

# Ocena proizvodnje električne energije hidroelektrarne na Kolpi

Henrik Lavrič, Andraž Rihar, Rastko Fišer

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija  
E-pošta: henrik.lavric@fe.uni-lj.si, andraz.rihar@robo.fe.uni-lj.si, rastko.fiser@fe.uni-lj.si

**Povzetek:** Z uporabo sodobno optimiziranih, a že dolgo poznanih vodnih strojev, kot sta Arhimedov vijak in vodno kolo, se odpira možnost izrabe hidroenergetskega potenciala vodotokov z zelo nizkimi padci. Za pridobitev podrobnejšega vpogleda v energetske zmogljivosti predvidenih malih hidroelektrarn (MHE) na belokranjskih vodotokih smo zgradili namenski računalniški model MHE. Model upošteva realne hidrološke podatke, dejanske tehnične karakteristike obravnavanega postroja, optimizacijski algoritem razporeditve pretoka na dve turbini in v končni fazi tudi omejitve izrabe pretoka za tehnične namene zaradi zagotavljanja modificiranega minimalnega ekološkega pretoka in v drugem skrajnem primeru tudi neobratanje v času previsokih vodostajev. Z uporabo modela smo ocenili optimalno območje za izrabo hidroenergetskega potenciala in posledično optimalno nazivno moč za obravnavano MHE na Kolpi. Raziskali smo vpliv kompleksnosti izvedbe in zahtevnosti vodenja na proizvodnjo električne energije (EE) in ugotovili, da je najbolj smotrna najcenejša in za vodenje najpreprostejša izvedba postroja. Ker je merjenje in obratovanje s spremenljivimi vrednostmi modificiranega minimalnega ekološkega pretoka zahtevno, še težje pa je to v praksi nadzirati, smo naredili simulacije za nekaj fiksnih vrednosti. Izračunane vrednosti proizvedene EE so za vse posamične primere tudi finančno ovrednotene z upoštevanjem subvencionirane odkupne cene.

**Gljučne besede:** obnovljiv vir, pretok vode, hidroenergetski potencial, Arhimedov vijak, izkoristek

## Assessment of the electrical energy production with a small hydropower plant on Kolpa river

By using the newly optimized, though long known, water engines such as the Archimedes screw and the water wheel, the hydro power potential of watercourses with ultra-low heads can be utilized. To allow for a better insight in the energy capacity of the planned small hydropower plant (SHPP) to be located on the Bela krajina watercourses, we developed an SHPP dedicated computer model. Our model took into account hydrological data, the SHPP technical characteristics, optimization algorithm for water-flow distribution between two turbines and finally restrictions imposed in water-flow utilization in order to ensure a modified environmental flow, or in an extreme case, standstill at the time of high waters. The model enables us to determine the optimal area of the hydro power potential, and consequently the optimal SHPP capacity. The impact of the SHPP control principle and the complexity of the plant on EE production are investigated and the most reasonable variant is assessed to be the one that is the least expensive and the simplest to control. Finding it difficult to measure and also to operate SHPP according to the variable values of the modified environmental flow, or to monitor this in practice, simulations for several values were run. The calculated values of the SHPP-produced EE energy are for each case financially evaluated using the subsidized prices.

## 1 UVOD

Čedalje večje potrebe po električni energiji (EE), naraščanje cen energentov in posledično naraščanje

cene EE, so vodili v iskanje načinov za rentabilno izrabo hidroenergetskega potenciala na vodotokih z manj ugodnimi tehničnimi parametri. Za vodne turbine so začeli uporabljati že obstoječe (zgodovinske) vodne stroje, kot je to Arhimedov vijak, ki je bil v osnovi vodna črpalka, in vodno kolo. Ideje o uporabi teh tehnologij izvirajo pretežno iz Nemčije, bolj množično uporabo pa je zaslediti po internetnih virih v Angliji [1], [2]. Tam precej vlagajo v predelavo starih mlinov v male hidroelektrarne. Podobno temu se je leta 2010 pod okriljem belokranjskih občin začela uresničevati ideja v projektu »Z revitalizacijo mlinov do zelene energije«. Projekt je osredinjen na oživitvev energetske izrabe vodnega potenciala belokranjskih vodotokov na lokacijah v večini primerov opuščeni mlinov. Cilj projekta je bil najti rešitve, ki bi bile sprejemljive za vpletene strani, kot so: Agencija RS za okolje (ARSO), Zavod za varstvo kulturne dediščine, Ribiška zveza ... in ne nazadnje tudi za lastnike mlinov kot potencialne investitorje. Bistvenega pomena pri iskanju rešitev je bila težnja po ohranjanju kulturne dediščine in biotske raznovrstnosti ter možnosti za nadaljnji razvoj turistične dejavnosti v okolici mlinov [3]. Naša glavna vloga v referenčni skupini je bila oceniti hidroenergetski potencial, ki ga je ob podanih pogojih mogoče izkoristiti za proizvodnjo EE in hkrati utemeljiti najustreznejšo izvedbo primernih tehnologij MHE.

Za določanje izkoristljivega hidroenergetskega potenciala je tako treba upoštevati obstoječe stanje na jezovih, obstoječe gabarite mlinščic, modificirane

vrednosti ekoloških pretokov in ne nazadnje tudi, kateri tip turbine je sprejemljiv. Nasprotna pot, ki je pri gradnji hidroelektrarn bolj običajna, to je prilagajanje lokacije v smislu maksimiranja izrabe in posledično donosa, v našem primeru ne obstaja. Torej kakršno koli dvigovanje zgornjega nivoja vode z višanjem jezusa ali nižanje spodnjega nivoja s poglobljanjem korita ni dovoljeno. Predelava jezov za gradnjo optimalnih vtokov na boljnjih pozicijah tudi ni dovoljena. Umestitev hidroelektrarne je mogoča le v obstoječo mlinščico brez spreminjanja arhitekturne zasnove obstoječih mlinov [3], [4].

