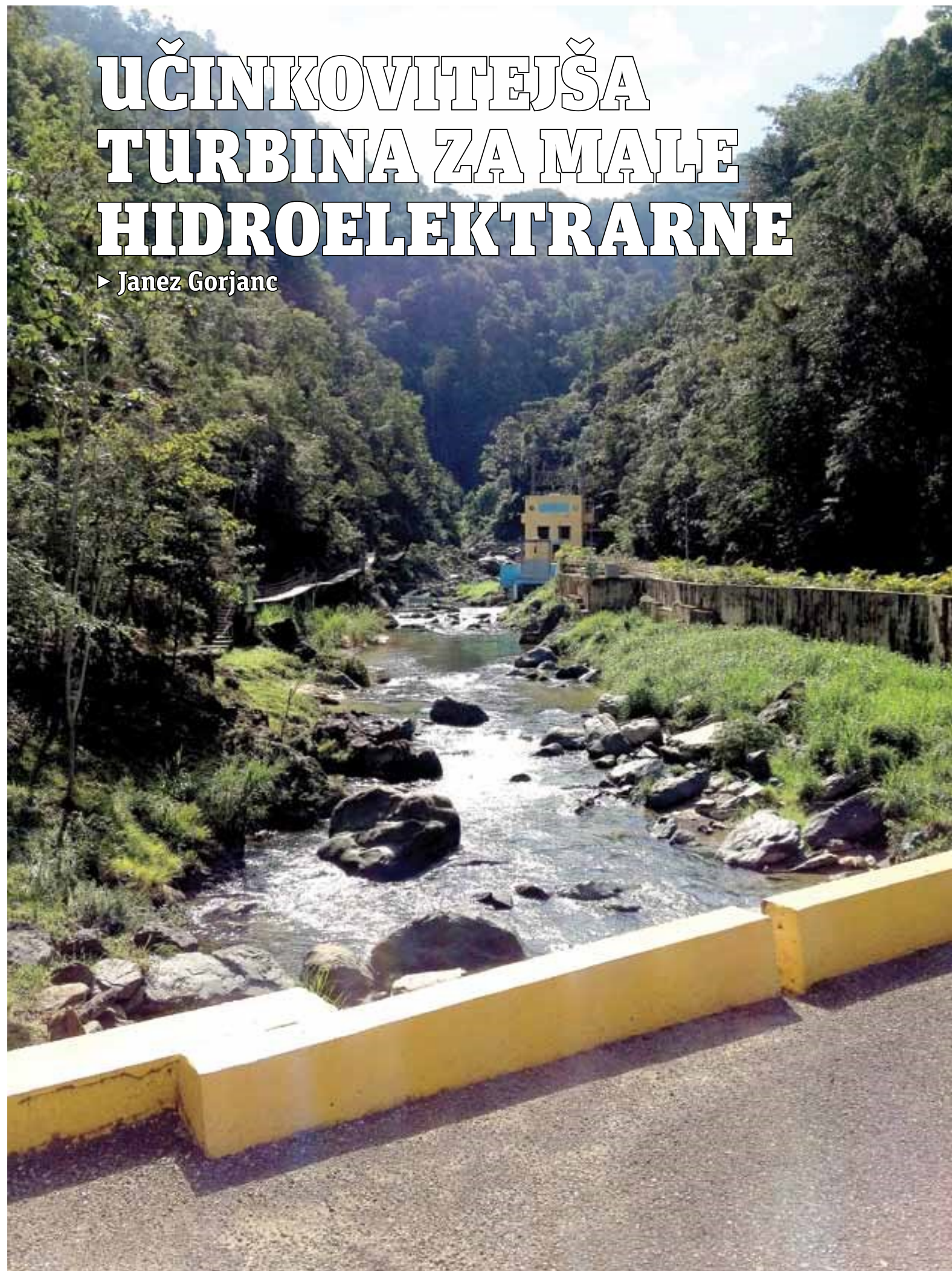


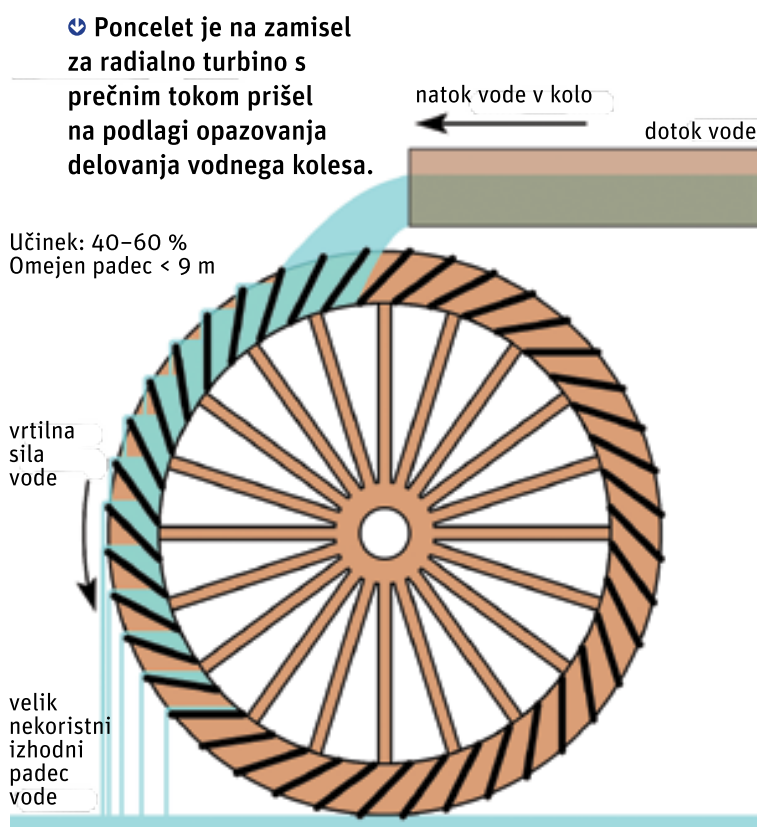
# UČINKOVITEJŠA TURBINA ZA MALE HIDROELEKTRARNE

