

U susret revitalizaciji turbina HE Đerdap 2: Merenje rasporeda vektora brzina na ulazima turbina

Dušan Prodanović*, Damjan Ivetić*, Predrag Vojt**, Milan Čušić**

* Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet

** Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“ a.d., Beograd

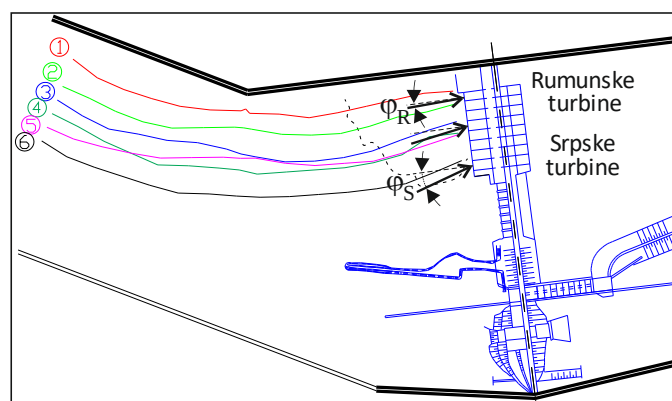
Rezime - Kontinualno merenje protoka na brojnim turbinama hidroelektrana se standardno radi nekom od relativnih metoda (na primer Winter-Kennedy). Umesto da se meri složeno polje brzina u jednoj proticajnoj ravni i da se njenom integracijom dobije protok, meri se samo jedna karakteristična veličina a na fizičkom modelu se odrede parametri preslikavanja vrednosti te veličine u trenutni protok. Najčešće se koristi Winter-Kennedy metoda gde se merenjem razlike pritisaka dobija relativna (indeksna) vrednost protoka. Merna nesigurnost tako određenog protoka je znatno veća od nesigurnosti merenja ostalih relevantnih veličina za određivanje optimalnih radnih uslova turbine. Da bi se smanjila merna nesigurnost, potrebno je „apsolutnim merenjima“ celog polja brzina odrediti trenutni protok i preračunati, u realnim uslovima, korekcije indeksne metode. To se posebno odnosi na hidroelektrane čija dispozicija nije „idealna“ kao što je bila na fizičkom modelu, kao što je HE „Đerdap 2“ sa poznatim problemom „kosog dostrujavanja“. Sa ciljem bolje procene hidrauličke efikasnosti turbina i prikupljanja podataka o realnim uslovima rada turbina i ulazne rešetke, a zbog planiranih radova na revitalizaciji, projektovan je i primenjen inovativni sistem za apsolutno merenje protoka koji je prikazan u ovom radu. Na pokretni ram, pozicioniran na ulazu u turbinu uzvodno od grube rešetke, postavljeno je 15 elektromagnetnih (EM) senzora u jednoj horizontalnoj ravni, zajedno sa dva redundantna akustična Doppler senzora. Svaki od senzora meri sve tri komponente brzina. Ram se podiže duž cele visine proticajnog preseka snimajući celo polje brzina. Položaj rama se prati pomoću dva enkodera, dok se dva senzora pritiska koriste za merenje dubine vode. Merenja su sinhronizovana sa lokalnim SCADA sistemom odakle se preuzimaju podaci o radu turbine. Uvažavajući specifičnosti mernog sistema, novorazvijenih EM sonde i postojećih hidrauličkih uslova, razvijena je adekvatna procedura za procenu nesigurnosti izmerenog protoka. U ovom radu je prikazana merna metoda i dati su neki rezultati merenja na agregatima HE „Đerdap 2“.

Ključne reči - Merenje brzine, Merna nesigurnost, Elektromagnetni senzori, Hidroelektrane, Cevne turbine.

1 UVOD

Na deonici reke Dunav, u zoni zajedničkog interesa Republike Srbije i Republike Rumunije, nalaze se dve velike hidroelektrane (HE): „Đerdap 1“ i „Đerdap 2“ koje predstavljaju ključne elemente elektroenergetskog sistema. U narednom periodu je planirana revitalizacija cevnih agregata na HE „Đerdap 2“ pri čemu je jedan od ciljeva i podizanje

hidrauličke efikasnosti. Na ulazu u HE „Đerdap 2“ se javlja fenomen dostrujavanja vode pod značajnim uglom [1, 2]. Zbog toga što realni uslovi dostrujavanja (slika 1) nisu kao na modelu, neophodno je kvantifikovati postojeće uslove i proveriti hidrauličke karakteristike turbina pre, kao i nakon revitalizacije.



