

## MOGUĆNOST KORIŠĆENJA HIDROENERGETSKOG POTENCIJALA VODE ZA HLAĐENJE TERMoeLEKTRANA

Ljubodrag SAVIĆ, Vladan KUZMANOVIĆ, Tina DAŠIĆ, Bojan MILOVANOVIĆ  
Građevinski fakultet, Univerzitet u Beogradu  
Vladimir STEVANOVIĆ, Aleksandar GAJIĆ, Blaženka MASLOVARIĆ, Sanja PRICA  
Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu  
Dušan ARNAUTOVIĆ  
Elektrotehnički institut "Nikola Tesla"

### REZIME

U radu je prikazana mogućnost korišćenja hidroenergetskog potencijala rashladne vode termoelektrane sa otvorenim sistemom hlađenja. Rashladna voda otiče gravitaciono do recipijenta - reke, zbog čega se u periodu nižih vodostaja javlja pad koji je moguće iskoristiti u maloj hidroelektrani. Takva hidroelektrana radi sa promenljivim padom i približno konstantnim protokom, i to samo u periodima kada radi i termoelektrana. Konceptcija je prikazana na primeru male hidroelektrane koja će koristiti hidroenergetski potencijal rashladne vode TE "Nikola Tesla B". Određeni su ekonomski pokazatelji ove hidroelektrane i ocenjeno je povećanje profitabilnosti imajući u vidu da postrojenje može biti ostvareno u okviru Clean Development Mechanism (CDM) projekta, u skladu sa Kjoto protokolom. Dobijeni rezultati pokazuju da je projekat ekonomski prihvatljiv, a moguće ga je ostvariti sa standardnim hidroturbinama dostupnim na tržištu.

**Ključne reči:** hidroenergija, rashladna voda, termoelektrane, mala hidroelektrana

### 1. UVOD

Veliki deo prirodnog hidroenergetskog potencijala za proizvodnju električne energije je već iskorišćen, posebno u razvijenim zemljama [1]. Zbog toga, poslednjih godina, raste interesovanje za korišćenje energetskog potencijala malih vodotoka, kao i za druge alternativne izvore energije [2,4], kao što su morski talasi [5], energija vetra, biomase i dr. Mogućnost energetskog korišćenja malih vodotoka u Srbiji sagledana je u okviru Katastra malih hidroelektrana [7],

kojim je obuhvaćeno 856 potencijalnih lokacija za izgradnju malih hidroelektrana (MHE), snage manje od 10 MW.

Pored ovih prirodnih izvora, postoji mogućnost da se iskoristi i hidroenergetski potencijal u postojećim tehničkim sistemima. Naravno, ovakva rešenja moraju apriori zadovoljiti nekoliko uslova:

- ne smeju ni na koji način ugroziti rad osnovnog tehničkog sistema,
- moraju biti ekološki prihvatljivi,
- moraju biti energetski i ekonomski isplativi.

Sistemi za hlađenje termoelektrana (TE) i nuklearnih elektrana su tehnički sistemi kod kojih postoji mogućnost korišćenja stvorenog hidroenergetskog potencijala. Rashladna voda za ove elektrane se, uglavnom, zahvata iz prirodnih izvora (reke, jezera ili mora) i zagrejana voda se u njih vraća. Nakon prolaska kroz rashladni sistem voda se nalazi na višoj koti od recipijenta do koga se obično transportuje gravitaciono. Zbog velike količine vode koja se koristi u rashladnim sistemima ovih elektrana kao i stvorenog pada, na izlazu iz postrojenja koncentrisan je značajan hidropotencijal koga je moguće energetski iskoristiti.

Obezbeđivanje rashladne vode je neophodan uslov za rad termo ili nuklearnih elektrana pa se energetski potencijal rashladne vode (koja je uvek dostupna u toku rada postrojenja) može smatrati obnovljivim energetskim izvorom. U svetu postoji nekoliko primera korišćenja ovog potencijala. Hidroenergetski potencijal rashladne vode (morska voda) TE u Južnoj Koreji, koristi se u MHE instalisane snage 7,5 MW. Drugi primer je MHE sa dve turbine snage 5 MW, koja koristi rashladnu vodu nuklearne elektrane Kozloduj (sa dve

jedinice, kapaciteta 1000 MW) [6] u Bugarskoj. Rashladna voda za ovu NE zahvata se iz Dunava.

U ovom radu prikazana je mogućnost korišćenja hidroenergetskog potencijala rashladne vode u TE "Nikola Tesla B". Voda za hlađenje se zahvata iz reke Save, pumpa u rashladni sistem i nakon iskorišćenja gravitaciono se vraća nazad u reku. Raspoloživi energetska potencijal određuje se na osnovu neto pada (koji značajno varira u zavisnosti od nivoa vode u recipijentu - reci Savi) i protoka (koji je uglavnom konstantan). Naravno, razmatrani hidropotencijal koncentriše se samo u periodima kada TE radi, pa se u periodima remonta i planiranih isključenja termoelektrane ne raspolaže ovim potencijalom. U nastavku je prikazana analiza uticaja promene neto pada i godišnjeg operativnog plana TE na energetska potencijal rashladne vode. Analiza je urađena na osnovu statističkih podataka za period od dve decenije. Ovako koncentrisani energetska potencijal koristi se u maloj hidroelektrani, za koju su određeni tehnički, energetska i ekonomski parametri.