► Janez Gorjanc



Turbina je ključna komponenta v sestavi agregata za proizvodnjo električne energije. Čeprav poznamo več tipov turbin (Kaplanova, Francisova, Peltonova in njihove izvedbene podvrste), je v tem prispevku govor samo o inovativni izboljšavi dvojno pretočne radialne turbine, imenovane Banki (tudi cross-flow), ki se zaradi svojih lastnosti dobro obnesejo v malih hidroelektrarnah, saj omogočajo najučinkovitejšo izrabo celoletne pretočne vode.

**U**ČINEK (IZKORISTEK) TURBINE JE BISTVENE-GA POMENA pri načrtovanju vodnih energetskih agregatov. Gre za razmerje med pridobljeno močjo iz turbine in močjo vtočne vode, tj. zmnožkom hitrosti masnega pretoka, zemeljske težnosti in razpoložljivega padca vode na gonilnik turbine. Turbine tipa banki – kar se tiče najvišje učinkovitosti – resda zaostajajo za drugimi vrstami izvedb v analogni tehniki, vendar jih zaradi preprostejše izdelave in drugih prednosti pri instalaciji razmeroma pogosto uporabljajo, in sicer predvsem pri gradnji malih hidroelektrarn. K temu bo sta v prihodnje gotovo pripomogli tudi v nadaljevanju opisani inova-





⦿ Donát Bánki (1859–1922) je bil madžarski strojni inženir in izumitelj. Po njem se imenuje tip dvojno pretočne radialne turbine.

⦿ Prerez turbine tipa cink na patentni prijavi iz leta 1917

ciji, ki povečujeta učinkovitost teh turbin po masnem pretoku vode in izboljšujeta energetska koriščenja hidravličnega padca pri razširjenem razponu pretočne vode v turbini do razmerja 1 : 10.

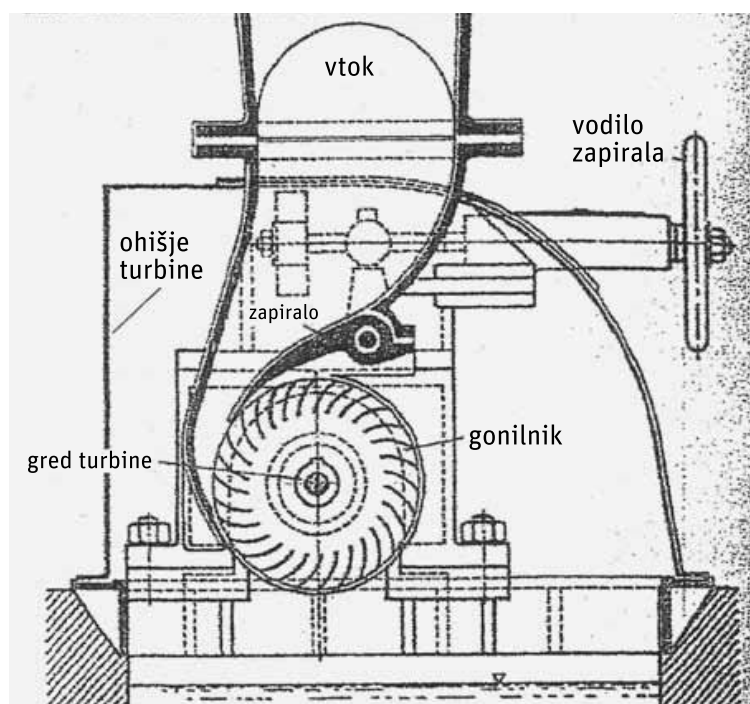
### ▶ ZGODOVINSKI RAZVOJ TURBIN TIPA BANKI