Slika 1. HE „Đerdap 2“ sa prilaznim strujnicama Dunava (fizički model, Institut „Jaroslav Černi“ [1])

Merenje protoka na kratkim objektima kao što je ulaz u turbinu HE „Đerdap 2“ je hidraulički komplikovan zadatak. U opštem slučaju, merenje protoka na agregatima HE je definisano kroz nekoliko pravilnika i standarda [3,4]. Iako su cevne, ili Kaplanove turbine za male padove u relativno rasprostranjenoj upotrebi, ne postoje jasne preporuke za merenja protoka u ovim slučajevima. Pored toga, na ulazu u HE „Đerdap 2“ se javlja fenomen dostrujavanja vode pod značajnim uglom u horizontalnoj ravni, čime je polje raspoloživih rešenja za merenje protoka, dodatno suženo [2]. Rešenje koje je prihvaćeno za pouzdano određivanje protoka u specifičnim hidrauličkim uslovima na ulazima u turbine HE „Đerdap 2“ je zasnovano na metodi Brzina-Proticajni presek [5,6]. Za potrebe ovog sistema, projektovane su nove 3D EM sonde, koje su praktično funkcionisale kao EM (hidrometrijska) krila. Petnaest EM sonde je postavljeno na kruti čelični ram širine 14,5 m i visine 3,1 m, koji se može spuštati i podizati po visini proticajnog preseka. Zajedno sa dva enkodera položaja, dva senzora dubine i dva redundantna ADV senzora brzine, prikupljani su podaci pomoću kojih je određena srednja profilska brzina i površina proticajnog preseka. Budući da je sistem inovativnog karaktera [7], posebno je razvijena procedura za procenu merne nesigurnosti protoka [8], koji se dobija proizvodom srednje profilske brzine i površine proticajnog preseka. U sklopu ove procedure,

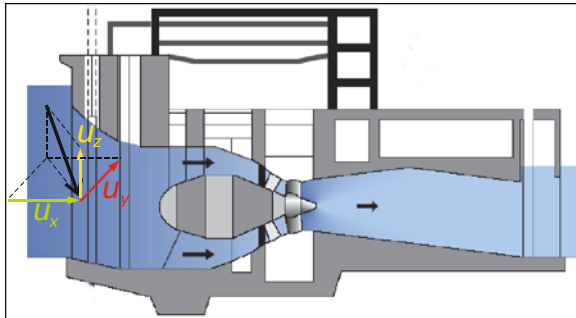
obračunavaju se merne nesigurnosti sistematskog i statističkog karaktera, po različitim veličinama, kao i merna nesigurnost usled varijabilnosti protoka tokom trajanja jednog merenja.

U ovom radu je detaljno predstavljena novorazvijena procedura merenja rasporeda brzina na ulazima u turbine HE „Đerdap 2“, oprema koja se koristi i prateći softver. Dati su neki dobijeni rezultati merenja na turbini A7, sa komentarima i preporukama za poboljšanje.

II METODOLOGIJA

Prema standardu [3] koji određuje načine obavljanja terenskih ispitivanja karakteristika turbina, na turbinama HE „Đerdap 2“ ne postoje adekvatni uslovi da se obavi merenje protoka, jer ne postoji dovoljno dugačka deonica u kojoj je strujanje pravolinijsko. U takvim uslovima, standard dozvoljava da se protok i dalje određuje metodom Brzina-Proticajni presek, odnosno integracijom izmerenog polja podužne komponente brzine U_x i proticajne površine A , pri čemu merenja treba obaviti korišćenjem adekvatne, standardom definisane opreme. Merni profil je obično nizvodno od ulazne rešetke, u niši koja se koristi za brzi predturbinski zatvarač.

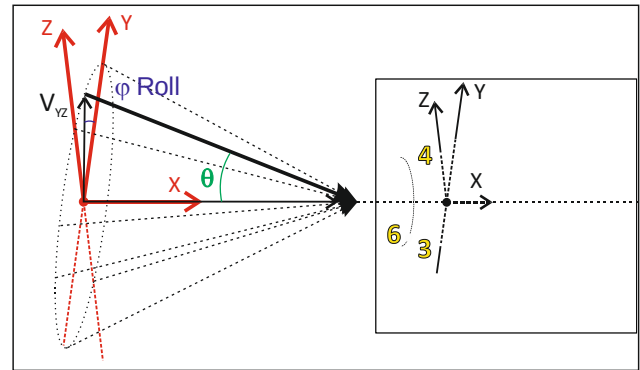
Iz tehničkih razloga, na HE „Đerdap 2“ nije moguće postaviti opremu na profilu brzog predturbinskog zatvarača, već je odlučeno da se meri uzvodno, ispred ulazne rešetke. Da bi se obavilo merenje protoka u takvim uslovima, na osnovu slike 2 se vidi da je neophodno koristiti opremu koja može da izmeri podužnu U_x komponentu brzine sa zadovoljavajućom tačnošću u uslovima postojanja značajne druge dve komponente brzina U_y i U_z , a da pri tome sama oprema tokom merenja ne utiče bitno na rad turbine. Pri tome, treba izmeriti celokupno polje brzina pri jednom radnom protoku turbine koji je približno konstantan.