## 2 PREGLED USTREZNIH TEHNOLOGIJ

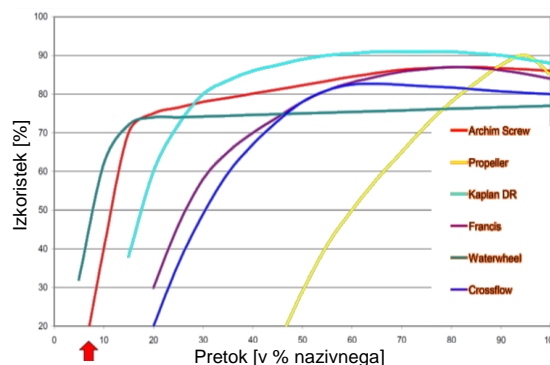
Na belokranjskih vodotokih obravnavamo hidroenergetski potencial s tehničnimi parametri pretokov v ustaljenih mejah od  $1 \text{ m}^3/\text{s}$  do več  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  pri padcih na jezovih od 1 m do največ 1,5 m, na določenih lokacijah tudi pod 1 m. Hidroenergetski potencial s takšnimi tehničnimi parametri je do nedavnega v splošni praksi veljal kot nezanimiv za proizvodnjo EE predvsem zaradi slabega ekonomskega računa. Cena klasičnih vodnih turbin je visoka in gradbenih del je veliko, pri tem pa so še posegi v prostor precejšnji. Gradnja MHE z uporabo klasičnih vodnih turbin pri takih razmerah je smiselna le izjemoma, npr. ko nekega območja ni mogoče drugače preskrbeti z električno energijo in takrat je ta veliko bolj cenjena. Pri vključevanju malih hidroelektrarn v obstoječi hidroenergetski sistem je zaradi relativno nizke cene električne energije povračilna doba investicije predolga in njihovo obratovanje ni rentabilno. Do zdaj omenjena problematika je razvidna tudi iz Laymanovega vodnika za gradnjo MHE. To je uradni vodnik (priročnik) evropskega združenja malih hidroelektrarn (ESHA) in hkrati tudi Evropske komisije. Vodnik iz leta 1998 predvideva le uporabo klasičnih vodnih turbin. Minimalni neto padec, pri katerem je še predvideno izkoriščanje hidroenergetskega potenciala, znaša 3 m [5] (str. 76). V najnovejšem članku, v katerem avtorji predstavljajo izbiro ustreznih tehnologij za izrabo hidroenergetskega potenciala z zelo skromnimi karakteristikami, so upoštevane tudi že sodobne tehnologije vodnih turbin za MHE [6]. Iz predstavljenega diagrama Q-H sledi, da sta glede na tehnične parametre belokranjskih vodotokov primerna vodna stroja Arhimedov vijak in vodno kolo s spodnjim natokom. Zadnje je najprimernejše za padce pod 1 m in za revitalizacijo tistih mlinov, ki so spomeniki kulturne dediščine. Izdelovalci Arhimedovih vijakov navajajo področje uporabe za padce v razponu od 1 m do 10 m in pretoke od  $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$  do  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  [7], [8].

Stroški postavitve MHE so ob uporabi Arhimedovega vijaka ali vodnega kolesa relativno nizki, ker niso potrebni večji gradbeni posegi, kar je dobrodošlo tudi zaradi majhnih posledic v okolju. Še posebej hitro in preprosto postavitve na terenu omogoča izvedba postroja MHE z Arhimedovim vijakom v kompaktni izvedbi (slika 1) [7]. Med obratovanjem

prideta pri izbranih dveh vodnih strojih do izraza še neobčutljivost za nečistoče in prijaznost do rib. Po tehnološki plati so pomembni visoki izkoristki na področju majhnih pretokov oz. nizkih obremenitev (slika 2) [9], nezahtevno obratovanje in vzdrževanje.



Slika 1: Kompaktni postroj MHE z Arhimedovim vijakom



Slika 2: Izkoristki različnih turbin v odvisnosti od pretoka

Intenziven razvoj je v zadnjem času zaslediti tudi na električnih komponentah MHE. Uveljavljajo se novejši, zmogljivejši izvedbe električnih generatorjev [10], prav tako pa starejšim različicam nenehno izboljšujejo izkoristke. Med generatorje in mrežo so začeli vključevati izmenične presmerneke z novimi principi vodenja v 4-kvadrantnem obratovanju za zagotavljanje večje fleksibilnosti postroja.

## 3 ZASNOVA RAČUNALNIŠKEGA MODELA

Razvili smo več različnih računalniškega modela, ki se razlikujejo glede na vrsto turbine, število turbin, nazivni pretok in posledično nazivno moč elektrarne. Opisana bo najkompleksnejša različica za MHE z dvema Arhimedovima vijakoma z nazivnim pretokom po  $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$ , od katerih je vsak voden s svojim izmeničnim presmernikom. Nazivna moč elektrarne znaša  $2 \times 22 \text{ kW}$ . Računalniški model bo predstavljen po korakih, saj je sestavljen iz več segmentov in bo tako celotno razumevanje lažje.

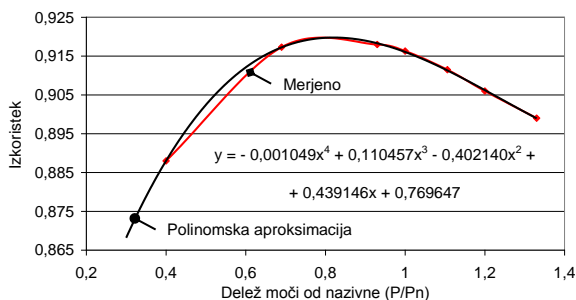
Glavne vhodne podatke, vodostaje in pretoke posameznega vodotoka (3 merilne postaje na Kolpi) dobimo na spletnih straneh ARSO [12]. Podatke za točno določene vmesne lokacije je mogoče pridobiti na ARSO le na neposredno zahtevo in s precejšnjimi stroški zaradi zahtevnosti in dolgotrajnosti preračuna. Kot osnovno bazo podatkov smo vzeli podatke merilne

postaje Kolpa, Radenci II, za obdobje 1981–2010. Tri desetletja dolgo obdobje nam močno zmanjša vpliv ekstremno vodnatih (sušnih, mokrih) let. Merilna postaja Radenci II je v bližini Madroničevega mlina. Ta mlin je izmed vseh v projekt revitalizacije vključenih mlinov ob Kolpi lociran najvišje v njenem toku in obravnava te lokacije je najbolj smiselna. Njegov lastnik ima okvirno rešitev za malo hidroelektrarno s paralelno postavitvijo dveh postrojev z Arhimedovima vijakoma.

### 3.1 Ureditev podatkov v programu Excel

Podatke dobimo v Excelovi datoteki .xls. S pomočjo nekaj manipulacij jih preuredimo po mesecih in za vsakega od mesecev upoštevamo modificiran minimalni ekološki pretok ( $Q_{es,modif}$ ). Z določitvijo parametrov že vgrajene funkcije  $xlsread()$  podatke uvozimo v Matlab, jih zapišemo v pripravljene matrike in nadaljujemo obdelavo. V tem delu programa upoštevamo tudi mejni vodostaj, maksimalne oz. nazivne pretoke obeh turbin, vrednost težnostnega pospeška in gostoto vode.

V nadaljevanju s pomočjo programa Excel z matematično operacijo interpolacije določimo enačbe in funkcije izkoristkov v odvisnosti od obremenitve za posamezne dele postroja hidroelektrarne (generator, izmenični presmernik, turbina in menjalnik). Pri določanju smo si pomagali s karakteristikami, ki se najdejo v literaturi ali pa smo jih pridobili neposredno od izdelovalcev. Na osnovi podatkov nemškega izdelovalca električnih generatorjev VEM Group je izrisana krivulja izkoristka asinhronskega generatorja v odvisnosti od obremenitve (slika 3). Krivulji je dodana trendna linija, s pomočjo katere je izvedena operacija interpolacije in pridobljena enačba, ki nam ponazarja matematično funkcijo izkoristka generatorja. Na podoben način smo pridobili tudi funkcije izkoristkov izmeničnih presmernikov ter Arhimedovega vijaka in vodnega kolesa. Karakteristike izkoristka množilnika hitrosti (menjalnika) pri izdelovalcih nismo mogli pridobiti, zato smo na osnovi literature njegov izkoristek določili na fiksno vrednost 94 %.