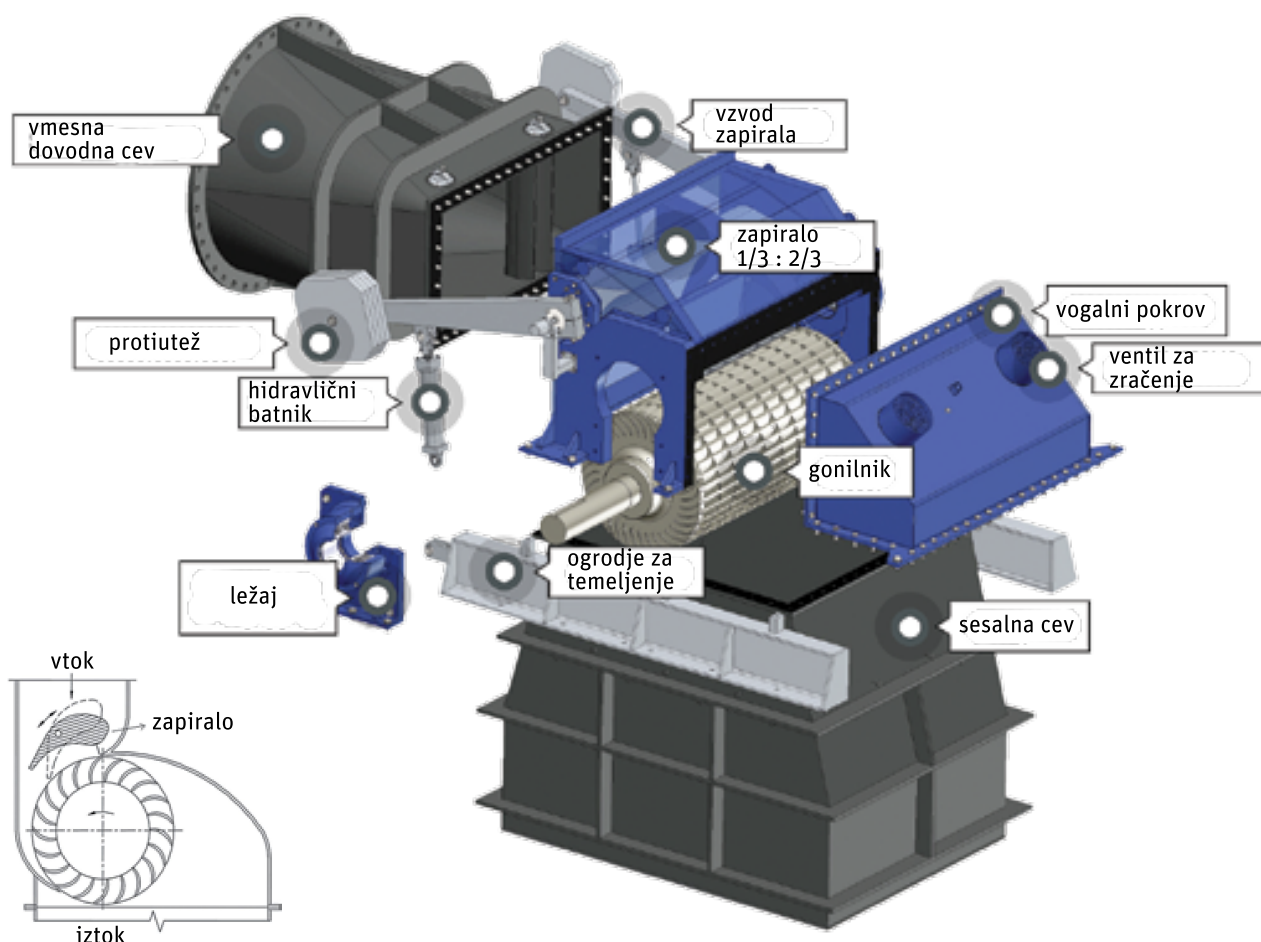
Teoretično podlago za radialno turbino s prečnim tokom je v 18. stoletju prispeval Francoz Poncelet, ki se je zgledoval po vodnem kolesu. Prvi je njeno praktično izvedbo leta 1903 patentiral avstralski inženir A. M. Michell, po nekajletnih raziskavah v Nemčiji pa jo je zelo izpopolnil (in leta 1917 patentiral) madžarski strojni inženir Donát Bánki. Izboljšana turbina je v praksi dosegala vrhnji izkoristek okrog 75 %. Čeprav je Bánki po raziskavah v letih 1916–1918 določil teoretično možnost vrhnjega izkoristka te turbine pri 88 %, te vrednosti v zgodnji praksi nikoli niso dosegli.

Zasluge za naslednje pomembne izpopolnitve ima nemški tovarnar

Fritz Ossberger, ki je leta 1933 v sodelovanju z Michellom vtok vode v gonilnik razdelil na dve stopnji v razmerju 1/3 : 2/3 glede na osno širino gonilnika, s čimer je izboljšal izkoristek turbine v širšem razponu pretočne vode do razmerja 1 : 6. Zaradi priključka vzporedne sesalne cevi (cev z enako vtočno in iztočno površino v preseku) je bilo turbino mogoče ustrezno dvigniti iznad spodnje nihajoče odtočne vode in pri tem vedno izkoristiti celotni možni padec vode. S tem je vrhnji izkoristek turbine dosegel 80–82 %, v naslednjih letih pa ga je inženirjem z dodelavo gonilnika uspelo dvigniti na 83–84 %. (Pri tem gre za izkoristek turbine in ne agregata – izhodne električne moči iz generatorja; večja turbina ima tudi boljši izkoristek od manjše).