## 2. MOGUĆNOSTI ENERGETSKOG KORIŠĆENJA RASHLADNE VODE TERMOELEKTRANE

Korišćenje energije rashladne vode iz TE razlikuje se od konvencionalnog načina korišćenja energije vodenih tokova po nekoliko parametara. Velike termoelektrane pokrivaju bazni deo dijagrama opterećenja, što znači da rade sa konstantnim opterećenjem tokom većeg dela godine. Zbog toga je i protok rashladne vode praktično konstantan u periodu rada TE, za razliku od vodotoka, na kojima protok značajno varira. U periodu remonta i planiranih isključenja TE protok rashladne vode u potpunosti prestaje. Kota vode na izlazu iz rashladnog sistema TE je konstantna, pa pad koji se koncentriše zavisi od nivoa vode u recipijentu. S obzirom da se nivo vode u reci značajno menja u vremenu i raspoloživi pad je promenljiv, za razliku od malih HE na vodotocima, gde je ta vrednost uglavnom konstantna.

Imajući u vidu sve napred navedeno, analiza energetska korišćenja rashladne vode sprovedena je kroz nekoliko osnovnih koraka:

- Određivanje krive trajanja bruto pada (između izlaza vode iz TE i nivoa vode u reci) korišćenjem raspoloživih hidroloških podataka.
- Određivanje raspoloživog neto pada na osnovu bruto pada i energetska gubitaka na toku vode od izlaza iz TE do recipijenta.

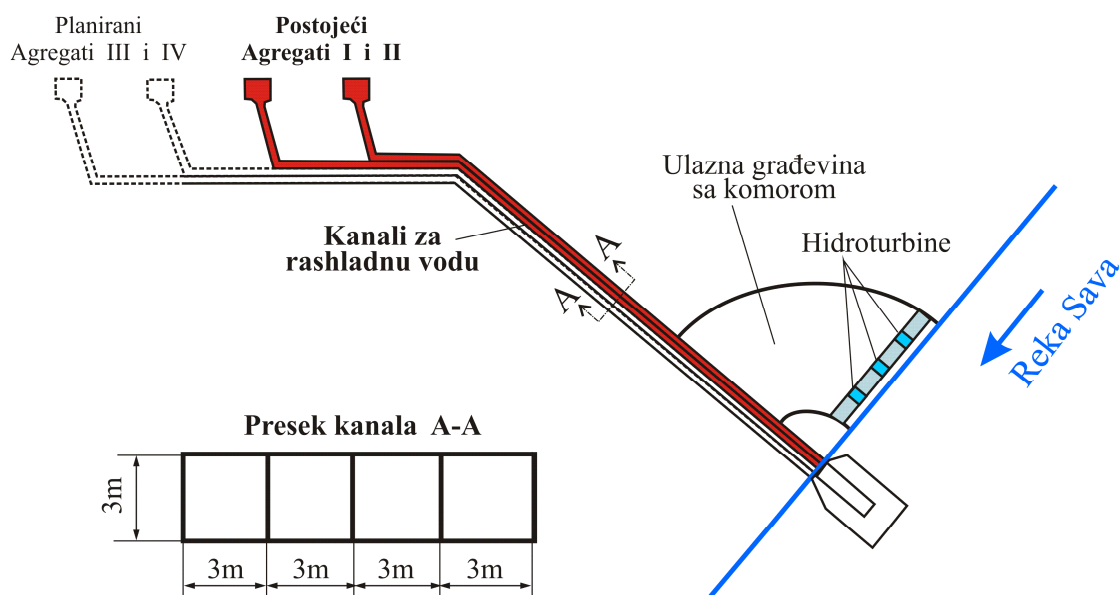
- Izbor turbine vrši se na osnovu definisanih parametara (protoka, minimalne i maksimalne vrednosti neto pada).
- Energetska proizvodnja se određuje na osnovu definisanih parametara postrojenja (krive trajanja neto pada, maksimalnog i minimalnog pada sa kojima turbina može raditi, protoka vode, koeficijenta korisnog dejstva MHE), kao i planiranih i neplaniranih perioda isključenja TE.
- U okviru građevinskog dela sprovodi se analiza i izbor lokacije mašinske zgrade i dimenzionisanje svih objekata (mašinske zgrade i pratećih objekata sa hidromašinskom opremom).
- Ekonomska analiza isplativosti razmatranog sistema sprovodi se na osnovu ukupnih troškova (troškovi opreme, građevinskih radova, operativnih troškova i troškova održavanja) i dobiti od proizvodnje električne energije. U ovoj analizi uzima se u obzir i činjenica da razmatrani sistem doprinosi smanjenju emisije ugljen-dioksida (spada u grupu Clean Development Mechanisms (CDM) projekata) čije su dobiti definisane Kjoto protokolom.

Opisani postupak primenjen je za analizu energetska potencijala rashladne vode TE "Nikola Tesla B", sa otvorenim sistemom za hlađenje vode, koja kao pogonsko gorivo koristi uglj.

## 3. SISTEM ZA HLAĐENJE TE „NIKOLA TESLA B“

TE "Nikola Tesla B" sastoji se od dve identične jedinice (dva identična termoagregata), svaka snage 620 MW. Toplotna jedinica postrojenja ima dva kondenzatora: glavni – za kondenzaciju vodene pare koja izlazi iz glavne turbine, i pomoćni – za malu turbinu koja pokreće pumpe parnog kotla. Ovi kondenzatori se hlade vodom iz reke Save. Vodu u sistemu za hlađenje obezbeđuju dve paralelno povezane pumpe. Nakon prolaska kroz rashladni sistem, voda se prikuplja u rezervoar iz koga, kroz betonske kanale pravougaonog poprečnog preseka, gravitaciono teče nazad u reku. Pad, koji je koncentrisan zbog razlike nivoa vode u rezervoaru i nivoa vode u reci Savi, kao i značajan protok rashladne vode, koji iznosi 20 m<sup>3</sup>/s po termoagregatu, stvaraju energetska potencijal koji se može iskoristiti u maloj HE.