Slika 3: Izkoristek asinhronskega generatorja v odvisnosti od obremenitve

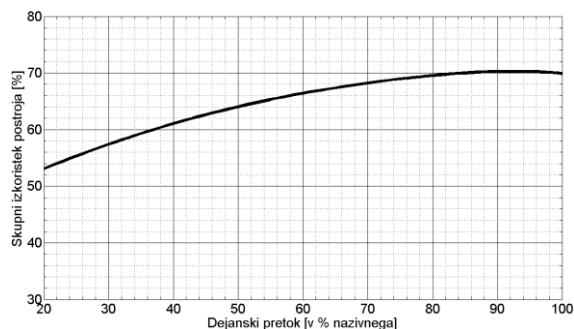
### 3.2 Izračuni v programskem okolju Matlab

Vse enačbe so nato vgrajene v Matlabov program. Skupni izkoristek postroja je določen z enačbo (1). To je celoten izkoristek pri pretvorbi potencialne energije

vode v električno energijo, ki jo elektrarna lahko odda.

$$\eta_{skupni} = \eta_{tur} \cdot \eta_{gen} \cdot \eta_{pr} \cdot \eta_{gear} \quad (1)$$

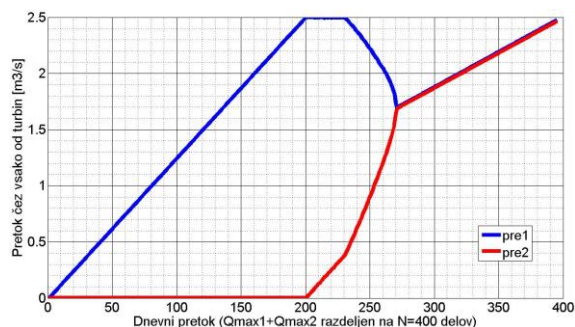
V enačbi (1) so  $\eta_{tur}$  izkoristek turbine,  $\eta_{gen}$  izkoristek električnega generatorja,  $\eta_{pr}$  izkoristek izmeničnega presmernika ter  $\eta_{gear}$  izkoristek menjalnika. Na sliki 4 je izrisana funkcija izkoristka celotnega postroja za območje obremenitev od 20 do 100 %. Pri obremenitvi, manjši od 20 %, hidroelektrarna deluje pri zelo nizkem izkoristku, ker hkrati močno upadeta izkoristka generatorja in turbine.



Slika 4: Skupni izkoristek postroja v odvisnosti od dejanskega pretoka

#### 3.2.1 Optimizacijski algoritem za doseganje maksimalnega izkoristka

V nadaljevanju določimo pare množic točk oziroma premic, ki bodo ponazarjale zvezno porazdelitev pretoka na dva dela. Resolucijo razporeditve določimo s spremenljivko  $N$ . Za vsako točko na setu premic določimo vrednost izkoristka turbine v tej točki. To vrednost pomnožimo s pretokom in dobimo vrednost tehnično izkoristljivega pretoka. Z uporabo zank *for* nato vse vrednosti preletimo in določimo maksimalne vrednosti tehnično izkoristljivih pretokov. Tako dobimo optimalno porazdelitev pretoka na obe turbini. Obe razporeditvi zapišemo v vektorja *pre1* in *pre2*. Vrednosti obeh pretokov pri optimalni razporeditvi sta narisani na sliki 5.



Slika 5: Optimalna razdelitev pretoka čez turbini v odvisnosti od izkoristljivega dnevnega pretoka (400 delov=5 m<sup>3</sup>/s)

Diagram je izrisan za pretok  $Q_{max1}=Q_{max2}=2,5$  m<sup>3</sup>/s. To pomeni, da ob dnevnem pretoku 2,5 m<sup>3</sup>/s vsa voda teče skozi prvo turbino, skozi drugo turbino pa ne spustimo nič. Če znaša dnevni pretok 4 m<sup>3</sup>/s (pribl. 320 delov),

teče čez vsako od turbin  $2 \text{ m}^3/\text{s}$ . Razporeditvi nista enaki, kaj šele preprosti. Enačbi dobljenih krivulj ponovno pridobimo z interpolacijo. Tokrat uporabimo kar vgrajeno funkcijo *polyfit*().

### 3.2.2 Določitev dnevnih pretokov in izkoristkov

Za računanje s pretoki so uporabljene tri spremenljivke v matrični obliki:  $Q_{\text{dnevni}}$ ,  $Q_{\text{turbine1}}$  in  $Q_{\text{turbine2}}$ . S pomočjo zank *for* ponovno preletimo vodostaje vseh datumov in glede na pogoje mejnega vodostaja določimo, katere dni obratujemo in katere dni ne. Kadar je vodostaj višji od mejnega, električni generator ne sme obratovati in je lahko celo toplopljen.

Model upošteva tudi modificiran minimalni ekološki pretok in glede na naslednje pogoje v spremenljivke vpiše vrednosti. Kadar je vode premalo, so pretoki enaki nič, kadar so pretoki manjši od seštevka  $Q_{\text{max1}}$  in  $Q_{\text{max2}}$ , je  $Q_{\text{dnevni}}$  enak kar dnevni pretoku, kadar pa so pretoki večji, izkoristimo lahko le del  $Q_{\text{max1}+Q_{\text{max2}}}$ . Vrednosti spremenljivk  $Q_{\text{turbine1}}$  in  $Q_{\text{turbine2}}$  določimo s pomočjo krivulj s slike 5 in funkcije *polyval*(). Glede na dnevni pretok čez posamezno turbino nato določimo dnevne izkoristke posameznega sestavnega dela postroja na podlagi že pridobljenih enačb izkoristka v odvisnosti od obremenitve.