Po daljšem premoru v razvoju tovrstne turbine je naslednji pomemben korak naprej naredil češki inženir Miroslav Cink leta 1982. V Karlovih Varih je začel izdelovati turbine z izboljšanim vrhnjim izkoristkom 85–87 %, ki ga je dosegel s spremembo turbinskega zapirala. To deluje krožno po obodu, tj. po celotni širini gonilnika, ki ob tem manj spreminja vtočno geometrijo vode v gonilnik. Cink je turbino izpopolnil tudi s sesalno-difuzorsko cevjo (cev s povečano presečno iztočno površino glede na vtočno površino), ki poleg padca vode v celoti izrabi preostalo hitrostno-kinetično energijo izhodne vode. Ker so se njegove turbine ponašale z boljšim vrhnjim izkoristkom, s solidno izdelavo in ugodno ceno, so bile zelo konkurenčne izdelkom tovarne Ossberger; tako jih je mala razvojna tovarna (ob zagonu z državno podporo) v vsega nekaj letih izdelala več kot 500. Prav zato jo je omenjena nemška tovarna leta 2005





s patenti vred odkupila in nadaljnjo proizvodnjo tega sistema turbin zaradi konkurenčnih razlogov ukinila.

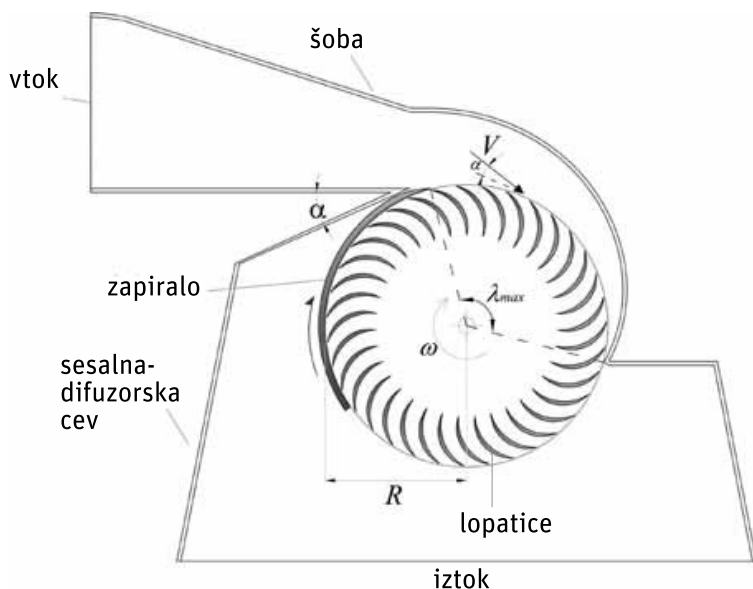
Turbine tipa banki sistema Ossberger so dandanes široko uveljavljene in do leta 2018 jih je bilo po vsem svetu instaliranih že več kot 10.000. Pri energetskem izkoriščanju velikih vodotokov pogosto uporabljajo dva ali več turbinskih agregatov, kar je tehnološko in ekonomsko upravičeno, pri majhnih vodotokih pa so gospodarnejše male hidroelektrarne z enim samim agregatom, s katerim lahko kar najbolje izkoristimo celoletni neizenačeni režim vodotoka.

#### ► DELOVANJE TURBINE TIPRA BANKI

Turbina s prečnim tokom oziroma dvojno pretočna radialna turbina je

v osnovi zgrajena iz dovodne šobe (konfuzorja), turbinskega zapirala za uravnavanje pretočnosti vode v turbini, gonilnika z lopaticami in pod gonilnik turbine dodane sesalne (sesalne-difuzorske) cevi – vse v zaprtem ohišju do izhoda vode v odvodni kanal. V ohišje gonilnika je vstavljen regulacijski ozračevalni ventil, ki uravnava podtlak in s tem vodostaj sesalne vode pod gonilnikom. Ozračevalni ventil lahko deluje ob pomoči uravnatežene vzmeti ali z avtomatiziranim procesno vodenim krmiljenjem. Lopatice so simetrično razporejene po krožnem obodu gonilnika, ki ima glede na potrebe hidrostatične in oblikovanja gonilnika na osi najmanj dva krajna utrjevalna diska ali še več sredinsko razporejenih diskov nosilcev lopatic. Posamezna lopatica ima ločni prerez in njen vrh z obodno

🔗 Glavni sestavni deli izboljšane turbine tipa banki nemškega proizvajalca Ossberger



➤ **Prerez izboljšane turbine tipa banki iz patente prijave Miroslava Cinka iz leta 1982**

tangento gonilnika tvori značilen kot, notranja konica lopaticice pa ima radialno usmeritev na os gonilnika. Vodni curek iz šobe vstopa v lopaticice gonilnika dvakrat, in sicer najprej iz obodnega dela navznoter (čemur rečemo prva stopnja oddaje vodne moči), nato pa še iz notranjega prečnega prehoda ob osi gonilnika v lopaticice navzven (čemur rečemo druga stopnja oddaje vodne moči). Ker torej vodni curek ob strani osi gonilnika dvakrat prečka lopaticice, se turbina tega tipa imenuje turbina s prečnim tokom (angl. cross-flow turbine, nem. Durchströmturbine).