Betonski kanali kojima se voda transportuje od rezervoara rashladne vode TE do izlazne građevine na obali reke prikazani su na slici 1.



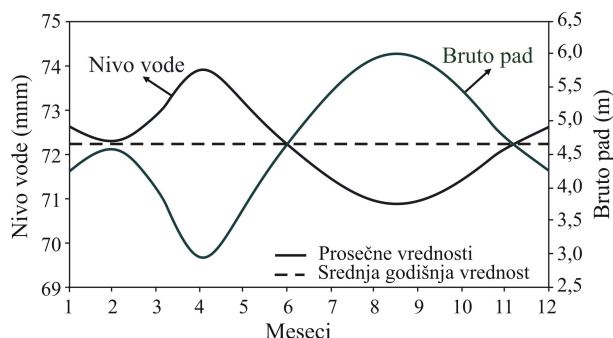
Slika 1. Kanali za rashladnu vodu, kojima se voda odvodi od bazena rashladne vode do reke

Postoje četiri kanala, po jedan za dva postojeća agregata TE, dok su preostala dva kanala izgrađena za dva planirana agregata. U ovom trenutku, u pripremi je izgradnja još jedne (treće jedinice TE), čiji je hidroenergetski potencijal uzet u obzir pri planiranju male HE. Svi kanali imaju isti kvadratni poprečni presek dimenzija 3m×3m, dok je njihova dužina različita zbog različitih rastojanja između termoagregata i izlazne građevine na obali reke. Planirana lokacija male HE prikazana je na slici 1.

#### 4. ODREĐIVANJE NETO PADA

Bruto pad ( $H_B$ ), predstavlja razliku nivoa vode uzvodno, u rezervoaru rashladne vode ( $H_U$ ) i nizvodnog nivoa vode u reci ( $H_N$ ). Nivo vode u rezervoaru je konstantan, pa bruto pad zavisi od nivoa vode u reci Savi. Analizirajući nivoe u reci za period od 20 godina (1986. – 2006.) uočava se da su najviši nivoi u proleće (u aprilu), a najniži krajem avgusta i početkom septembra.

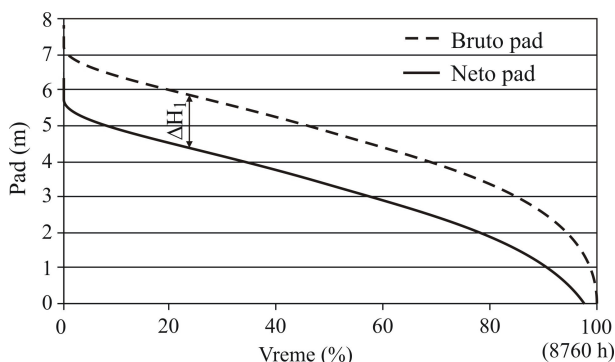
Ovi podaci se koriste za izračunavanje godišnje promene bruto pada, a rezultati su predstavljeni na slici 2. Najveći bruto pad je na kraju leta, zbog najnižih nivoa reke u tom periodu.



Slika 2. Prosečni nivoi vode u reci Savi tokom godine i prosečan bruto pad (određeno na osnovu dnevnih podataka nivoa vode u periodu 1986-2006)

Energetski gubici od rezervoara rashladne vode do mašinske zgrade MHE objedinjavaju linijske gubitke (na trenje) i lokalne gubitake (na izlazu iz rezervoara, na krivinama i na ulazu u komoru ulazne građevine). Za procenjenu hrapavost obloge kanala od ~1,0 mm, dužine kanala od 470 m, 545 m i 620 m i protok od 20 m<sup>3</sup>/s po kanalu, energetski gubitak  $\Delta H$  iznosi 1,2 m, 1,3 m i 1,4 m za agregate 1, 2 i 3. Krive trajanja bruto i neto pada, na osnovu raspoloživih podataka za reku Savu, date su na slici 3. Maksimalni neto pad iznosi 6 m, dok je srednja vrednost neto pada 3,2 m (izračunata na osnovu srednjeg bruto pada i maksimalnih gubitaka).

Oko 56% od maksimalne vrednosti energetske gubitaka (od 1,4 m) nastaje usled trenja duž kanala, dok su preostali gubici posledica lokalnih otpora. Ovakvi, relativno veliki, gubici mogli bi se smanjiti povećanjem poprečnog preseka kanala za rashladnu vodu (čime bi se smanjile brzine). Međutim, građevinski radovi na rekonstrukciji postojećih kanala nisu mogući, zbog postojeće infrastrukture termoelektrane, kao i potrebe da se postrojenje zatvori tokom ovih radova. Ovo je jedno od ograničenja koje nameće izgradnja MHE na postojećem tehničkom sistemu.



Slika 3. Krive trajanja bruto i neto pada između bazena rashladne vode TE i reke Save (na osnovu dnevnih podataka u periodu 1986-2006)

## 5. IZBOR HIDROTURBINE I PROIZVODNJA ELEKTRIČNE ENERGIJE

U slučajevima kada treba energetske iskoristiti mali pad (u rasponu od 2,5 m do 5 m) i relativno veliki protok (od  $2 \times 20 = 40 \text{ m}^3/\text{s}$ , ako se koristi rashladna voda dva termoagregata, odnosno  $3 \times 20 = 60 \text{ m}^3/\text{s}$  ako se računa i treći termoagregat čija se izgradnja planira) moguće je koristiti aksijalne turbine kao što su Kaplanova, propelerne i cevna turbina [3]. Pošto MHE treba da rade sa promenljivim opterećenjem, propelerne turbine nisu razmatrane (njihov koeficijent korisnog dejstva značajno opada sa odstupanjem od optimalnih režima rada). Planirana je primena sinhronog generatora, koji će biti vezan na sistem sopstvene potrošnje TE.