### 3.2.3 Določitev neto padca kot funkcije pretoka

Ko je med generator in omrežje vključen izmenični presmernik, lahko z zniževanjem vrtilne hitrosti generatorja in s tem turbine znižujemo pretok in teoretično ohranjamo padec na nazivni vrednosti. Tako lahko bolje izkoristimo vodni potencial pri nižjih razpoložljivih pretokih. V tem primeru torej računamo s konstantnim padcem. Če je generator na mrežo priključen direktno, brez izmeničnega presmernika, njegove vrtilne hitrosti ob pomanjkanju vode ni mogoče ustrezno zniževati. Neto padec je zato odvisen od pretoka,  $H_{\text{neto}} = f(Q)$ . Funkcijsko odvisnost smo določili s pomočjo karakteristik vijaka, ki smo jih pridobili od izdelovalca Arhimedovih vijakov Rehart GmbH.

$$H_{\text{neto}} = -0,06921 \cdot Q^3 + 0,27128 \cdot Q^2 + 0,14918 \cdot Q + 0,31252 \quad (2)$$

### 3.2.4 Določitev moči, energije in ocena prihodkov

Moč elektrarne se za vsak dan posebej izračuna z enačbo (3):

$$P = Q \cdot H_{\text{neto}} \cdot \eta_{\text{gen}} \cdot \eta_{\text{tur}} \cdot \eta_{\text{pr}} \cdot \eta_{\text{gear}} \cdot \rho \cdot g \quad (3)$$

Poleg že predhodno definiranih količin sta v (3)  $\rho$  gostota vode in  $g$  težnostni pospešek. Z uporabo enačbe (4) seštejemo vse moči, pomnožene s 24 urami, in tako dobimo proizvedeno električno energijo v kWh.

$$W_e = \sum_{i=1}^n (P_i \cdot 24 \text{ ur}) \quad (4)$$

V enačbi (4) je  $P_i$  dnevna moč elektrarne,  $n$  pa število dni v letu, za katero opravljamo izračun.

Energijo celotnega obdobja dobimo s seštevkom posameznih letnih energij. Celotno energijo razdelimo na povprečne letne in potem z upoštevanjem cen

zagotovljenega odkupa električne energije izračunamo povprečni letni prihodek. Prav tako lahko preračunamo tudi letni prihodek na kW električne moči elektrarne. Ta bo pozneje verjetno najbolj uporaben za primerjavo z zmogljivostmi drugih turbin in postrojev. Cene zagotovljenega odkupa električne energije so navedene na spletni strani Borzena [13]. Odvisne so od nazivne moči MHE in veljajo za prvih 15 let obratovanja. Različice računalniškega programa za druge variante izvedbe hidroelektrarne so opisane v [11].

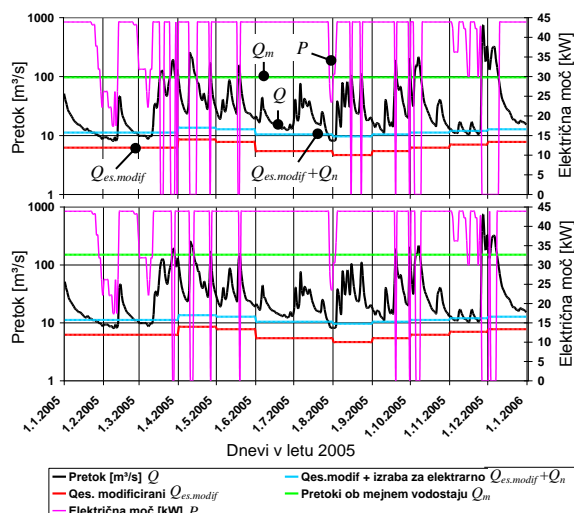
## 4 SIMULACIJE OBRATOVALNIH PRIMEROV

V nadaljevanju bomo prikazali rezultate izračunov, ki smo jih pridobili s pomočjo računalniškega modela male hidroelektrarne.

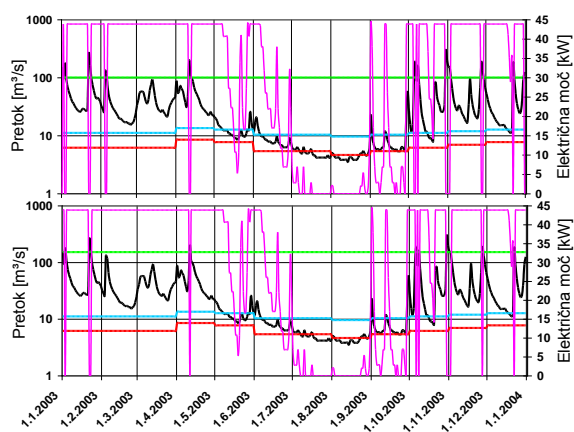
### 4.1 Vodnatost Kolpe in proizvodni potencial

Na slikah od 6 do 8 je grafična predstavitev vodnatosti reke Kolpe za tri značilna leta, ki je narejena na podlagi podatkov iz arhiva za merilno mesto Radenci II. Opazimo različne razporeditve pretokov, z markantnimi viški spomladi in jeseni ter značilnimi pomanjkanji vode poleti. Grafikon vodnatosti (hidrogrami) reke Kolpe so namenoma izbrani za povprečno vodnato leto 2005 (slika 6), za ekstremno sušno leto 2003 (slika 7) in za ekstremno mokro leto 2010 (slika 8). Že bežen pregled grafikonov nam razkrije značilna nihanja v poteku krivulje  $Q$ , ki kaže pretok. To izhaja iz dejstva, da ima reka Kolpa veliko hidrometrično zaledje in veliko padavin zlasti v zgornjem toku, na Kočevskem in na robu Snežniškega pogorja. Pomembno je tudi, da ob vsakih padavinah okoli 50 % vode odteče. Tako se že ob zmernih padavinah zbere velika količina vode, kar se izraža v markantnih skokovitih porastih vodostajev in pretokov. Padci pretokov so nekoliko bolj umirjeni kot porasti zaradi geološke sestave tal (mešanica apnencev in dolomitov). Hidrogrami so nadgrajeni s karakterističnimi obratovalnimi parametri elektrarne z močjo  $2 \times 22 \text{ kW}$ , ki je predvidena na lokaciji Madroničevega mlina. Najnižja stopničasta črta označuje nivo modificiranega ekološko sprejemljivega pretoka  $Q_{\text{es.modif}}$  za posamezni mesec, ki ga pogojuje Zavod za ribištvo RS. Vrednosti  $Q_{\text{es.modif}}$  so med  $4,67 \text{ m}^3/\text{s}$  (avgust) in  $8,55 \text{ m}^3/\text{s}$  (april) s celoletno povprečno vrednostjo  $6,41 \text{ m}^3/\text{s}$ . Grobo ocenjeni ekološki pretok znaša  $3,73 \text{ m}^3/\text{s}$ . Višja stopničasta črta pomeni seštevke  $Q_{\text{es.modif}}$  in nazivnega pretoka hidroelektrarne  $Q_n$ . Ravna linija označuje nivo pretoka  $Q_m$  ob mejnem vodostaju. Mejni vodostaj je glede na karakteristike hidroelektrarne določen na 150 cm, pripadajoči pretok pa tako znaša okoli  $100 \text{ m}^3/\text{s}$ . Za to vrednost mejnega vodostaja so zgornji hidrogrami na posamezni sliki. Spodnji hidrogrami so narejeni za mejni vodostaj 180 cm, pri čemer je pretok  $150 \text{ m}^3/\text{s}$ .

