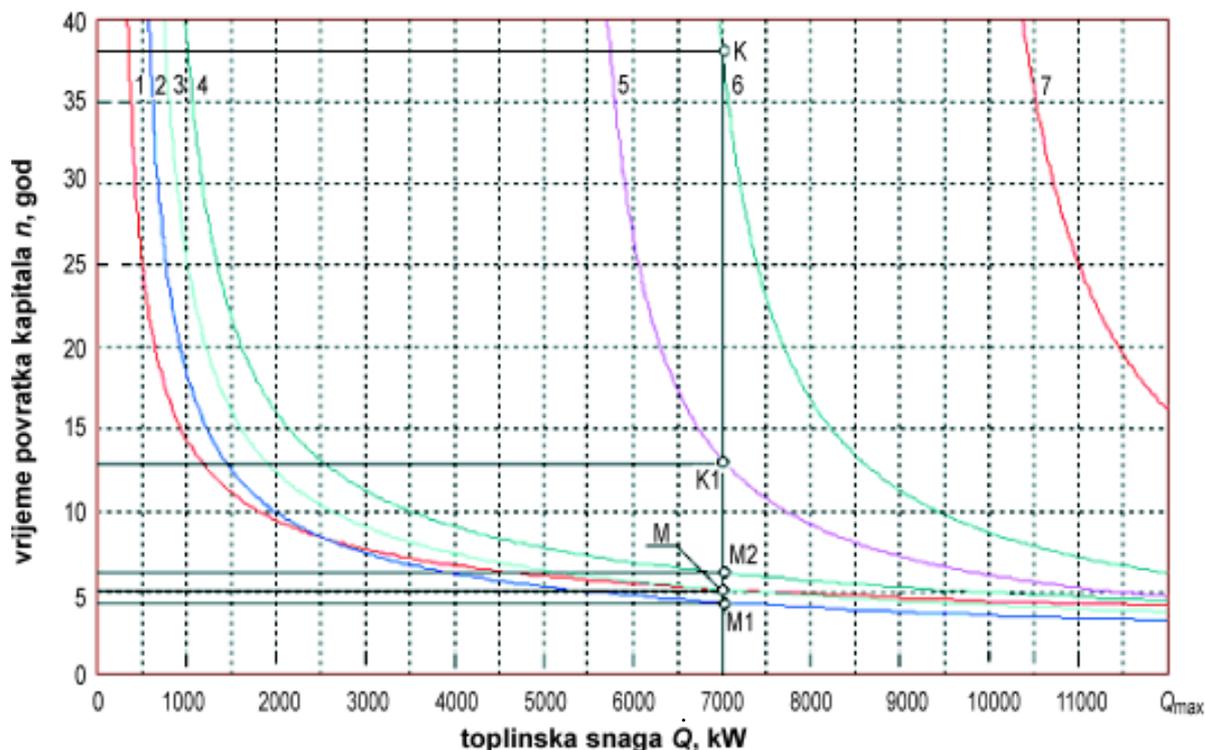


Slika 11. Ovisnost vremena povratka kapitala o toplinskoj snazi pri promjeni cijene električne energije od elektrodistributera (c_{ees}) (1 – krivulja energetskeg sustava s generatorom topline i krivulje energetskeg sustava s protutlačnim paroturbinskim agregatom i vršnim postojećim generatorom topline u slučaju kad je $2 - c_{ees} = 0,70$ kn/kWh, $3 - c_{ees} = 0,57$ kn/kWh, $4 - c_{ees} = 0,45$ kn/kWh, krivulje energetskeg sustava s kondenzacijskim paroturbinskim agregatom i jednim oduzimanjem pare te vršnim postojećim generatorom topline u slučaju kad je $5 - c_{ees} = 0,70$ kn/kWh, $6 - c_{ees} = 0,57$ kn/kWh, $7 - c_{ees} = 0,45$ kn/kWh)

Sa slike 11 primjećuje se da što je cijena električne energije kupljene od elektrodistributera viša to je vrijeme povratka kapitala kraće, tj. isplativost je veća. To je na dijagramu za protutlačno paroturbinsko postrojenje prikazano krivuljom 2 i točkom M1, a za kondenzacijsko paroturbinsko postrojenje s jednim oduzimanjem pare krivuljom 5 i točkom K1. I obratno, što je cijena električne energije kupljene od elektrodistributera niža to je vrijeme povratka kapitala dulje, tj. isplativost je manja. Na dijagramu je za protutlačno paroturbinsko postrojenje prikazano krivuljom 4 i točkom M2, dok je za kondenzacijsko paroturbinsko postrojenje s jed-

terećenja potrošača energije (ili vrijeme rada protutlačnog paroturbinskog postrojenja) dulje, to je vrijeme povratka kapitala kraće, tj. isplativost je veća. To je prikazano krivuljom 2 i točkom M1. I obratno, što je to trajanje opterećenja ili vrijeme rada tog postrojenja kraće to je vrijeme povratka kapitala dulje, tj. isplativost je manja. Taj je slučaj prikazan krivuljom 4 i točkom M2.