Kada je reč o izboru broja agregata zaključeno je da je sa stanovišta pouzdanosti najbolje da svaka jedinica TE (svaki termoagregat) snabdeva po jedan hidroagregat. Na taj način ispad jednog agregata TE ili MHE ima najmanji uticaj na energetske proizvodnje razmatrane MHE. Sa druge strane, instaliranje više od jednog hidroagregata po jednom termoagregatu značajno bi povećalo investicione troškove.

Razmatrano je nekoliko tipova Kaplanovih i cevnih turbina različitih proizvođača, koje rade sa protokom od  $20 \text{ m}^3/\text{s}$  i padom u rasponu od 2,5 m do 5 m. Iako su, u zavisnosti od proizvođača, radne karakteristike različite, za proračun energetske proizvodnje usvojena je turbina čiji koeficijent korisnog dejstva iznosi 0,82. Ovaj kkd postrojenja je proizvod kkd turbine, multiplikatora broja obrtaja i sinhronog generatora. Agregati u MHE su identični, a instalisana snaga svakog agregata iznosi 800 kW. Projekat čitave MHE prikazan je u narednom poglavlju.

Proračun godišnje energetske proizvodnje određen je na osnovu sledećeg izraza:

$$E_{el} = 8,76 \cdot \rho \cdot g \cdot Q \cdot \eta_{HE} \cdot \int_0^1 H(x) dx - \Delta E_r \quad (1)$$

gde je:

8,76 - broj časova u jednoj godini izražen u hiljadama časova ( $10^3 \text{ h}$ )

Q - protok ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$\eta_{HE}$  - prosečan koeficijent korisnog dejstva – kkd postrojenja

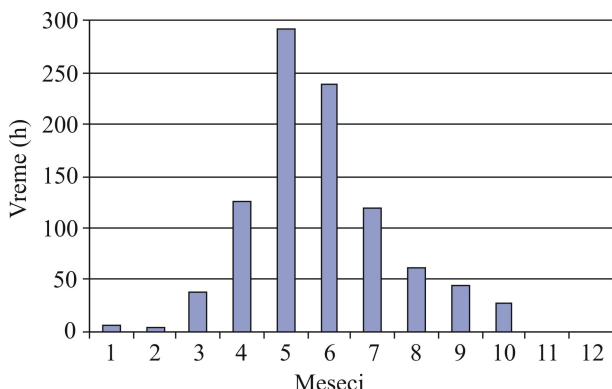
$H(x)$  - neto pad koji je moguće iskoristiti u MHE, a koji je ograničen sa maksimalnom ( $H_{n,max}$ ) i minimalnom ( $H_{n,min}$ ) vrednošću. Određuje se korišćenjem izraza:

$$H(x) = \begin{cases} H_{n,max} & ; \quad H_n(x) > H_{n,max} \\ H_n(x) & ; \quad H_{n,min} \leq H_n(x) \leq H_{n,max} \\ 0 & ; \quad H_n(x) < H_{n,min} \end{cases} \quad (2)$$

Neto pad zavisi od trajanja označenog sa x, a koje se određuje na osnovu krive trajanja prikazane na slici 4.

$\Delta E_r$  - predstavlja redukciju proizvodnje električne energije, odnosno energiju koja se ne može proizvesti zbog planiranih i neplaniranih perioda zastoja, tokom kojih ne postoji protok rashladne vode. Ovi periodi analizirani su za oba agregata TE "Nikola Tesla B", za period od puštanja postrojenja u rad do danas, a rezultati su prikazani na slici 4. Redukcija proizvodnje električne energije obračunava se uzimajući u obzir broj časova zastoja po svakom mesecu tokom godine i raspoloživi neto pad po mesecima (koji se određuje na osnovu bruto pada, slika 2). Sa slike 4 jasno je da su najduži periodi zastoja termoagregata tokom maja i juna. Međutim, u maju MHE ne radi jer su nivoi vode u reci visoki, pa je neto pad manji od 2,5 m, što je minimalna vrednost sa kojom agregat može da radi. Sa druge strane, u junu su nivoi vode u reci niži, neto pad je

veći, pa je to mesec sa najvećom vrednošću redukcije u proizvodnji električne energije. Ukupna godišnja vrednost redukcije za jedan agregat iznosi 0,3052 GWh.



Slika 4. Prosečni mesečni periodi zastoja agregata TE "Nikola Tesla B", određeni na osnovu podataka prikupljenih tokom rada agregata od njihovog priključenja na mrežu (agregat 1 - 1984, agregat 2 - 1986) do juna 2007.

U tabeli 1 prikazani su rezultati proračuna energetske proizvodnje MHE određeni na osnovu jednačine (1) u zavisnosti od broja agregata koji su u pogonu. U slučajevima kada radi više od jednog agregata neto pad je usvojen kao minimalna vrednost neto pada agregata koji su u pogonu.

Tabela 1. Godišnja proizvodnja električne energije u MHE u zavisnosti od broja termoagregata koji su u pogonu

Termoagregati u pogonu	God. proizvodnja el. en. $E_{el}$ (GWh/god)
agregat 1	3,88
agregat 2	3,78
agregat 1+2	7,45
agregat 1+2+3	10,83

Uticao promene temperature vode na izlazu iz rashladnog sistema, odnosno temperature vode sa kojom radi MHE, na energetska proizvodnju nije veći od 0,6% na godišnjem nivou. Naime, temperatura vode na izlazu iz rashladnog sistema varira između 8°C zimi i 35°C u letnjem periodu. S obzirom da gustina vode zavisi od temperature i ona se menja od 999,85 kg/m<sup>3</sup> na 8°C do 994,04 kg/m<sup>3</sup> na 35°C, što iznosi manje od 0,6%. Pošto je energetska proizvodnja linearna funkcija gustine vode, znači da ni promena energetske proizvodnje nije veća od 0,6%.