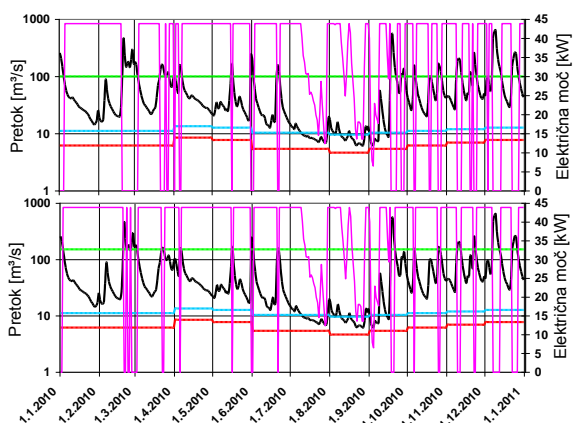
S skokovito spreminjajočo se črto so podane dnevne obratovalne električne moči  $P$  v kW in so vezane na sekundarno (desno) os grafikonov. Že z bežnim pregledom grafikonov ugotovimo, kdaj in s kolikšno



Slika 6: Pretoki in moči za povprečno vodnato leto 2005 pri mejnem vodostaju 150 cm – zgoraj in 180 cm – spodaj



Slika 7: Pretoki in moči za izjemno sušno leto 2003 pri mejnem vodostaju 150 cm – zgoraj in 180 cm – spodaj



Slika 8: Pretoki in moči za izjemno mokro leto 2010 pri mejnem vodostaju 150 cm – zgoraj in 180 cm – spodaj

močjo MHE lahko obratuje. Kadar je dnevni pretok večji od seštevka  $Q_{es.modif}$  in nazivnega pretoka, obratujemo z nazivno močjo. Ko je pretok reke celo nižji od  $Q_{es.modif}$  elektrarna ne obratuje. V vmesnem območju obratuje z delno močjo. Kadar je dnevni pretok

večji od mejnega, je zaradi morebitne potopitve električnega generatorja obratovanje onemogočeno. Pri višjem mejnem vodostaju elektrarna dlje časa obratuje. Prekinitev je tako manj in so tudi krajše. Višino mejnega vodostaja je treba določiti tudi na osnovi dovoljenega časa potopitve generatorja. Po proizvajalčevih navedbah je ta okvirno osem do največ deset dni. Na hidrogramu za leto 2005 (slika 6) je pri mejnem vodostaju 150 cm decembra stanje kritično, kajti visoka voda je bila več kot 10 dni skupaj. Šele pri mejnem vodostaju 180 cm je stanje za opremo sprejemljivo.

V letu 2005 vrednosti pretokov niso nikoli nižje od  $Q_{es.modif}$  in povprečje srednjih mesečnih pretokov  $Q_{sr}$  znaša  $44,4 \text{ m}^3/\text{s}$ . Viški pretokov so pozno spomladi, poleti in jeseni. Skokovita rast pretokov pozimi ni ugodna. Februarja in marca zaradi majhne vodnatosti nekaj časa obratujemo le z delno močjo. Skupna leta 2005 proizvedena EE je za mejni vodostaj 150 cm  $324,9 \text{ MWh}$ . Zanimivo je, da je za  $4 \text{ MWh}$  večja kot za leto 2002, ki ima enak  $Q_{sr}$  (tabela 1). Nasprotno je pri mejnem vodostaju 180 cm za leto 2002 proizvedena EE za  $5,5 \text{ MWh}$  večja kot leta 2005. Očitno ima leto 2005 ugodnejšo razporeditev pretoka z manjšimi konicami. Leto 2003 je z  $Q_{sr}$  enakim  $31,9 \text{ m}^3/\text{s}$ , eno najmanj vodnatih let v obravnavanem obdobju 30 let. V juliju in avgustu proizvodnje EE tako rekoč ni, pa tudi junija in septembra je skromna (slika 7). Posledično je tudi letna proizvodnja slaba in znaša le  $252,1 \text{ MWh}$  pri mejnem vodostaju 150 cm.

Za leto 2010 je  $Q_{sr}$   $63,5 \text{ m}^3/\text{s}$  in pomeni rekordno vrednost v obravnavanem obdobju 30 let. Že hiter pregled grafa (slika 8) nam potrjuje izjemno vodnatost tega leta, saj pretoki večji del leta presega  $30 \text{ m}^3/\text{s}$ . Vode je veliko predvsem jeseni, septembra, takrat so poplavljalne reke po vsej Sloveniji. Vode je v izobilju tudi pozimi in v pomladanskem času, poleti pa nenavadno malo. Približno 30 dni bi morali obratovati z delno močjo, kar nekaj časa pa je obratovanje zaradi prevelikih pretokov onemogočeno. Vrednost proizvedene EE znaša »le«  $288,4 \text{ MWh}$  pri mejnem vodostaju 150 cm in je manjša od vrednosti leta 2002 in leta 2005. Vidimo torej, da velika vodnatost in s tem velik  $Q_{sr}$  na račun pogostejših visokih vodostajev ni ugoden za obratovanje hidroelektrarne. Kot pomembnejša se izkaže zmerna razporeditev pretoka vode skozi leto. V tabeli 1 so na enem mestu zbrani podatki za povprečje srednjih mesečnih pretokov  $Q_{sr}$  in proizvedeno EE za mejna vodostaja 150 cm in 180 cm za pet izbranih let. Dodani so tudi podatki za število dni brez obratovanja in število obratovanih dni pri delni oz. polni obremenitvi za mejni vodostaj 150 cm.

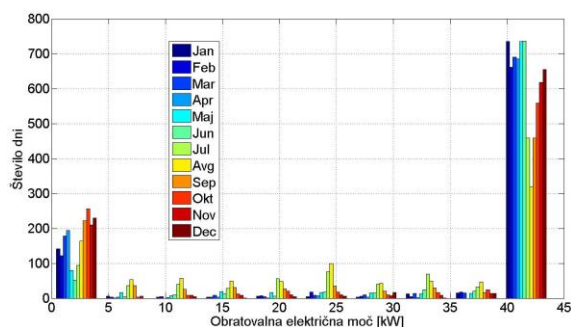
Sprememba mejnega vodostaja s 150 cm na 180 cm v praksi pomeni pri  $22^\circ$  naklonu osi postroja za  $80 \text{ cm}$  podaljšano os Arhimedovega vijaka, kar pa podaljša vodoravno dimenzijo (dolžino) postroja za dobrih  $74 \text{ cm}$ . Pri izračunih se pokaže razlika v proizvodnji v bolj vodnatih letih od  $10\%$  do  $12\%$  (2008 in 2010) in le dobre  $3\%$  v sušnem letu 2003. Na prvi pogled se zdi