Za kondenzacijsko paroturbinsko postrojenje s jednim (reguliranim) oduzimanjem pare pravilo je suprotno. Odnosno, što je vrijeme rada takvog energetskeg postrojenja veće u godini dana to će vrijeme povratka ka-



Slika 12. Ovisnost vremena povratka kapitala o toplinskoj snazi pri promjeni trajanja opterećenja potrošača toplinske i električne energije (τ_q i τ_w) (1 – krivulja energetskog sustava s generatorom topline, krivulje energetskog sustava s protutlačnim paroturbinskim postrojenjem i vršnim postojećim generatorom topline u slučaju kad je 2 – $\tau_q = 8000$ h/god, 3 – $\tau_q = 4000$ h/god, 4 – $\tau_q = 2000$ h/god krivulje energetskog sustava kondenzacijskim arnoturbinskim postrojenjem i jednim oduzimanjem pare te vršnim postojećim generatorom topline τ_w u slučaju kad je 5 – $\tau_q = 2000$ h/god ili $\tau_w = 8000$ h/god, 6 – $\tau_q = 4000$ h/god i $\tau_w = 4000$ h/god, 7 – $\tau_q = 8000$ h/god ili $\tau_w = 2000$ h/god)

pitala biti dulje, tj. isplativost će biti manja. To je prikazano krivuljom 7, dok je za toplinsku snagu od 7 000 kW vrijeme povratka kapitala veće od 40 godina. I obratno, što je vrijeme rada kondenzacijskog parnoturbinskog postrojenja sa jednim oduzimanjem pare kraće to će i vrijeme povratka kapitala biti kraće, tj. isplativost veća. To je prikazano krivuljom 5 i točkom K1.

Kondenzacijsko parnoturbinsko postrojenje s jednim (reguliranim) oduzimanjem pare ima mogućnost bilanciranja toplinske i električne energije. Ukoliko bi vrijeme rada potrošača toplinske energije ostalo jednako 4 000 h/god, a vrijeme rada potrošača električne energije se mijenjalo, tada bi se desilo sljedeće:

- krivulja 5 odnosila bi se na energetsko postrojenje čije vrijeme proizvodnje električne energije iznosi $\tau_w = 8\,000$ h/god,
- krivulja 7 odnosila bi se na energetsko postrojenje čije vrijeme proizvodnje električne energije iznosi $\tau_w = 2\,000$ h/god.

c) Promjena radnih parametara svježe pare

Radni parametri svježe pare odnose se na njen tlak i temperaturu kojima se određuje količina topline ili en-

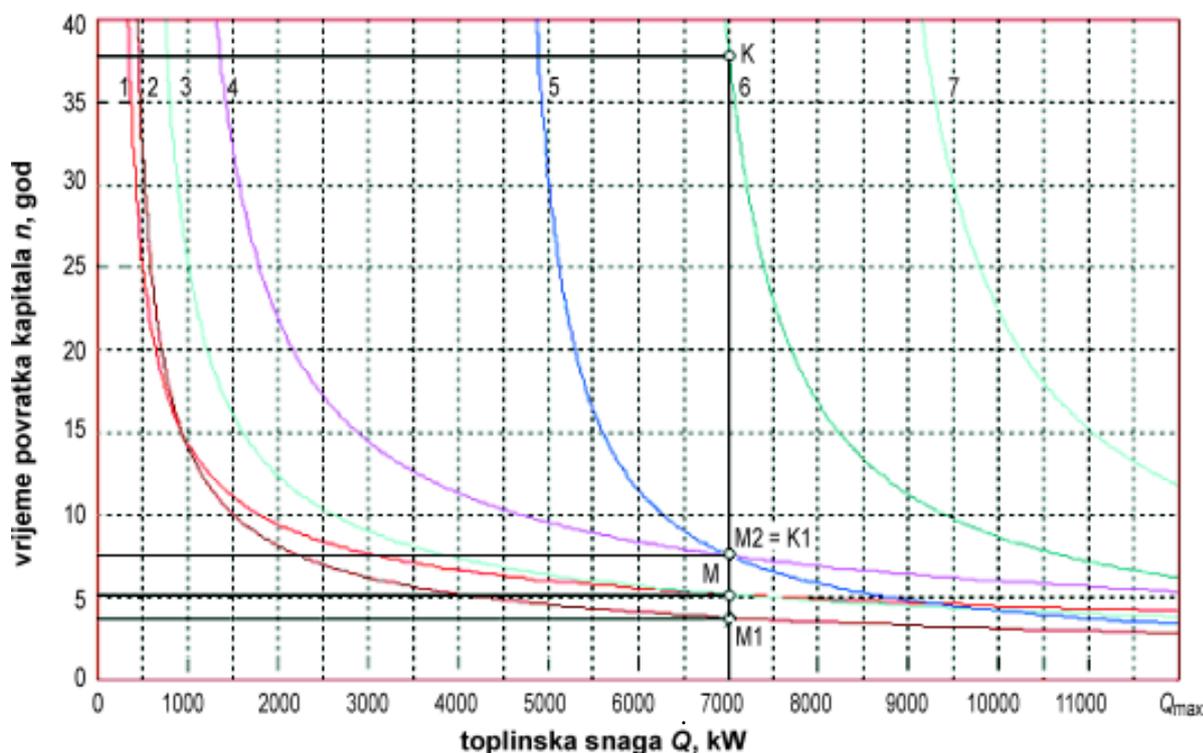
talpije. Što su tlak i temperatura svježe pare veći to će i entalpija biti veća. Odnos izlazne mehaničke (električne) snage i izlazne toplinske snage električnog postrojenja (u prethodnim poglavljima označenim sa χ) ovisi o radnim parametrima svježe pare, odnosno njezinoj entalpiji. Što je veća entalpija svježe pare to će i koeficijent χ biti veći, i obratno.