Temperaturne promene značajno utiču na viskoznost rashladne vode, ali je uticaj viskoznosti na promenu pada zanemarljiv jer koeficijent trenja za tečenje u kanalima sa rapavim zidovima ne zavisi od viskoznosti za velike vrednosti Rejnoldsovog broja, kao što je to prikazano na Moody-ovom dijagramu [3]. Minimalna vrednost Rejnoldsovog broja za razmatranu MHE iznosi  $4,8 \times 10^6$  na 8°C, a relativna rapavost je 0,0003 (izračunata kao odnos rapavosti zidova od 0,001 m i hidrauličkog radijusa od 3 m). Prema Moody-ovom dijagramu koeficijent trenja ne zavisi od Rejnoldsovog koeficijenta za vrednosti veće od  $4 \times 10^6$  i izračunatu vrednost relativne rapavosti od 0,0003.

Promena temperature vode utiče na neophodnu dubinu potapanja turbine, koja se računa prema izrazu:

$$H_s = \frac{p_{atm} - p_v}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} - \sigma H_n \quad (3)$$

gde je:

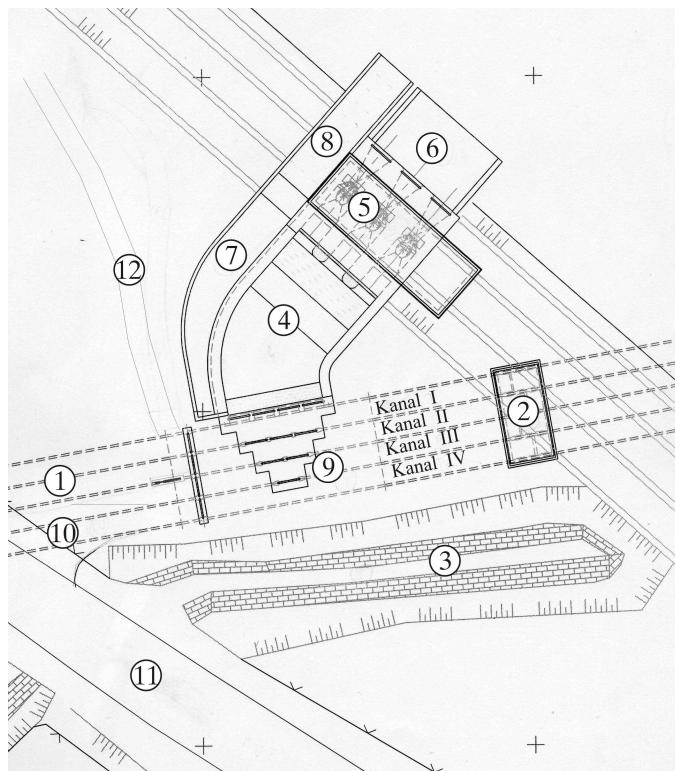
- $p_{atm}$  - atmosferski pritisak
- $p_v$  - pritisak zasićenja vodene pare
- $v$  - prosečna brzina na izlazu iz turbine
- $\sigma$  - koeficijent kavitacije
- $H_n$  - neto pad

Promena pritiska zasićenja vodene pare sa 0,0107 bar za 8°C na 0,0563 za 35°C i odgovarajuće promena gustine vode utiču na smanjenje prvog dela jednačine (3) za 0,47, pa se proporcionalno smanjuje i vrednost  $H_s$ . Prema tome, parametre hidroturbine treba definisati prema vrednosti  $H_s$  određenoj za najvišu moguću temperaturu rashladne vode.

## 6. KONSTRUKCIJA MAŠINSKE ZGRADE

Osnovni zahtev pri izboru lokacije mašinske zgrade i pratećih objekata bio je da se ovim objektima ne ugrozi rad TE "Nikola Tesla B" i da se zadovolje uslovi definisani za reku Savu nizvodno od postrojenja. Pored ovog osnovnog zahteva, morala su se zadovoljiti i ograničenja vezana za lokacije postojećih objekata TE, korišćenje raspoložive opreme, uz minimizaciju troškova vezanih za građevinske radove.

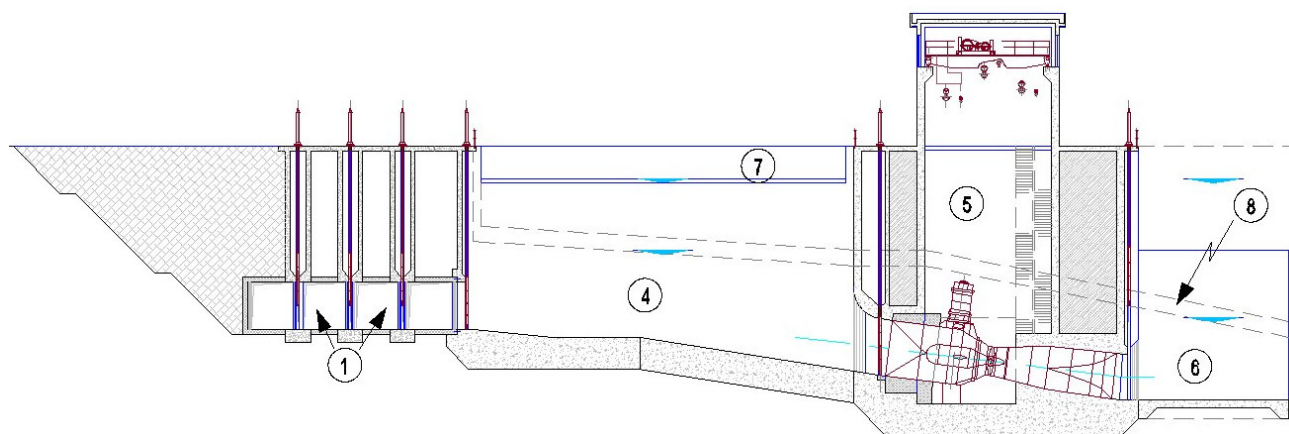
Značajan uticaj na dispoziciju objekta imao je uslov da buduća MHE ne sme da ugrozi rad TE, odnosno protok rashladne vode ni tokom izgradnje, kao ni kasnije tokom eksploatacije sistema. Zbog toga je dovod vode do mašinske zgrade izveden u vidu kratkog bajpasa čiji se protok reguliše sistemom ustava. Na slici 5 prikazana je osnova MHE sa pratećim objektima. U slučaju naglog zaustavljanja protoka kroz MHE voda se evakuše