Tabela 1: Povprečje pretokov, proizvedena EE in število obratovalnih dni za izbrana leta

| Leto | Povprečje srednjih mes. pretokov $Q_{sr}$ [ $m^3/s$ ] | Proizvedena EE pri mejnem vodostaju [MWh] |        | Število dni pri obremenitvi |       |       |
|------|---|---|--------|-----------------------------|-------|-------|
|      |   | 150 cm                                    | 180 cm | Brez                        | Delna | Polna |
| 2002 | 44,4  | 320,9                                     | 348,3  | 46                          | 44    | 275   |
| 2003 | 31,9  | 252,1                                     | 260,5  | 92                          | 61    | 212   |
| 2005 | 44,4  | 324,9                                     | 342,8  | 42                          | 44    | 279   |
| 2008 | 46,5  | 287,6                                     | 322,3  | 61                          | 69    | 236   |
| 2010 | 63,5  | 288,4                                     | 319,9  | 71                          | 44    | 250   |

dvigovanje mejnega vodostaja s stališča proizvodnje koristen poseg, vendar ne smemo zanemariti drugih vidikov. Prvi je ta, da se zaradi previsokih vodostajev ob poplavih nikakor ne moremo izogniti zalitosti generatorja in menjalnika, po drugi strani pa nesorazmerni gabariti postroja ne pridejo v poštev zaradi neprimerne videza. Dejstvo je tudi, da z naraščanjem vodostaja nivo spodnje vode narašča hitreje kot zgornje. Izkustveno velja, da na Kolpi dvakrat hitreje. Pri visokih vodah se torej padec zniža in tudi fizikalnih pogojev za obratovanje ni več. Pri izračunih za mejni vodostaj 180 cm je negativni vpliv povišanega nivoja spodnje vode zanemarljiv. Podaljševanje osi postroja in s tem posledično dvigovanje mejnega vodostaja je smiselno oz. nujno le do mere, ki bo preprečila predolgo zalitost generatorja. Lahko pa se v prihodnosti nadejamo tudi boljše tehnološke rešitve, ki bo dopuščala daljše časovno obdobje zalitosti generatorja.

Na sliki 9 je histogram obratovalnih dni v odvisnosti od obratovalne moči 2x22 kW elektrarne za 30-letno obdobje pri mejnem vodostaju 150 cm. Histogram zajema obdobja po mesecih (januar 1981–januar 2010, februar 1981–februar 2010 ...). To je skupaj 930 dni za mesece z 31 dnevi, 900 dni za mesece s 30 dnevi ter 848 dni za mesec februar, upoštevajoč prehodna leta. Na x-osi je električna moč v korakih po 5 kW, na y-osi pa je število dni. Iz prikaza po mesecih je razvidno, v katerih mesecih elektrarna proizvede več EE. Obdobje 30 let nam zmanjša vpliv ekstremov, ki je bil predhodno že nakazan. Že hiter pogled na histogram razkrije, da elektrarna pri nazivni moči obratuje od 550 do 750 dni v vseh mesecih razen poletnih. Različno so razporejeni dnevi, ko elektrarna obratuje pri delni moči. Januarja, februarja in marca je teh dni bolj malo, aprila še manj, maja in junija pa več. V poletnih mesecih (julij, avgust in september) je obratovalnih dni z nazivno močjo veliko manj kot spomladi. Avgusta celo samo okoli 300. To je le okoli 30 % vseh avgustovskih dni, je pa zato večje število dni, ko obratujemo z zmanjšano močjo ter kljub manjšim pretokom proizvajamo električno energijo. Dni, ko je vode premalo za obratovanje, ali pa so vodostaji višji od mejnega, je od 100 do 250, odvisno seveda od meseca. V primerjavi z drugimi poletnimi meseci septembra največ časa obratujemo z nazivno močjo. Hkrati je treba omeniti, da je zaradi večje količine padavin tudi vodostaj največkrat višji od mejnega in posledično ne obratujemo. Izmed vseh mesecev so za obratovanje najugodnejša junijska



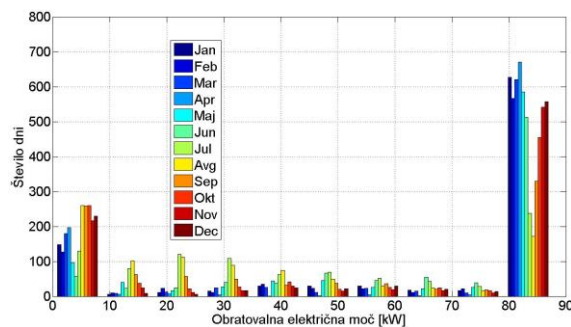
Slika 9: Histogram dnevni obratovalni moči v 30-letnem obdobju za varianto MHE 2x22 kW

obdobja, saj je dni, ko elektrarna ne obratuje, daleč najmanj. Teh je samo 52, kar znaša 6 % vseh junijskih dni v obdobju 30 let.

Podrobnejši izračun razkrije, da bi v 30 letih (10958 dni) taka hidroelektrarna obratovala z nazivno močjo kar 7309 dni, to je 67 % časa. Obratovanje bi bilo onemogočeno zaradi bodisi premajhnih pretokov ali previsokih vodostajev 1944 dni, to je 18 % časa. Preostalih 1705 dni (15 % časa) bi obratovala z zmanjšano oziroma le delno močjo.

#### 4.2 Vpliv velikosti postroja na proizvodnjo EE

Do zdaj so bili podrobneje prikazani rezultati za 2x22 kW elektrarno, katere delovanje je zamišljeno kot najbolj sofisticirano in je tudi predstavljeno pod opisom programa. V nadaljevanju bodo podani še rezultati izračunov za večjo in manjšo varianto. Na sliki 10 je skupen histogram za 2x44 kW varianto, to je dvakrat močnejšo elektrarno od do zdaj opisane. Nazivni pretok posameznega Arhimedovega vijaka je  $5 m^3/s$  in nazivni pretok elektrarne je tako  $10 m^3/s$ . Zaradi tako velikega



Slika 10: Histogram dnevni obratovalni moči v 30-letnem obdobju za varianto MHE 2x44 kW

nazivnega pretoka se opazno zmanjša število obratovalnih dni pri polni moči, poveča pa se število obratovalnih dni pri delni moči.

V tabeli 2 so podane vrednosti celotne proizvedene EE za obdobje 30 let in povprečne vrednosti letnih prihodkov ter povprečje letnih prihodkov, razdeljeno na kW moči. Predstavljeni so podatki za pet variant. Poleg do zdaj omenjenih 2x22 kW in 2x44 kW so tu še tri variante z enojnim postrojem. Arhimedov vijak je pri tretji varianti z 32 kW dimenzioniran za 3,7 m<sup>3</sup>/s in generator ni voden z izmeničnim presmernikom. Pri četrti varianti je računano, kot bi imeli instalirano le eno polovico elektrarne 2x22 kW. Zadnja, peta varianta je računana z vodnim kolesom, katerega nazivni pretok je 5 m<sup>3</sup>/s, torej porablja enako količino vode kot 2x22 kW elektrarna z Arhimedovima vijakoma (prva varianta), a jo slabše izkoristi.