Ovisnost vremena povratka kapitala uloženog u energetsko postrojenje o toplinskoj snazi tog istog postrojenja pri promjeni radnih parametara svježe pare prikazana je dijagramom na slici 13.

Sa slike 13 vidljivo je da što je odnos između izlazne mehaničke (električne) snage i izlazne toplinske snage, χ , veći to je vrijeme povratka kapitala kraće, tj. isplativost je veća. To je za slučaj protutlačnog parnoturbinskog postrojenja prikazano krivuljom 2 i točkom M1, a za slučaj kondenzacijskog parnoturbinskog postrojenja s jednim oduzimanjem pare krivuljom 5 i točkom K1. I obratno, što je odnos χ manji to je vrijeme povratka kapitala dulje, tj. isplativost je manja. To je za slučaj protutlačnog parnoturbinskog postrojenja prikazano krivuljom 4 i točkom M2, a za slučaj kondenzacijskog parnoturbinskog postrojenja s jednim oduzima-

njem pare krivuljom 5 kod kojeg je vrijeme povratka kapitala pri vrijednosti toplinske snage od 7 000 kW veće od 40 godina.

skog postrojenja s jednim oduzimanjem pare to je prikazano krivuljom 5 i točkom **K1**. Na isti će način utjecati promjena udjela troškova kapitala, pogona i održavanja



Slika 13. Ovisnost vremena povratka kapitala o toplinskoj snazi pri promjeni radnih parametara svježe pare (χ) 1 (1 – krivulja energetskeg sustava s generatorom topline, krivulje energetskeg sustava sa protutlačnim parnoturbinskim postrojenjem i vršnim postojećim generatorom topline u slučaju kad je $2 - \chi = 0,27$, $3 - \chi = 0,2$, $4 - \chi = 0,16$ krivulje energetskeg sustava s kondenzacijskim parnoturbinskim agregatom i jednim oduzimanjem pare te vršnim postojećim generatorom topline u slučaju kad je $5 - \chi = 0,27$, $6 - \chi = 0,2$, $7 - \chi = 0,16$)

d) Promjena troškova kapitalnih investicija uloženi u energetske postrojenje, TKI

Ovisnost vremena povratka kapitala uloženi u energetske postrojenje o njegovoj toplinskoj snazi pri promjeni troškova kapitalnih investicija prikazana je dijagramski na slici 14.

Sa slike 14 objašnjenje je sljedeće: što su troškovi kapitalnih investicija energetskeg postrojenja za zajedničku proizvodnju toplinske i električne energije veći to je vrijeme povratka kapitala dulje, tj. isplativost je manja. To je za slučaj protutlačnog parnoturbinskog postrojenja prikazano krivuljom 4 i točkom **M2**. Za slučaj kondenzacijskog parnoturbinskog postrojenja s jednim oduzimanjem pare to je prikazano krivuljom 7, dok je vrijeme povratka kapitala uloženo u taj tip energetskeg postrojenja pri izlaznoj toplinskoj snazi od 7 000 kW veće od 40 godina. I obratno, što su troškovi kapitalnih investicija manji to je vrijeme povratka kapitala kraće, tj. isplativost je veća. To je za slučaj protutlačnog parnoturbinskog postrojenja prikazano krivuljom 2 i točkom **M1**. Za slučaj kondenzacijskog parnoturbins-

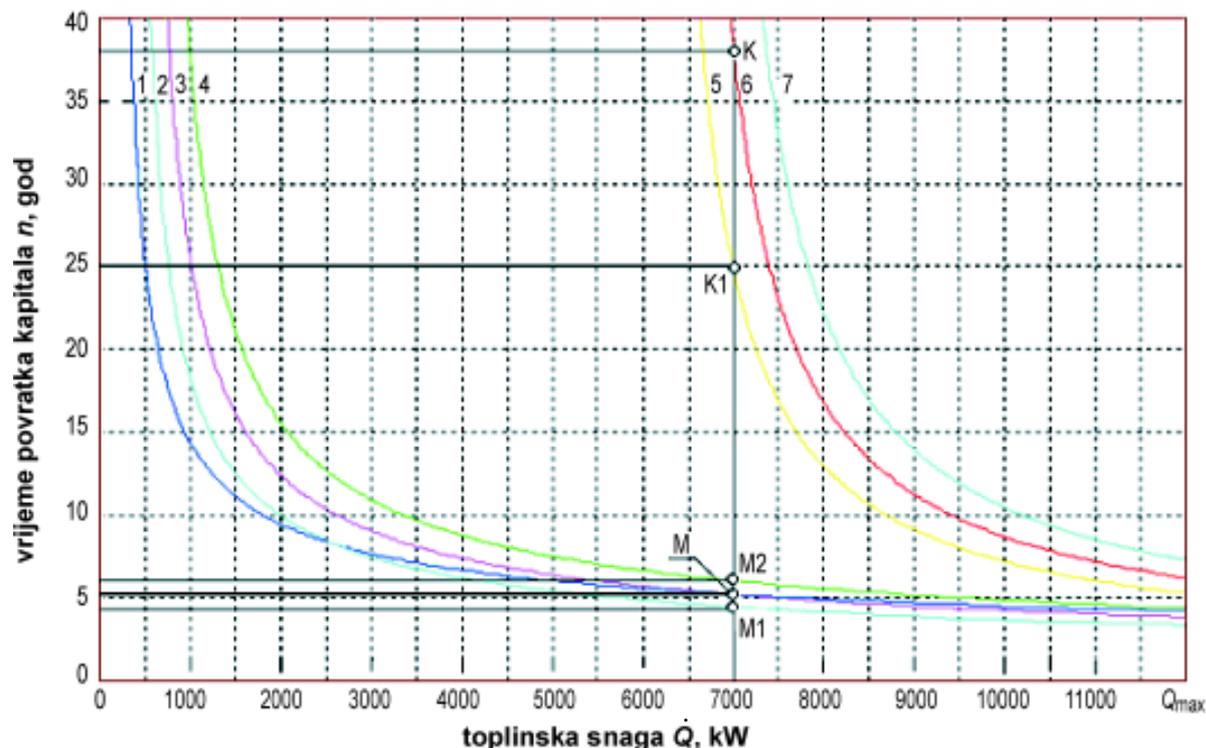
razmatranih tipova energetskeg postrojenja, $\beta + \gamma$, jer ovisi o promjeni troškova kapitalnih investicija.