## Legenda:

1. Tok rashladne vode
2. Postojeća izlazna građevina
3. Postojeći zemljani kanal
4. Ulazna građevina sa komorom
5. Mašinska zgrada
6. Izlaz vode
7. Sigurnosni preliv
8. Brzotok
9. Plato za ustave
10. Pristup mašinskoj zgradi
11. postojeći put
12. Cevovod za grejanje opreme na zahvatu tokom ekstremno hladnih dana

Slika 5. Osnova mašinske zgrade MHE.



Slika 6. Presek kroz mašinsku zgradu MHE (legenda uz sliku 6)

prelivom, lociranim u levom boku ulazne građevine sa komorom, koji se nastavlja brzotokom na čijem se kraju nalaze elementi za rasipanje energije (slika 6).

Preusmeravanje toka rashladne vode prema mašinskoj zgradi i hidroagregatima ostvaruje se radom ustava.

Zbog toga je neophodno napraviti otvore u zidovima kanala u koje će se ugraditi automatske ustave. Pored toga, neophodno je rekonstruisati postojeću izlaznu građevinu i ugraditi nove regulacione ustave. Kroz ovu izlaznu građevinu propuštaće se vode direktno u reku Savu u periodima kada MHE ne radi.

Dimenzije ulazne građevine i komore izabrane su tako da se iskoristi maksimalni raspoloživi pad (slika 6). Pored toga, dimenzije komore omogućavaju povoljne hidrauličke uslove za eksploataciju MHE, posebno u periodima pokretanja i zaustavljanja agregata. Ploča i zidovi kanala dimenzionisani su tako da zadovolje uslove stabilnosti tokom izgradnje i eksploatacije, posebno imajući u vidu veoma nepovoljan uticaj uzgona tokom visokih nivoa u reci Savi.

U periodu izgradnje MHE tok rashladne vode preusmeravaće se kroz postojeće kanale, što je moguće s obzirom da su od postojeća četiri kanala samo dva u funkciji (za postojeća dva termoagregata). Izgradnja MHE obaviće se u toku remonta termoagregata, a planirano je da traje oko 4 meseca, uz jedan mesec pripremnih radova. Glavni radovi podeljni su na tri faze:

- Faza I - izgradnja komore, mašinske zgrade i sigurnosnog brzotoka. Objekti na reci Savi će se raditi tokom malovodnog perioda pod zaštitom zagata, što će se obaviti u okviru pripremnih radova ili faze I, u zavisnosti od hidroloških uslova (nivoa vode).

Druga grupa radova, koja se izvodi paralelno sa prvom u periodu remonta drugog termoagregata, odnosi se na rekonstrukciju postojećih kanala rashladne vode II, III i IV, sa ugradnjom svih potrebnih ustava u kanalu II (slika 5).

- Faza II počinje nakon završetka I faze, u periodu remonta prvog termoagregata. Protok rashladne vode iz kanala II preusmerava se u kanal III pomoću ugrađenih ustava, omogućavajući rad na kanalima I i II. U toku ove faze izvršiće se rekonstrukcija kanala I i ugraditi potrebne ustave. Pored toga izvršiće se radovi na zidovima kanala I i ugraditi ustave na zidu između kanala I i II i na zidu između kanala I i zahvatne građevine.

- Faza III podrazumeva punjenje kanala, izgradnju platoa i pristupnog puta.

## 7. UTICAJ NA ŽIVOTNU SREDINU

Temperatura vode reke Save, u prirodnim uslovima, značajno varira, sa minimalnim vrednostima u januaru i februaru, a maksimalnim u julu i avgustu. Prosečna godišnja temperatura iznosi oko 12,7°C, maksimalna prosečna mesečna temperatura je 23°C, a maksimalna dnevna temperatura iznosi 29°C.

Najznačajniji uticaj TE "Nikola Tesla B" na temperaturni režim reke Save javlja se u periodima

niskog protoka vode i visokih temperatura. Režim rada TE uslovljen je režimom reke Save na dva načina:

- količina vode koja se zahvata za rashladni sistem mora biti manja od 25% od trenutnog rečnog protoka,
- temperatura vode reke Save posle mešanja sa vodom iz rashladnog sistema ne sme biti veća od 28°C.

Na osnovu raspoloživih podataka, može se zaključiti da se temperatura vode nakon prolaska kroz rashladni sistem povećava u proseku za oko 9,4°C. S obzirom da se temperatura vode reke Save na potezu između ispusta rashladne vode TE "Nikola Tesla B" u Savu i zahvata za rashladnu vodu TE "Nikola Tesla A" ne meri, uticaj termičkog zagađenja sagledan je na profilu koji je oko 17 km nizvodnije (zahvat TE "Nikola Tesla A"). Analizom raspoloživih podataka uočava se da se temperatura vode povećava u proseku za oko 1°C

Planirano je da razmatrana MHE iskoristi celokupnu količinu rashladne vode iz termoelektrane, što ne bi trebalo da utiče na promenu srednje profilske temperature reke Save. Međutim, brzina vode na mestu uliva u reku će se smanjiti (zbog korišćenja energije toka), pa će se smanjiti i mogućnost mešanja tople vode sa vodom reke Save. Zbog toga se može očekivati da se tok toplije vode formira bliže desnoj obali i da proces mešanja bude nešto manjeg intenziteta nego u sadašnjim uslovima.