Zgradba turbine tipa banki je v primerjavi z analogno tehniko Kaplanovih, Francisovih in Peltonovih torej razmeroma preprosta, zato pa je geometrija vtočne in prehodne vode pri konstrukciji gonilnika zelo zapletena in vsebuje toliko možnih vplivnih spremenljivk, da teorije, ki bi v celoti zadovoljivo opisala delovanje turbine za največji možni učinek, navkljub v svetu vse pogostejšim laboratorijskim in računalniško-eksperimentalnim raziskavam še vedno nimamo. Učinkovitost turbine tipa banki je bila v preteklosti v primerjavi z bolj

raziskano in glede na izrabo vodne moči zmogljivejšo analogno tehniko vedno precej nižja, zaradi česar jo je stroka nekoliko podcenjevala. Dejstvo je, da je najprimernejša za izhodne moči do približno 3000 kW ter izkoriščanje manjših in srednjih vodotokov, vendar v širokem razponu pretočnih razmer, tj. za pretok vode od 20 do 10.000 l/s in padec od 2 do 200 m. Njene prednosti so v samočistilnosti gonilnika (zaradi dvojnega pretoka vode skozi njegove lopaticice se v njem ob vstopu za gozdene nečistoče ob izhodu vode v drugi stopnji odplaknejo iz lopatic) ter nezahtevni postavitvi in vzdrževanju. Zaradi tega so te turbine marsikje – predvsem v deželah v razvoju in v preteklosti tudi pri nas – na manjših vodotokih postavili kar v samogradnji.

#### ▶ INOVATIVNE IZBOLJŠAVE

Novejše laboratorijske raziskave kažejo na možen doseg vrhnjega učinka turbine tipa banki do okoli 90 %, kar pomeni precejšnje izboljšanje glede na izvirne izvedbe in tudi Ossbergerjeve turbine. Vendar je takšne izkoristke mogoče doseči samo z optimalnim dotokom vode v gonilnik, v laboratorijski tehniki in brez turbinskega zapirala. Brez slednjega pa turbina v naravnih okoliščinah ne more delovati. Sedanje izvedbe zapirala v praksi nižajo vrhnji učinek turbine, še bolj pa se njihov vpliv pozna v razponu pripiranja pretočne vode, zaradi porušena optimalne vtočne geometrije v gonilnik in slabitve zgoščenosti vodnega curka v lopaticice gonilnika. S proučevanjem delovanja različnih izvedb turbin tipa banki in merjenjem energetskih parametrov smo v podjetju LIT

Gorjanc, d. o. o., ugotavljali nekatere rezerve v turbini, pa tudi možnosti za izboljšanje energetskega koriščenja pretočne vode v širšem razponu in glede na vsakokratne vodne razmere. S preskusi smo uveljavili tehnične izboljšave in ključni dve tudi patentirali.

Bistvo patenta P.SI 22684 je konstrukcijska sprememba zapirala, ki po novem deluje prečno pravokotno po osni širini gonilnika. Pri tem se vtočna geometrija vode v gonilnik in zajem števila gonilnih lopatic glede na izvedbeno konstrukcijo ne spremenita, vodni curek (fluid) v lopatice gonilnika pa ostaja kolikor je mogoče zgoščen. Novi sistem turbinskega pripirala izboljša učinkovitost turbine predvsem na stopnji pripiranja pretoka vode, zaradi česar je omogočen tudi razširjen razpon energetskega koriščenja pretočne vode v turbini do razmerja 1 : 10. Za regulacijo dotoka vode na gonilnik turbine skrbi procesno vodena oljna hidravlika, ki širino med segmenti zapirala nastavlja glede na nivo razpoložljive vode.

Obstoječe izvedbe različnih proizvajalcev vodijo turbinsko zapiralo vzporedno na os gonilnika, pri čemer se ob zmanjševanju pretoka slabijo optimalno nastavljena geometrija vtočne vode v gonilnik, zgoščenost vodnega curka in zajem delovnih lopatic gonilnika. Prav zato na primer Ossbergerjev sistem deli vtok vode v gonilnik prečno po osi gonilnika v razmerju  $2/3 : 1/3$ , s čimer pri spremembah pretočnih razmer izboljša zgoščenost curka in zajem delovnih lopatic gonilnika. S tem se sorazmerno izboljša učinek turbine v razponu pretočne vode do razmerja 1 : 6. Vendar Ossbergerjevo turbinsko zapiralo zaradi spe-



cifičnega oblikovanja ne omogoča optimalne vtočne geometrije vode v gonilnik niti pri polnem pretoku, zato slabí tudi vrhnjo možno učinkovitost turbine.