e) Promjena cijene goriva (drvne biomase), c_g

Ovisnost vremena povratka kapitala uloženi u energetske postrojenje o toplinskoj snazi tog istog postrojenja pri promjeni cijene goriva (drvnog ostatka) prikazana je na dijagramu slike 15.

Sa slike 15 se daje primijetiti da ako je cijena drvnog ostatka veća od nule to je vrijeme povratka kapitala uloženi u energetske postrojenje dulje, tj. isplativost je manja. To je za slučaj protutlačnog parnoturbinskog postrojenja prikazano krivuljom 4 i točkom **M2**. Za slučaj kondenzacijskog parnoturbinskog postrojenja s jednim oduzimanjem pare to je prikazano krivuljom 7, dok je vrijeme povratka kapitala uloženo u taj tip energetskeg postrojenja pri izlaznoj toplinskoj snazi od 7 000 kW veće od 40 godina.

I obratno, ako je cijena drvnog ostatka manja od nule to je vrijeme povratka kapitala uloženi u energetske postrojenje kraće, tj. isplativost je veća.



Slika 14. Ovisnost vremena povratka kapitala o toplinskoj snazi pri promjeni troškova kapitalnih investicija (TKI) (1– krivulja energetskog sustava s generatorom topline, krivulje energetskog sustava s protutlačnim parnoturbinskim postrojenjem i vršnim postojećim generatorom topline u slučaju kad je 2 – $0,9 \cdot TKI$, 3 – TKI , 4 – $1,1 \cdot TKI$ krivulje energetskog sustava s kondenzacijskim parnoturbinskim agregatom i jednim oduzimanjem pare te vršnim postojećim generatorom topline u slučaju kad je 5 – $0,9 \cdot TKI$, 6 – TKI , 7 – $1,1 \cdot TKI$)

postrojenje kraće, tj. isplativost je veća. To je za slučaj protutlačnog parnoturbinskog postrojenja prikazano krivuljom 2 i točkom M1. Za slučaj kondenzacijskog parnoturbinskog postrojenja s jednim oduzimanjem pare to je prikazano krivuljom 5 i točkom K1.

f) Promjena cijene vode za ukapljivanje pare, c_v

Ovisnost vremena povratka kapitala o toplinskoj snazi različitih tipova energetskih postrojenja pri promjeni cijene vode za ukapljivanje pare prikazana je dijagramski na slici 16.

Sa slike 16 objašnjenje je sljedeće: što je cijena vode za ukapljivanje pare kod kondenzacijskog parnoturbinskog postrojenja s jednim oduzimanjem pare manja to je vrijeme povratka kapitala kraće, tj. isplativost je veća. To je prikazano krivuljom 5 i točkom K1. I obratno, što je cijena vode za ukapljivanje pare veća to je vrijeme povratka kapitala dulje, tj. isplativost je manja. To je prikazano krivuljom 4 dok je vrijeme povratka kapitala uloženo u takvo energetsko postrojenje izlazne toplinske snage 7 000 kW veće od 40 godina.

Ovdje treba napomenuti da se krivulje 3, 4 i 5 međusobno sijeku kod vrijednosti toplinske snage od 10 000 kW. To je ona vrijednost toplinske snage koja odgovara izlaznoj toplinskoj snazi protutlačnog parnoturbinskog postrojenja iz koje se kao nus-produkt razvija izlazna mehanička (električna) snaga od 2 000 kW. Ta snaga odgovara vršnoj električnoj snazi. Za vrijednosti toplinskih snaga većim ili jednakim od 10 000 kW nije nužna ugradnja niskotlačnog dijela parne turbine s kondenzatorom.

skog postrojenja iz koje se kao nus-produkt razvija izlazna mehanička (električna) snaga od 2 000 kW. Ta snaga odgovara vršnoj električnoj snazi. Za vrijednosti toplinskih snaga većim ili jednakim od 10 000 kW nije nužna ugradnja niskotlačnog dijela parne turbine s kondenzatorom.