Tabela 2: Proizvedena EE in povprečni letni prihodki za različno velike postroje MHE

| Varianta:                  | EE 30 let<br>[GWh] | Letni prihodek |        |
|----------------------------|--------------------|----------------|--------|
|                            |                    | [€]            | [€/kW] |
| 1. 2x22 kW; 2xIP; OPT      | 8,64               | 30.387         | 692,50 |
| 2. 2x44 kW; 2xIP; OPT      | 15,22              | 46.980         | 535,30 |
| 3. 1x32 kW; brez IP        | 5,15               | 18.108         | 565,87 |
| 4. 1x22 kW; IP             | 4,61               | 16.207         | 738,70 |
| 5. 34,5 kW; vodno kolo; IP | 6,81               | 23.939         | 693,90 |

Primerjava na osnovi letnega prihodka na kWh pokaže, da je najbolj izkoriščen najmanjši 22 kW postroj. Zelo slabo se izkaže varianta 32 kW, ker je to le ena večja enota. Ima več obratovanja pri delnih pretokih in dodatno še slabše izkoriščanje delnih pretokov, ker nima vgrajenega izmeničnega presmernika. Najmanjši donos na kW ima največja elektrarna, ker je tu nižja zagotovljena cena odkupa (le 92,61 €/MWh in ne več 105,47 €/MWh) [13] in tudi obratovanja pri delni moči je več. Elektrarna je manj izkoriščena (slika 10), kar lahko vidimo tudi iz proizvedene energije v 30 letih. Dvakrat večja elektrarna lahko proizvede le 76 % več EE. Varianta 2x44 kW je sicer v praksi na obravnavani lokaciji nemogoča zaradi fizičnih dimenzij (preozka mlinščica in premajhen padec). Širina mlinščice 6 m omogoča le velikosti ranga 2x25 kW. Širina Arhimedovega vijaka obravnavane ene 22 kW enote je 2,4 m. Preskok instalirane moči elektrarne čez 50 kW v našem primeru ni smiselno, ker se tudi cenovno ne bi izšel. Variante z enojnim postrojem in posledično manjšo instalirano močjo bi bile smiselne v primeru omejenih finančnih zmožnosti investitorja. Vodno kolo opazno slabše izkoristi dani pretok.

#### 4.3 Vpliv kompleksnosti izvedbe in zahtevnosti vodenja MHE na proizvodnjo EE

V tabeli 3 so zbrani rezultati izračunov za enako velike postroje. Razlike so le v uporabi izmeničnih presmernikov in uporabi optimizacije vodenja za doseganje višjih izkoristkov pri delnih obremenitvah.

Varianta 1 je že poznana najbolj sofisticirana izvedba 2x22 kW. Pri varianti 2 je samo ena polovica opremljena z izmeničnim presmernikom. Ta polovica postroja vedno obratuje pri delnih obremenitvah. Polovico brez presmernika (22,55 kW) pa vključimo šele, ko imamo na voljo 2,5 m<sup>3</sup>/s in več. V tretjem primeru nimamo presmernikov, zato je nazivna moč zaradi boljšega izkoristka 2x22,55 kW. Optimiziranje izkoristka pri delni obremenitvi naredimo z razporejanjem pretoka s pomočjo ustreznega odpiranja vstopnih loput. Podobno uporabimo lopute pri varianti 4, le da tu do 1 m<sup>3</sup>/s spuščamo vodo samo na en vijak, za večje pretoke pa obratujeta oba popolnoma vzporedno. Varianta 5 je najcenejša in najpreprostejša za vodenje. Ko je presežek vode nad  $Q_{es,modif}$ , se jo spušča na oba vijaka brez kakršne koli optimizacije.

Tabela 3: Primerjava proizvedene EE in povprečna vrednost letnih prihodkov glede na kompleksnost izvedbe MHE

| Varianta:                                   | EE 30 let<br>[GWh] | Letni prihodek |        |
|---|--------------------|----------------|--------|
|   |                    | [€]            | [€/kW] |
| 1. 2x22 kW; 2xIP; OPT                       | 8,64               | 30.387         | 692,50 |
| 2. 1x22 kW; 1x22,55 kW<br>1xIP (44,5 kW)    | 8,75               | 30.772         | 691,50 |
| 3. 2x22,55 kW; brez IP;<br>OPT              | 8,73               | 30.700         | 680,87 |
| 4. 2x22,55 kW; do 1m <sup>3</sup> /s<br>OPT | 8,60               | 30.325         | 670,39 |
| 5. 2x22,55 kW; brez IP                      | 8,59               | 30.219         | 670,04 |
| 6. 1x22 kW; IP                              | 4,61               | 16.207         | 738,70 |
| 7. 1x22,55 kW; brez IP                      | 4,68               | 16.461         | 729,60 |

Primerjava povprečnih letnih prihodkov na kW podobno zasnovanih postrojov pokaže največjo vrednost pri najbolj sofisticirani izvedbi, to je 692,50 €/kW. Potem pa se vrednosti monotono znižujejo z upadanjem kompleksnosti do najnižje 670,04 €/kW. Celotne razlike je le dobrega 3,3 %. Uporaba izmeničnih presmernikov je ekonomsko neupravičljiva, ker je njihov prispevek k proizvedeni EE premajhen. Samo kompenzacijo magnetilnega toka generatorjev, če bi bila ta nujna, je veliko ceneje narediti s kondenzatorji. Drugo dejstvo, ki pa v praksi še dodatno onemogoča optimizacijo vodenja, je popolna podrejenost obratovanja elektrarne danim razmeram. Posledično nima smisla zniževati hitrosti vrtenja Arhimedovih vijakov ali vodnega kolesa in s tem pri neki delni obremenitvi poskušati ohranjati konstanten padec, kajti voda bi nam uhajala čez jez. Tako postane edina smiselna najcenejša in za vodenje najpreprostejša varianta. Ker je najmanj kompleksna, je posledično pričakovati tudi manj okvar. Zaradi preprostosti je tudi upravljanje lažje in vse skupaj zagotavlja manjši izpad obratovanja.

Varianti 6 in 7 v tabeli 3 sta računani za samo po eno enoto. Tu se neposredno vidi, da je zaradi izgub izmeničnega presmernika manj proizvedene EE. Tako majhna elektrarna deluje večino časa blizu polne obremenitve in teoretično boljše izkoriščanje delnih obremenitev z uporabo izmeničnega presmernika ne pride do izraza.

#### 4.4 Vpliv velikosti ekološkega pretoka na proizvodnjo EE

Spreminjajoče se mesečne vrednosti s strani Ribiške zveze podanega  $Q_{es.modif}$  je zahtevno meriti, težko pa bo upoštevanje le-tega tudi nadzirati v praksi. Zato smo naredili izračune za fiksne vrednosti ekoloških pretokov. Grobo ocenjeni ekološki pretok znaša že prej omenjenih  $3,73 \text{ m}^3/\text{s}$ , povprečje mesečnih vrednosti  $Q_{es.modif}$  pa  $6,41 \text{ m}^3/\text{s}$ . V tabeli 4 so poleg izračuna za podane različne mesečne vrednosti prikazani še rezultati izračunov za fiksne vrednosti, in sicer za 4, 5 in  $6 \text{ m}^3/\text{s}$ . Če primerjamo varianto s spremenljivimi vrednostmi in varianto za fiksne  $6 \text{ m}^3/\text{s}$ , izračunamo le malo nad 1 % razlike v proizvedeni EE. Na podlagi tega lahko sklepamo, da bi bila fiksna vrednost ekološkega pretoka  $6 \text{ m}^3/\text{s}$  s tehničnega vidika bolj sprejemljiva kot variabilne mesečne vrednosti. Visoke vrednosti  $Q_{es.modif}$  so tako ali tako v mesecih, ko je presežek vode po navadi precej večji od nazivnega pretoka predvidene elektrarne. O tem se lahko prepričamo tudi s pomočjo hidrogramov na slikah 6, 7 in 8.