Oko 10 kilometara nizvodno od ispusta tople vode vodeni tok nailazi na oštru desnu krivinu (sa spoljašnjim uglom od oko 140°), što uslovljava pojavu značajnog helikoidnog strujanja, što dalje uslovljava mešanje vode po poprečnom preseku. S obzirom da na delu između TE "Nikola Tesla B" i TE "Nikola Tesla A" nisu vršena merenja rasporeda temperature vode po poprečnim profilima, nije moguća nikakva preciznija ocena promene struje tople vode.

Zbog svega napred navedenog može se pretpostaviti da uticaj novog objekta neće biti značajan i da će biti ograničen na dužinu od oko 10 km nizvodno od ispusta tople vode.

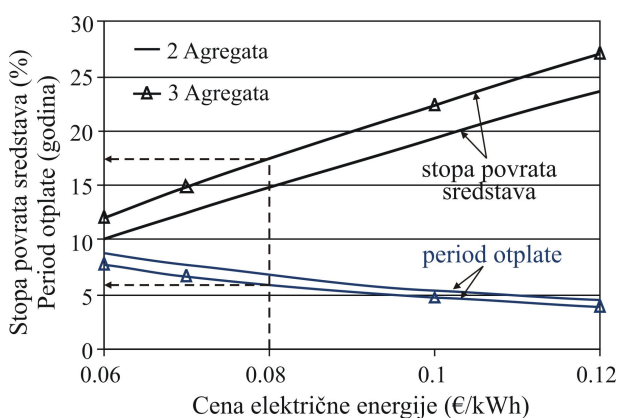
## 8. EKONOMSKA OCENA

Ekonomska isplativost izgradnje MHE analizirana je preko dva parametra: interne stope povrata sredstava ( $i_{RR}$ ) i perioda otplate (SPBP). Ovi pokazatelji određeni su na osnovu ukupnih troškova (investicionih troškova i troškova rada i održavanja) i moguće energetske proizvodnje postrojenja.

Razmatrane su dve varijante:

- HE sa dva agregata (po jedan za svaki postojeći termoagregat),
- HE sa tri agregata (još jedan dodatni agregat za treći planirani termoagregat).

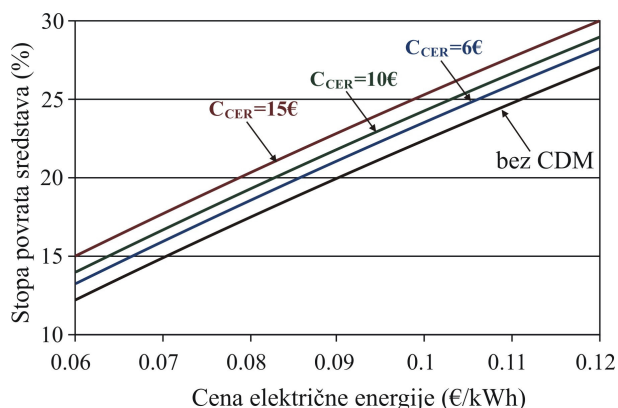
Proračun je urađen za različite cene električne energije od 0,06 €/kW do 0,12 €/kW, a rezultati proračuna prikazani su na slici 7. Za trenutnu cenu električne energije iz malih HE od oko 0,08 €/kWh, interna stopa povrata sredstava iznosi 17,5%, a period otplate 5,5 godina, što ukazuje na ekonomsku atraktivnost projekta.



Slika 7. Interna stopa povrata sredstava i period otplate MHE

Ako bi se projekat MHE analizirao kao CDM projekat (Clean Development Mechanism [8]) uračunao bi se i doprinos MHE na smanjenje emisije ugljen-dioksida (CO<sub>2</sub>) preko određenih CER poena (Certified Emission Reduction). Jedan CER odgovara smanjenju emisije jedne tone CO<sub>2</sub> i na tržištu ima svoju vrednost. Ustanovljeno je da se na teritoriji Srbije za proizvodnju jednog kWh električne energije u TE (na fosilna goriva) emituje oko 1,04 tone CO<sub>2</sub>, pa se za srednju godišnju proizvodnju električne energije od 10,83 GWh (za MHE sa tri agregata, tabela 3) emisija CO<sub>2</sub> smanjuje za 11149 tona CO<sub>2</sub>, što iznosi 11149 CER. Prema pravilima CDM projekata ova dobit može se ostvarivati u periodu od 10 godina.

Rezultati proračuna za različite vrednosti cene električne energije i različite vrednosti CER-a prikazane su na slici 8. Interna stopa povrata sredstava povećava se za 1% u slučaju vrednosti CER-a od 6 €/CER, do čak 3% u slučaju vrednosti od 15 €/CER.



Slika 8. Interna stopa povrata sredstava u zavisnosti od vrednosti CER poena

## 9. ZAKLJUČAK

Poslednjih godina se sve veća pažnja poklanja iskorišćenju energije malih vodotoka i drugih hidroenergetskih potencijala. U ovom radu razmatrana je mogućnost iskorišćenja hidroenergetskog potencijala gravitacionog toka rashladne vode sistema za hlađenje termoelektrane na uglj, TE "Nikola Tesla B". S obzirom da ispušt rashladne vode mora biti na višem nivou od maksimalnog nivoa vode u recipijentu - reci Savi, u periodu nižih vodostaja stvara se značajan pad. Taj pad moguće je iskoristiti za proizvodnju električne energije u MHE.