Patent P. SI 23682 izboljšuje sesalno-difuzorsko cev tako, da omogoča polni izkoristek vodnega padca pod gonilnikom turbine v enakem razponu energetskega koriščenja pretočne vode, kot to omogoča izboljšano turbinsko zapiralo, tj. do razmerja 1 : 10.

Sesalna-difuzorska cev v primerjavi z vhodno presečno površino povečuje izhodno presečno površino cevi. Z njo se poleg padca vode pod gonilnikom izkoristi tudi preostala hitrostna-kinetična energija vode, ki ima pri polnem pretoku ob izhodu hitrost samo še okrog 1 m/s, kar je energetsko zanemarljivo. Višina sesalnega padca vode pod gonilnikom je enakovredna enaki višini tlačnega padca nad gonilnikom; do neke mere je višji sesalni padec vode (do dopustne višine pet metrov) pod gonilnikom celo ugoden, in sicer zaradi delovanja podtlačnega režima v ohišju gonilnika (zračni upor pri vrtenju gonilnika in prehodnosti vode v gonilniku je manjši). Sesal-

➦ Izum P.SI 22684 v odprtem in pripiralnem režimu omogoča optimalni vtok vode v gonilnik turbine. S takšno izvedbo turbinskega zapirala je učinkovitost turbine mogoče izenačiti z laboratorijsko pridobljenimi rezultati.

na-difuzorska cev je v praksi lahko dolga od enega do pet metrov, da se izognemo poškodbi gonilnika zaradi kavitacije.

S patentom izboljšano turbinsko zapiralo z delovanjem prečno po osi gonilnika omogoča, da sesalno-difuzorsko cev znotraj cevi opredelimo z delilnim prekatom v določeni širini, nameščenim navpično pod turbinskim zapiralom, ki je vstavljeno na končno širino še uporabnega pretoka za energetska koriščenje, tj. na 1/10 polne pretočne širine zapirala. Tako v tem prekatu sesalne-difuzorske cevi lahko ohranimo zadovoljivo izhodno hitrost vode, ki ni manjša od 0,5 m/s, kar je pogojena hitrost za polno vzdrževanje vodnega stebra v sesalni cevi. Takšna hitrost izhodne vode še lahko odnaša dovolj zraka in vodnih izparin, ki se pojavljajo v ohišju gonilnika, ter s tem zagotavlja zadovoljivi podtlak za vzdrževanje vodnega stebra v cevi. Delilni prekat znotraj sesalne cevi ima primeren odmik od gonilnika, tako da delujoči podtlak v prekatni cevi polni celoten vodni stebel v sesalni-difuzorski cevi, tudi v zunanjih dveh prostorih cevi ob prekatu, ki v primerih pripore ni-

mata več pretoka vode iz gonilnika. Da vodostaj ne bi zalival gonilnika, za uravnava ustrezne višine vodnega stebra v cevi služi ozračevalni ventil, delujoč s pomočjo vzmeti ali procesno vodene avtomatike.

Opisana izboljšava pomeni prednost pred sorodno izvedbo sesalne-difuzorske cevi pri turbinah tipa banki/Cink, ki delujejo s turbinskim zapiralom po vsej osni širini gonilnika tako, da to znižuje pretok vode z zmanjševanjem zajema lopatic gonilnika. Takšna delitev sesalne cevi s prekatom bi bila neučinkovita oziroma fizikalno nesmiselna.

Patent izboljšuje tudi Ossbergerjevo izvedbo turbin tipa banki, kjer je vtok vode v gonilnik razdeljen v razmerju 1/3 : 2/3. S tem je doseženo koriščenje pretočne vode do razmerja 1 : 6, vendar ta sistem za odvod vode izpod gonilnika uporablja vzporedno sesalno cev. Ta resda ohrani pogojeno hitrost vode 0,5 m/s do najnižjega uporabnega pretoka, tj. 1/6 polnega pretoka, vendar pri tem ne izrabi zadovoljivo izhodne hitrostne-kinetične energije pri polnem pretoku, ki je običajno okrog 3 m/s, kar je enakovredno 0,46 m geodetske višine. To je razmeroma visoka izguba padca za male hidroelektrarne, kjer so najpogostejše izvedbe od tri do deset metrov.

Izpopolnjena turbina tipa banki s po opisanem izumu spremenjenim zapiralom oziroma v sklopu sesalne-difuzorske cevi inovativno vstavljenim prekatom optimira energetska izkoristek pretočne vode v najširšem možnem razponu, tj. 1 : 10, in to tako po volumskem pretoku kot tudi po hidravličnem padcu. Navedena tehnika uravnavanja pretoka vode v agregatu tipa banki, ki iz-

▼ Prototip turbine s patentirano regulacijo pretoka potrjuje dobro energetska izrabo pretočne vode celo prek razmerja 1 : 10.