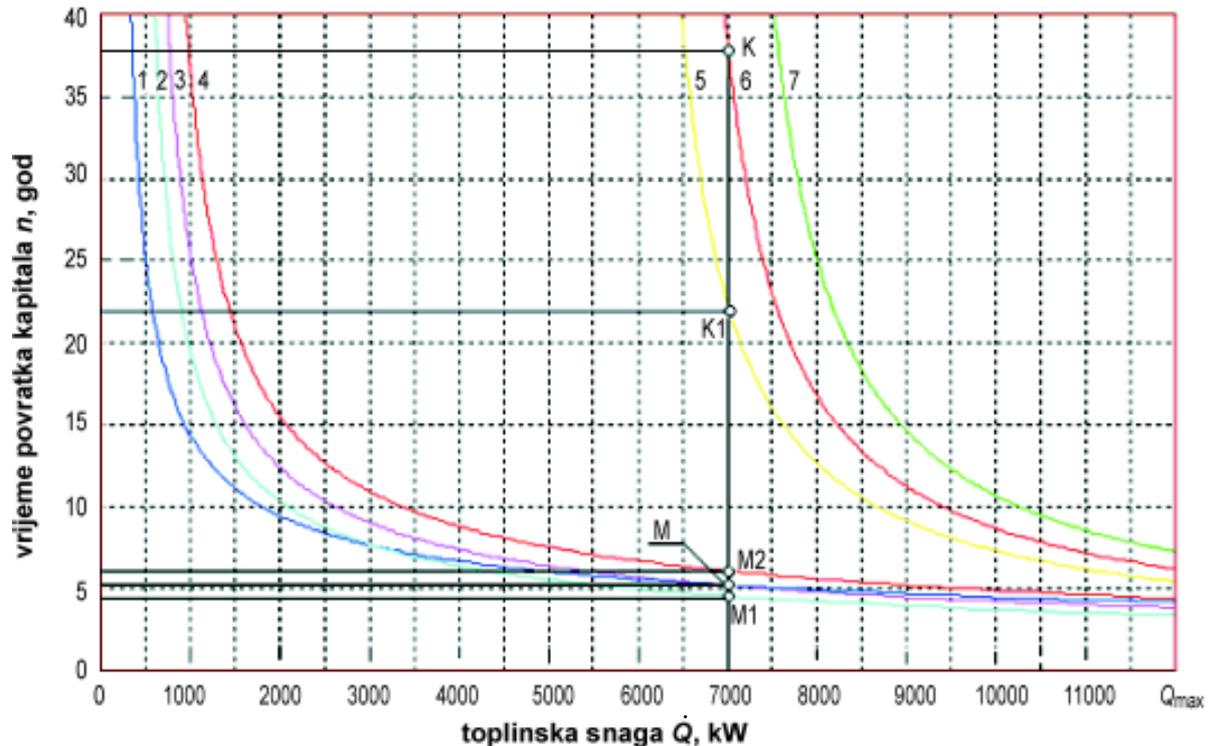
4. DISKUSIJA

U radu je postavljen matematički model za određivanje najniže toplinske snage pri kojoj zajednička proizvodnja toplinske i električne energije postaje isplativija od odvojene proizvodnje. Toplinska snaga (ili toplinska energija po jedinici vremena) je u razmatranje uzeta kao temeljna fizikalna veličina iz razloga što o bilanci potrošnje toplinske energije ovise sva ostala projektna rješenja. Jedno od tih rješenja trebala bi rezultirati optimalnim načinom opskrbljivanja s toplinskom i električnom energijom [11].

U praksi se danas prema [12 – 18] za zajedničku proizvodnju toplinske i električne energije u drvenoj industriji koriste različiti tipovi parnoturbinskih postrojenja, u ovisnosti o potrebama za toplinskom i električnom energijom. Proizvodnja električne energije u protutlačnom parnoturbinskom postrojenju ovisi o tre-

nutačnoj proizvodnji toplinske energije čime nije osigurana potpuna opskrba električnom energijom. Zbog toga će vrijeme proizvodnje električne energije, τ_w , biti jednako vremenu proizvodnje toplinske energije, τ_q .

oniranja paroturbinskog agregata na najviše toplinsko opterećenje (odnosno toplinsku snagu) koje traje mali broj sati u godini (često oko 500 do 1 000 sati) krivulje iz tih slika imale uzlaznu putanju nakon toplinske snage