Prilikom planiranja MHE neophodno je bilo zadovoljiti nekoliko važnih zahteva:

- hidroenergetski potencijal postoji samo u periodu rada TE,
- MHE mora biti ekonomski i energetski isplativa i prihvatljiva sa aspekta uticaja na okruženje,
- MHE ne sme ni na koji način ugroziti sigurnost rada TE.

Da bi se navedeni zahtevi ispunili mašinska zgrada MHE morala se izmestiti u odnosu na postojeće objekte, a tok vode prema njoj regulisati sistemom ustava. Da bi postrojenje bilo sigurno i u slučaju brzog zaustavljanja protoka kroz MHE predviđen je sigurnosni brzotok. Tip turbine izabran je na osnovu raspoloživog pada i protoka.

Ekonomska isplativost objekta razmatra se na osnovu interne stope povrata sredstava i perioda otplate, koji zavise od cene električne energije i ukupnih investicionih troškova. S obzirom da se projekti MHE



mogu razmatrati kao CDM projekti (prema Kjoto protokolu), moguće je odrediti i povećanje isplativosti projekta.

Nominalna snaga MHE sa tri agregata iznosi 2,4MW, interna stopa povrata sredstava je 17,5%, a period otplate 5,5 godina, za trenutno važeće cene električne energije. Dobijeni podaci ukazuju na atraktivnost projekta, koji se može realizovati sa turbinama koje su dostupne na tržištu. Analizirano je i povećanje isplativosti projekta u slučaju njegove realizacije kao CDM projekta. Dobijeni rezultati pokazuju da je energetske korišćenje toka rashladne vode TE tehnički moguće, ekonomski isplativo i predstavlja dodatni izvor čiste energije.

### ZAHVALNOST

Ovaj rad je podržan od strane termoelektrane "Nikola Tesla" i od strane Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj Republika Srbija (projekat 174014). Ideju za ovaj projekat dali su Milorad Jovanović i Miloš Milić iz TE "Nikola Tesla" i autori su zahvalni za njihovu velikodušnu pomoć.

### LITERATURA

- [1] T. Price, D. Probert: Harnessing Hydropower: A Practical Guide, Applied Energy, 57 (1997) 175-251.
- [2] D.R. Schneider, N. Duic, I. Raguzin, Z. Bogdan, M. Ban, B. Grubor, P. Stefanovic, D. Dakic, B. Repic, Z. Stevanovic, A. Zbogar, M. Studovic, S. Nemoda, N. Oka, D. Djurovic, N. Kandic, V. Bakic, S.

Belosevic, A. Eric, R. Mladenovic, M. Paprika, N. Delalic, A. Lekic, R. Bajramovic, A. Teskeredzic, I. Smajevic, E. Dzaferovic, F. Begic, H. Lulic, S. Metovic, S. Petrovic, A. Djugum, D. Kadric, N. Hodzic, F. Kulic, A. Kazagic, A. Gafic: Mapping the potential for decentralized energy generation based on RES in Western Balkans, Thermal Science, 11, 3 (2007) 7-26.

- [3] Guide on How to Develop a Small Hydropower Plant, European Small Hydropower Association - ESHA, Brussels, Belgium, 2004.
- [4] J.K. Kaldelis, D.S. Vlachou, G. Korbakis: Techno-economic evaluation of small hydro plants in Greece: A complete sensitivity analysis, Energy Policy, 33 (2005) 1969-1985.
- [5] W. Knapp, E. Holmen, R. Schilling: Considerations for Water Turbines to be used in Wave Energy Converters, Proceedings of the Fourth European Wave Energy Conference, Aalborg University, Denmark, 2000.
- [6] Kozloduy NPP started the hydro power plant project, Kozloduy NPP Review, 4 (2007) 8.
- [7] Katastar malih hidroelektrana na teritoriji SR Srbije van SAP, Energoprojekt - Hidroinženjering i Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi", Beograd, 1987
- [8] Clean Development Mechanisms, United Nations Framework Convention on Climate Change, available at [http://unfccc.int/kyoto\\_protocol/mechanisms/clean\\_development\\_mechanism/items/2718.php](http://unfccc.int/kyoto_protocol/mechanisms/clean_development_mechanism/items/2718.php).

## POSSIBLE USE OF HYDROPOWER POTENTIAL OF COOLING WATER AT THE THERMAL POWER PLANT

by

Ljubodrag SAVIĆ, Vladan KUZMANOVIĆ, Tina DAŠIĆ, Bojan MILOVANOVIĆ  
Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade  
Vladimir STEVANOVIĆ, Aleksandar GAJIĆ, Blaženka MASLOVARIĆ, Sanja PRICA  
Faculty of Mechanical Engineering, University of Belgrade  
Dušan ARNAUTOVIĆ  
Electrotechnical Institute "Nikola Tesla"

### Summary

Possibility of using hydropower potential of cooling water at the thermal power plant with open cooling system is presented in the paper. Cooling water flows gravitationally to the recipient - the river. In the periods of low water levels additional head occurs which could be used in small hydropower plant. Such a hydropower plant will operate only in periods when thermal power plant operates, with more or less constant flow and head that significantly changes in time. Small hydropower plant that uses cooling water of Thermal Power Plant "Nikola Tesla B" is presented in the paper. The

economic benefits of the HPP are calculated. The increase of profitability is assessed, bearing in mind that the plant would be realized as the Clean Development Mechanism project according to the Kyoto protocol. The obtained results show that the project is economically attractive, and it can be carried out with standard matured solutions of hydro turbines available at the market.

Key words: hydropower, cooling water, thermal power plant, small hydropower plant