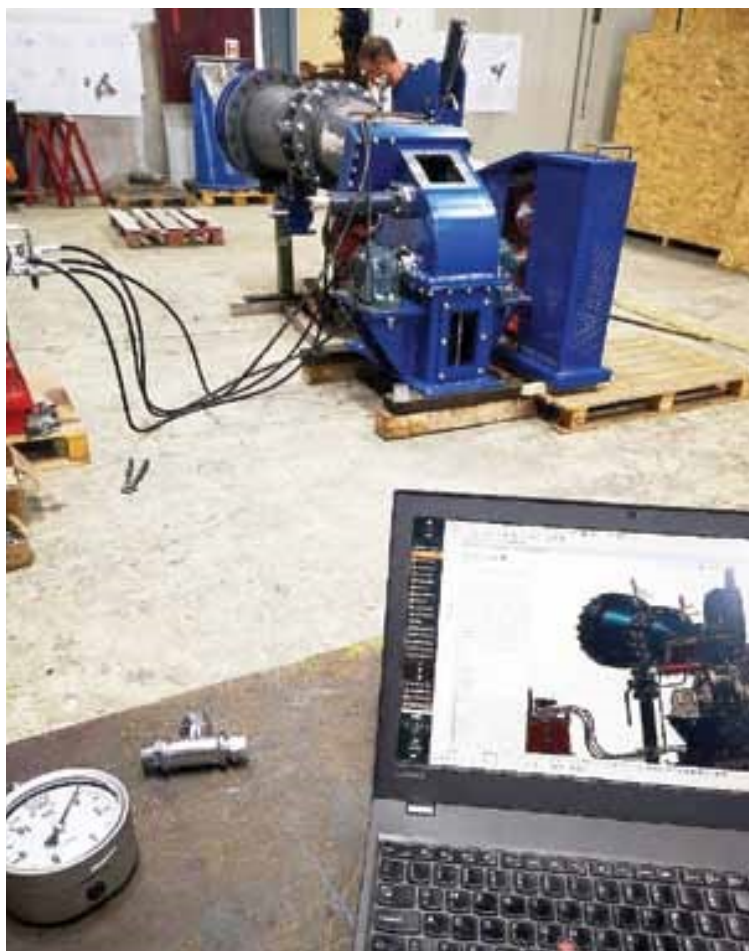


boljšuje tudi povprečni izkoristek turbine v razponu pretočne vode, ima prednost pred obstoječo tovrstno tehniko, v območju pretočne uporabnosti pa tudi pred analogno tehniko. Prednost izboljšane turbine se bo pokazala še zlasti v ugodnem koriščenju hudourniških vodotokov, ki so pri izvedbah malih hidroelektrarn najpogostejši.

#### ► **PROTOTIP IN IZDELAVA INOVATIVNIH TURBIN**

Na podlagi zaščiteneh patentov je bil za potrebe vgradnje v malo hidroelektrarno na Spodnjem Jezerskem izdelan prototip turbine z naslednjimi podatki o lokaciji: padec vode – 40 m (neto), pretok – 750 l/s, najnižji energetsko uporabni pretok – 75 l/s, število vrtljajev gonilnika s premerom 340 mm – 750 vrt./min, dolžina sesalne-difuzorske cevi – 4,5 m (neto), izhodna moč – 240 kW. Občina Jezersko je takoj izdala soglasje in tudi pozitivno stališče do izvedbe male hidroelektrarne na omenjeni lokaciji, ki bi s proizvedeno električno energijo pokrivala povprečno letno porabo prek 200 okoliških gospodinjstev. Toda nekaj mesecev pozneje je Ministrstvo za okolje in prostor pobudo za projekt zavrnilo zaradi posegov v naravno okolje (NATURA 2000), zato smo s podjetjem SIAPRO, d. o. o., ob koncu leta 2015 sklenili pogodbeni prevzem inovacije z zaščitnimi patenti in prototipom ter dogovor o nadaljnjem sodelovanju pri izdelavi in naročilih turbin.

Naslednje leto smo se dogovoril za postavitev prototipa turbine na lokaciji Trebenče pri Cerknem z naslednjimi podatki: padec vode – 22 m (neto), polni pretok – 570 l/s,