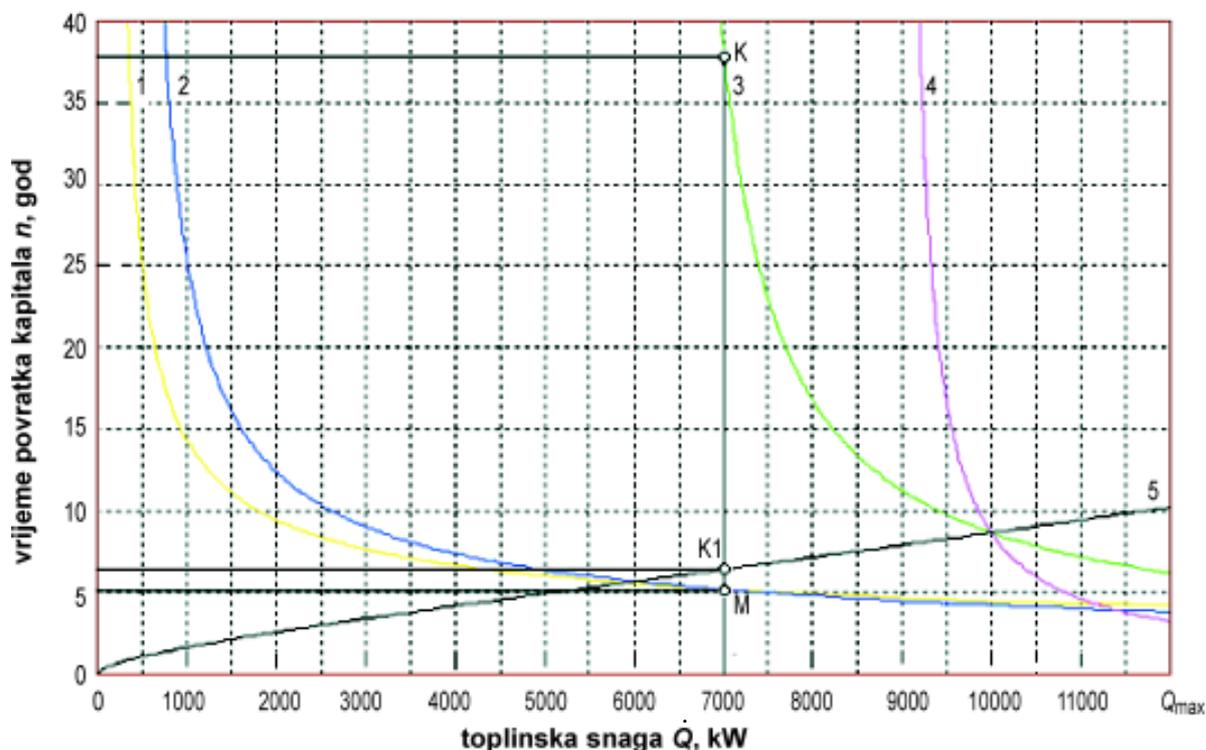
Slika 15. Ovisnost vremena povratka kapitala o toplinskoj snazi pri promjeni cijene goriva (c_g) (1 – krivulja energetskeg sustava s generatorom topline, krivulje energetskeg sustava s protutlačnim paroturbinskim postrojenjem i vršnim postojećim generatorom topline u slučaju kad je 2 – $c_g = -1$ kn/kWh, 3 – $c_g = 1$ kn/kWh, 4 – $c_g = 1$ kn/kWh krivulje energetskeg sustava s kondenzacijskim paroturbinskim agregatom i jednim oduzimanjem pare te vršnim postojećim generatorom topline u slučaju kad je 5 – $c_g = -1$ kn/kWh, 6 – $c_g = 0$ kn/kWh, 7 – $c_g = 1$ kn/kWh)

Elastično bilanciranje proizvodnje toplinske i električne energije ostvaruje se kod kondenzacijskog paroturbinskog postrojenja sa jednim (reguliranim) oduzimanjem pare. Pri tom se uzima da je izlazna električna snaga postrojenja jednaka vršnom opterećenju potrošača električne energije čime je osigurana potpuna opskrba električnom energijom. U ovom slučaju vrijeme proizvodnje električne energije, τ_w , neće biti jednako sa vremenom proizvodnje toplinske energije, τ_q . Nasuprot prednostima, ovakvo je postrojenje u odnosu na protutlačno paroturbinsko postrojenje za oko jedan i po puta investicijski skuplje zbog dodatnih troškova za niskotlačni dio paroturbinskog agregata, za kondenzator, za vlastiti utrošak energije kod cirkulacije vode te kemikalija za obradu vode rashladnog sustava.

Na slici 9 i slikama 10 – 16 vidljivo je da će pri najvišoj toplinskoj snazi, Q_{\max} , vrijeme povratka kapitala za razmatrane tipove energetskeg postrojenja biti najkraće. Napominje se da bi zbog neekonomičnosti dimenzi-

jednako $0,7 \cdot Q_{\max}$ (\rightarrow točka N i točka N' na slici 9). Stoga se preporučuje da se dobivene najniže toplinske snage nalaze ispod te navedene vrijednosti. Na konkretnom primjeru dravno-prerađivačke tvrtke dobivena najniža toplinska snaga iznosi 7000 kW što je manje od granične vrijednosti toplinske snage koja iznosi $0,7 \cdot 12000 = 8400$ kW (\rightarrow točka N i točka N' na slici 10). Kod projektiranja bi bilo poželjno uzeti tu vrijednost toplinske snage jer je vrijeme povrata kapitala za nju kraće u odnosu na najnižu vrijednost toplinske snage (što je vidljivo na slikama 10 – 15). Za vršna toplinska opterećenja koriste se postojeći ili novi vršni generatori topline.

Toplinskoj snazi od 7 000 kW odgovara mehanička snaga od $\chi \cdot Q_{\min} = 0,2 \cdot 7000 = 1400$ kW. Da bi se izračunala električna snaga postrojenja, dobivenu mehaničku snagu treba umanjiti za oko 5% radi gubitaka koji nastaju u redukturu i generatoru električne energije. Dobivena toplinska snaga smanjuje se za oko 5% zbog toplinskih gubitaka u izmjenjivaču.



Slika 16. Ovisnost vremena povratka kapitala o toplinskoj snazi pri promjeni cijene vode za ukapljivanje pare (c_v) (1 – krivulja energetskog sustava s generatorom topline, 2 – krivulja energetskog sustava s protutlačnim parnoturbinskim postrojenjem i vršnim postojećim generatorom topline, krivulje energetskog sustava s kondenzacijskim parnoturbinskim agregatom i jednim oduzimanjem pare te vršnim postojećim generatorom topline u slučaju kad je 3 – $c_v=0,003$ kn/kg, 4 – $c_v=0,01$ kn/kg, 5 – $c_v=0$ kn/kg)

Količinom drvene biomase po jedinici topline označen sa $q_{gt}, q_{vgt}, q_{pt}, q_{kt}$ ovisno o tipu energetskog postrojenja pokazuje se koliko je kilograma (ili tona) drvene biomase potrebno za odvojenu ili zajedničku proizvodnju toplinske i električne energije. Određivanjem pak količine rashladne vode po jedinici topline, K_v , ukazuje se na količinu odvedene topline kroz rashladni sustav kondenzacijskog parnoturbinskog postrojenja sa jednim oduzimanjem pare.