Tabela 4: Vpliv vrednosti ekološkega pretoka na proizvodnjo EE

| Varianta:   | EE 30 let<br>[GWh] | Letni prihodek |        |
|---|--------------------|----------------|--------|
|   |                    | [€]            | [€/kW] |
| 1. 2x22,55 kW; brez IP                                      | 8,59               | 30.219         | 670,04 |
| 2. 2x22,55 kW; brez IP;<br>$Q_{min}=4 \text{ m}^3/\text{s}$ | 9,31               | 32.742         | 725,99 |
| 3. 2x22,55 kW; brez IP;<br>$Q_{min}=5 \text{ m}^3/\text{s}$ | 8,90               | 31.306         | 694,14 |
| 4. 2x22,55 kW; brez IP;<br>$Q_{min}=6 \text{ m}^3/\text{s}$ | 8,49               | 29.832         | 661,45 |

## 5 SKLEP

Močno upadanje subvencij solarni energiji, slabe vetrovne razmere in težko umeščanje vetrnih elektrarn ob hkratnem naraščanju cen EE preusmerjajo pozornost tudi na do zdaj zanemarjen segment obnovljivih virov, to je izrabo hidroenergetskega potenciala vodotokov z izjemno nizkimi padci. S simulacijami mogoče proizvodnje EE s pomočjo predstavljenega računalniškega modela smo pokazali, da najbolj kompleksna in najbolj zahtevna varianta izvedbe postroja MHE s stališča vodenja ni najbolj smiselna. Precej višja investicija in zmanjšana robustnost obratovanja se težko upravičita z le 3 % višjim dohodkom v teoriji, v praksi pa zaradi popolne podrejenosti obratovanja MHE danim razmeram tudi te razlike ne bi bilo mogoče doseči. Kljub pogojevanju mesečno variabilnih vrednosti ekološkega pretoka s strani Ribiške zveze, bi bilo za lažje obratovanje MHE in nadzor nad izrabo vode smiselno poiskati fiksno kompromisno vrednost. Z instalirano močjo MHE na obravnavani lokaciji ni smiselno preseči 50 kW, kar pomeni mejo mikro področja. Z izvedbo postroja

2x22 kW bi tako na letni ravni lahko ustvarili dobrih 30.000 evrov prihodka. Ta vrednost pa je lahko izhodišče za iskanje ekonomskega računa in pomoč morebitnim investitorjem pri odločanju za investicijo.

## LITERATURA

- [1] [http://www.westernrenew.co.uk/wre/hydro\\_basics/machines/archi-medes\\_screw\\_turbines](http://www.westernrenew.co.uk/wre/hydro_basics/machines/archi-medes_screw_turbines) (3.7.2013).
- [2] <http://www.mannpower-hydro.co.uk/casestudy.php> (3.7.2013).
- [3] Okoljski vidiki in usmeritve za ustrezno revitalizacijo mlinov na belokranjskih vodotokih in umestitev malih hidroelektrarn, Končno poročilo; OIKOS, Kamnik, Maj 2012.
- [4] H. Lavrič, A. Rihar, R. Fišer: "Strokovne podlage za preveritev ustreznosti tehnologij in izračuni možne proizvodnje električne energije za primer malih hidroelektrarn na belokranjskih vodotokih", Projektna naloga, FE, Ljubljana, December 2012.
- [5] Layman's handbook on how to develop a small hydro site, 2. Izdaja, 1998, [http://www.seai.ie/Renewables/Hydro\\_Energy/EU\\_layman's\\_guide\\_to\\_small\\_hydro.pdf](http://www.seai.ie/Renewables/Hydro_Energy/EU_layman's_guide_to_small_hydro.pdf) (3.7.2013).
- [6] S. J. Williamson, B. H. Stark, J. D. Booker, "Low head pico hydro turbine selection using a multi-criteria analysis", Renewable Energy (2012).
- [7] <http://rehart.de/en/rehart-gmbh-engl/produkte-engl/wasserkraftschnecken-engl.html> (3.7.2013).
- [8] <http://www.gess.cz/en/small-water-plant-archimedean-screw-turbine.html> (3.7.2013).
- [9] <http://www.ecoevolution.ie/pdfs/Turbine%20Efficiency%20comparison.pdf> (3.7.2013).
- [10] A. Dietz, A. Groeger, C. Klingler, "Efficiency improvement of small hydroelectric power stations with a permanent-magnet synchronous generator," In Proc. Electric Drives Production Conf. (EDPC), str. 93–100, 2011.
- [11] A. Rihar, "Računalniški model male hidroelektrarne", Diplomaska naloga, FE, September 2012.
- [12] [http://vode.arso.gov.si/hidarhiv/pov\\_arhiv\\_tab.php](http://vode.arso.gov.si/hidarhiv/pov_arhiv_tab.php) (3.7.2013).
- [13] [http://www.borzen.si/si/cp/Shared%20Documents/Podpore\\_slo.pdf](http://www.borzen.si/si/cp/Shared%20Documents/Podpore_slo.pdf).

**Henrik Lavrič** je diplomiral leta 1997, magistriral leta 2001 in doktoriral leta 2004 na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Zdaj je zaposlen na isti ustanovi kot asistent v Laboratoriju za elektromotorske pogone. Področje njegovega raziskovalnega dela so načrtovanje in optimizacija elektromotorskih pogonov, linearni in hibridni ojačevalniki, močnostni pretvorniki in specialni merilni pretvorniki za zahtevna industrijska okolja.

**Andraž Rihar** je diplomiral leta 2012 na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Zdaj je zaposlen na isti ustanovi kot mladi raziskovalec v Laboratoriju za robotiko. Področje njegovega raziskovalnega dela obsega računalniško modeliranje malih hidroelektrarn in elektromotornih pogonov. V sklopu podiplomskega študija je to področje razširil še na analizo in sintezo človeškega gibanja.

**Rastko Fišer** je diplomiral leta 1984, magistriral 1989. in doktoriral 1998. na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani, kjer je tudi zaposlen kot izredni profesor. Predava predmete s področja električnih pogonov in močnostne elektronike ter je predstojnik Laboratorija za elektromotorske pogone. Leta 1999 je za doktorsko disertacijo prejel nagrado dr. Vratislava Bedjaniča. Njegovo raziskovalno delo je povezano z modeliranjem rotacijskih in linearnih električnih motorjev, načrtovanjem elektromotorskih pogonov ter novimi pristopi na področju nadzora stanja in diagnostike rotacijskih strojev. Rastko Fišer je član več združenj IEEE in SLOSIM.