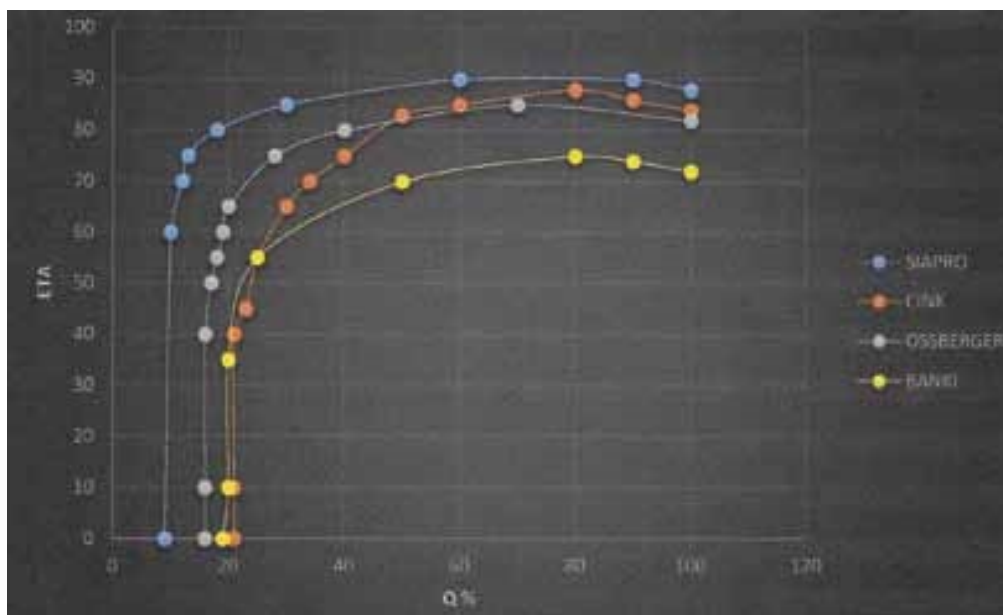


minimalni pretok – 57 l/s, število vrtljajev gonilnika – 600 vrt./min, dolžina sesalne cevi – 1,2 m, načrtovana izhodna moč agregata – 97 kW. Meritve, opravljene po montaži, so pokazale, da prototip turbine z vključenima inovacijama pri polovičnem pretoku vode (0,285 m<sup>3</sup>/s) in padcu vode 22,2 m (neto) z nekaj nihanja daje izhodno moč 48 kW. Ob upoštevanju izkoristka turbine v generatorju (0,913 »sever«) je ocenjeni izkoristek turbine 85 %, kar je ob omejeni polovični moči prototipa turbine, ki v vseh konstrukcijskih podrobnostih še ni optimalen, sprejemljivo dobro. Pri 20-odstotnem pretoku (0,114 m<sup>3</sup>/s) in padcu vode 22,3 m je izhodna moč agregata 19,2 kW (za generator 0,910) in izkoristek turbine 84,6 %. Pri pretoku 16,2 % je izhodna moč agregata 15,6 kW in izkoris-

🔗 Preskušanje inovativne turbine tipa banki v podjetju SIAPRO, d. o. o.



⇒ Izkoristki turbin sistema tipa banki v odvisnosti od pretoka vode, ki jih potrjuje praksa – izvedba turbine po patentih P.SI 22684 in P.SI 23682



tek turbine 84,8 %, pri pretoku 12 % pa je izhodna moč agregata 10,5 kW in izkoristek turbine 77,1 %. Turbina potrjuje dobro energetske izrabo pretočne vode celo prek razmerja 1 : 10. Pri turbinskem zapiralu v širini 9,2 % pretočne moči turbine (pretok 0,0524 m<sup>3</sup>/s, gen. 0,90) je izhodna moč agregata 7,3 kW in izkoristek turbine 71 %. Ob tem je treba poudariti, da Ossbergerjeva turbina že pri 16-odstotni pretočnosti ne daje več uporabne moči, še bistveno manjši energetske koristi razpon pretočne vode pa zmorejo Francisova, Kaplanova in Kaplanova cevna turbina (tudi ob dvojni regulaciji vtoka vode v turbino). Takšen (in celo večji) razpon koriščenja pretočne vode zmore tudi Peltonova turbina, ki pa zaradi ustroja ne omogoča delovanja sesalne cevi in tudi ni primerna za instalacije s padcem vode pod 30 m. Ob obratovanju prototipa so bile pridobljene tudi koristne izkušnje za nekatere dopolnitve konstrukcije turbinskega zapirala.

Ko smo pred dobavo treh inovativnih turbin kupcem na Japonsko Slovenskemu podjetniškemu skladu

oddali vlogo za povračilo stroškov preskusa turbine v češkem industrijskem laboratoriju Hydraulic Research Center Blansko, s. r. o., ki je delniška družba tovarne Lito stroj Power – tak preskus bi namreč zmanjšal tveganje tržne ponudbe, od ugledne institucije pridobljeni atest pa bi povečal kupčevo zaupanje, kar je pri trženju vodnih turbin še zlasti pomembno, so nas zavrnil z obrazložitvijo, da »trenutno ni podpornega produkta, pri katerem lahko stara podjetja kandidirajo za pridobitev nepovratnih sredstev«. Takšen industrijski preskus vodne turbine je finančno zahtevna stvar, ki ga majhno podjetje težko zmore, zato bi nujno potrebovalo nepovratni kredit. Tega bi država s poznejšo povečano proizvodnjo podjetja in DDV-jem zagotovo dobila povrnjenega.

#### SPLETNI NASLOVI IN LITERATURA

- ▶ [en.wikipedia.org/wiki/Cross-flow\\_turbine](https://en.wikipedia.org/wiki/Cross-flow_turbine)
- ▶ Adhikari and Wood: *The Design of High Efficiency Crossflow Hydro Turbines: A Review and Extension: Energies 2018, 11, 267.*