Promjena cijene vode za ukapljivanje pare kod kondenzacijskog parnoturbinskog postrojenja sa jednim oduzimanjem pare utječe na isplativost ulaganja u takav tip postrojenja. Što je cijena vode viša to je isplativost manja, i obratno. U slučaju kad je cijena vode jednaka nuli tada se isplativost smanjuje sa povećanjem toplinske snage. To je iz razloga što je cijena drvnog ostatka i vode jednaka nuli, a troškovi za proizvodnju toplinske energije najveći. Iz tog proizlazi da su troškovi za proizvodnju električne energije u niskotlačnom dijelu promatranog energetskog postrojenja jednaki nuli.

Kod promjene troškova kapitalnih investicija nije uzeta u obzir promjena radnih parametara svježe pare. Pretpostavka je da što su radni parametri viši to su i troškovi kapitalnih investicija veći (\rightarrow slika 14). To je iz razloga što su energetska postrojenja koja rade s višim,

odnosno visokim tlakovima i temperaturama izrađena od posebnih materijala. Iz tog proizlazi da će i konstante B i m biti različite od proračunatih.

Postupak izrade matematičkog modela izloženog u ovom radu može se također primijeniti i u ostalim tipovima industrije. Tvrtke iz drugih industrijskih sektora kao pogonsko gorivo koriste fosilna goriva, danas najčešće prirodni plin. U tom bi slučaju bilo potrebno toplinsko-ekonomski analizirati i optimizirati energetske sustave na bazi plinskih turbina i plinskih motora s ciljem utvrđivanja njihove isplativosti korištenja. Cijena fosilnog goriva na svjetskom i domaćem tržištu oscilira. U tom se slučaju pretpostavlja da bi izloženi matematički model bio nešto drugačiji.

5. ZAKLJUČAK

U ovom je radu postavljen matematički model za određivanje najniže toplinske snage pri kojoj zajednička proizvodnja toplinske i električne energije postaje isplativija od odvojene proizvodnje. Taj je model primijenjen na konkretnoj drvno-prerađivačkoj tvrtki u Hrvatskoj. Na osnovi ulaznih podataka o stanju energetskog sustava te tvrtke i parametara predloženih tipova energetskih postrojenja određena je najniža toplinska

snaga. Pri toj je snazi vrijeme povratka kapitala znatno kraće i s ekonomskog stajališta mnogo prihvatljivije kod protutlačnog parnoturbinskog postrojenja nego kod kondenzacijskog parnoturbinskog postrojenja s jednim (reguliranim) oduzimanjem pare.

Primjena postavljenog matematičkog modela na konkretnom primjeru upućuje na mogućnosti njegove primjene i na ostale drvno-prerađivačke tvrtke. Kako je postojeće energetske stanje za svaku drvno-prerađivačku tvrtku drugačije, to će i odabir toplinsko-ekonomski najpovoljnije varijante energetske sustava za zajedničku proizvodnju toplinske i električne energije biti različito, uz navođenje opravdanosti odabira. Pri tom treba obratiti pažnju na promjenu vrijednosti pojedinih veličina o kojima ovisi isplativost ulaganja. Iz ispitane osjetljivosti matematičkog modela, isplativost ulaganja u sustav zajedničke proizvodnje toplinske i električne energije povećava se u slučaju:

- više cijene električne energije kupljene od elektro-distributera,
- većeg broja sati rada potrošača toplinske energije u godini dana, jer utječe na veću isplativost ulaganja u protutlačno parnoturbinsko postrojenje,
- manjeg odnosa između broja sati rada potrošača toplinske energije i broja sati rada potrošača električne energije, jer utječe na veću isplativost ulaganja u kondenzacijsko parnoturbinsko postrojenje s jednim oduzimanjem pare,
- većeg odnosa između izlazne mehaničke (električne) snage i izlazne toplinske snage,
- nižih troškova kapitalnih investicija te manjim udjelima troškova kapitala, pogona i održavanja energetske postrojenja,
- niže cijene goriva tj. drvnog ostatka,
- niže cijene vode za ukapljivanje vode kod kondenzacijskog parnoturbinskog postrojenja s jednim oduzimanjem pare.

LITERATURA

- [1] A. BEJAN, G. TSATSARONIS, M. MORAN, "Thermal Design And Optimization", A Wiley-Interscience Publication, New York, 1996.
- [2] G. TSATSARONIS, J. PISA, "Exergoeconomic evaluation and optimization of energy systems- - application to the CGAM problem, Energy-Int. J.", Vol. 19(1994)3, pp. 287-321.
- [3] G. TSATSARONIS, "Thermoeconomic analysis and optimization of energy systems, Prog. Energy Combustion Sci.", Vol. 19(1993), pp. 227-257.
- [4] A. VALERO, et. al., "Application of the exergetic cost theory to the CGAM problem, Energy – The International Journal", 19(1993), pp. 365.
- [5] G. ZHANG, et. al., "Exergoeconomics methodology for analysis and optimization of process systems, Computers & Chemical Engineering", 24(2000), pp. 613-618.
- [6] V. URAN, "Optimiranje sustava za kombiniranu proizvodnju toplinske i električne energije u drvnjoj industri-

ji", Magistarski rad, Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet, 2003.

- [7] B. STANIŠA, "Primjena parnoturbinskih postrojenja za zajedničku proizvodnju toplinske i električne energije u drvnjoj industriji", Stručni skup *Energetika u drvnjoj industriji*, Zbornik radova, Zagreb, listopad 2002., str. 1-15.
- [8] Z. PRELEC, "Energetika u procesnoj industriji", Školska knjiga, Zagreb, 1994.
- [9] Dokumentacija drvno-prerađivačke tvrtke DI "Spačva" d.d. Vinkovci, 2001.
- [10] M. KLEPO, et al., "KUEN-cts: Program energetske efikasnosti centraliziranih toplinskih: sustava: prethodni rezultati i buduće aktivnosti", Energetski institut "Hrvoje Požar", Zagreb, travanj 1998.
- [11] B. STANIŠA, "Povećanje učinkovitosti drvnoprerađivačke industrije zajedničkom proizvodnjom toplinske i električne energije", 4. Međunarodna Naučna konferencija o proizvodnom inženjerstvu, "RIM 2003. – Razvoj i modernizacija proizvodnje, Bihać, 25-27. Septembar 2003., Zbornik radova, str. 475-480.
- [12] G. WILTSEE, "Biomass-Fueled Cogeneration Systems", US Department of Energy, New York, 1993.
- [13] B. STANIŠA, M. ANIĆ, "Primjena parnih turbina u drvnjoj industriji", *Strojstvo* 31(1989)1, str. 65-76.
- [14] "A Multi-purpose Bioenergy Plant Producing Electricity, Heat and Biopellets", *CADDET Renewable Energy, IEA/OECD*, 2000., Technical Brochure No. 136
- [15] "Wood for Energy Production", Published by Dansih Energy Agency, 2001., pp. 9-16
- [16] M. PALONEN, "New Small-Scale CHP Plant for Biomass Fuels", *CADDET Finnish National Team*, December 1999., pp. 23-25.
- [17] V. URAN, "Iskorištavanje drvnog ostatka za proizvodnju toplinske i električne energije", *Energija* 51 (2002) 4, str. 299-310.
- [18] "Projekti malih termoeenergetskih objekata u Hrvatskoj", Hrvatska elektroprivreda, Zagreb, srpanj, 1996.

OPTIMISATION OF HEAT AND ELECTRIC ENERGY COGENERATION IN THE WOOD INDUSTRY

Wood industry is one of the strategic export branches for the Croatian economy. Prices and costs of energy significantly influence the competitiveness of products of certain wood processing companies. Based on an analysis of heat and electric energy consumption in wood industry, and assumptions and barriers, a mathematical model for heat-economical optimisation of the system for heat and electric energy cogeneration using woody biomass as fuel is developed. This mathematical model is used to determine the lowest heat power by which cogeneration of heat and electricity becomes payable compared to separate production. Pay off investment in cogeneration of electric and heat production is determined based on pay back period of capital as a value depending on heat power value. The application of the mathematical model is based on an example from wood processing industry in Croatia. The sensitivity of the model is tested by input values change that influence the pay back period in the system of heat and electric energy cogeneration. In the text, discussion and conclusions follow.

DIE OPTIMIERUNG DER GEMEINSAMEN ERZEUGUNG VON WÄRME UND STROM IN DER HOLZBEARBEITUNGSINDUSTRIE

Die Holzbearbeitungsindustrie stellt einen der wichtigsten Exportwirtschaftszweige in der kroatischen Wirtschaft dar. Der Energiepreis und die Energiekosten beeinflussen wesentlich die Wettbewerbsfähigkeit einzelner Holzbearbeitungsunternehmen. Auf Grund der Erörterung des Wärme- und Stromverbrauches in der Holzbearbeitungsindustrie, unter Berücksichtigung maßgebender Voraussetzungen und Vorbedingungen, ist ein mathematischer Modell der energiewirtschaftlichen Optimierung des, Holzbiomasse als Betriebsheizmittel nutzenden, Systems der gemeinsamen Strom- und Wärmeerzeugung,

gestellt worden. Mit diesem mathematischen Model ist die niedrigste Erzeugung der Wärme, bei welcher sich eine gemeinsame Wärme-Strom Produktion im Bezug auf Einzelerzeugungen lohnt, festgestellt. Die Wirtschaftlichkeit des Investierens in ein solches System der gemeinsamen Strom- und Wärmeerzeugung wird

auf Grund der Rückgewinnungszeit des Kapitals in Abhängigkeit vom Wert der erzeugten Wärme bestimmt. Die Anwendung dieses Modells ist am Beispiel eines kroatischen Holzbearbeitungsunternehmens gezeigt worden. Die Empfindlichkeit dieses Modells ist durch Änderungen von auf die Wirtschaftlichkeit der Investition wirkenden Einflußgrößen festgestellt. Am Ende findet eine Diskussion und die Formulierung der Beschlüsse statt.

Naslov pisca:

**Mr. sc. Vedran Uran, dipl. ing.
EETEK d.o.o.
Ilica 52
10000 Zagreb, Hrvatska**

Uredništvo primilo rukopis:
2004 – 04 – 30.