Slika 2. Cevna turbina sa kosim dostrujavanjem koje onemogućava standardno merenje protoka

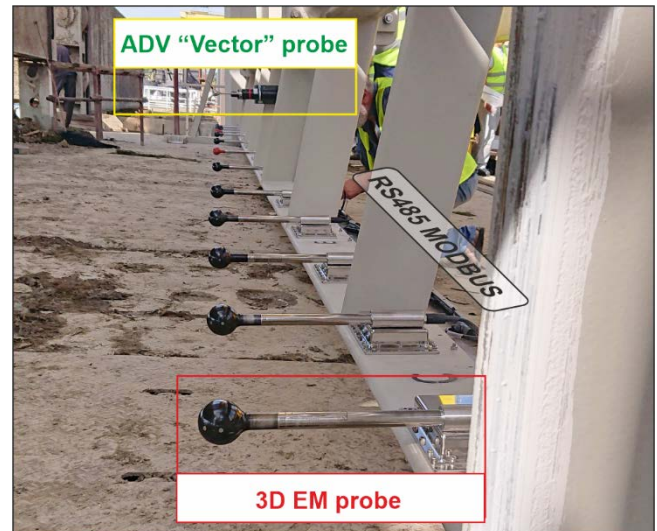
Standardna merenja pomoću hidrometrijskih krila ne obezbeđuju dovoljno pouzdana merenja podužne U_x komponente brzine u uslovima kao sa slike 2. Zbog toga su merenja brzina obavljena novorazvijenim elektromagnetnim (EM) sondama LOG-xXYZ-65 (slika 3) proizvođača „Svet Instrumenata“ [9] koja su u stanju da mere sve tri komponente brzina i to u osnovnom smeru kao i u povratnom toku, što je posebno važno zbog povratnih strujanja (negativno U_x) koje se javlja na ulazu u turbine HE „Đerdap 2“. Zbog važnosti podužne komponente brzine u proračunu protoka, svaka sonda meri tu komponentu sa dva odvojena para elektroda, jedan postavljen po glavnom prečniku (slika 3, elektroda 3 i 1 koja se ne vidi) a drugi pod 45° (elektroda 6 i 5 koja se ne vidi).

Prečnik sferne merne glave EM sonde je 63 mm a ukupna merna zona sonde je prečnika oko 120 mm, kao kod klasičnih hidrometrijskih krila. Merni opseg sonde je ± 5 m/s, tačnost merenja brzina je bolja od 1 % a prag osetljivosti je 0,3 mm/s. Svaka sonda ima u sebi logger sa memorijom za 486.720 merenja, akumulator za samostalni rad kao i priključak za mrežni rad preko RS485 sa MODBUS protokolom. Brzina uzorkovanja je minimum 1 sekunda, mada interno, sonda radi u znatno bržem režimu a finalni podatak je interno osrednjen.



Slika 3. 3D EM sonda sa definisanim koordinatnim sistemom

Sistem za merenje protoka je koncipiran tako da se 15 EM sondi postave u jednoj horizontali na kruti čelični ram, dužine 14,5 m, koji se spušta u vodu uzvodno od grube rešetke kroz vođice grajfera, na ulazu u turbinu, pomoću portalnog kрана. Ukupna visina (dubina) do dna ulaznog profila je 32 m. Postepenim pomeranjem rama po celoj visini preseka (sa ili bez zastajkivanja) se snima polje brzina. Na slici 4 je prikazan detalj donje horizontalne grede, sa postavljenim EM sondama.

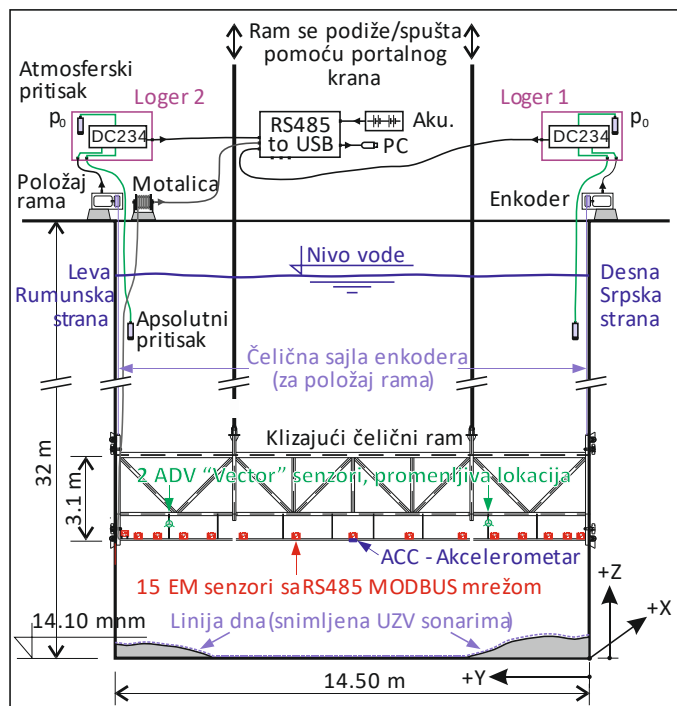


Slika 4. Ram sa postavljenim EM i ADV (UZV) sondama

Kao kontrolno merenje brzine, pored EM sondi, na merni ram (slika 4 gore) su postavljene i dve trokomponentne ADV sonde „Vector“ proizvođača NORTEK [10]. Tačnost sonde je 1%. Da bi se obezbedio neometan i pouzdan rad ADV sonde, korišćene su u autonomnom radu, samo sa lokalnim loggerom i sa baterijskim pogonom, bez spajanja na komunikacioni sistem.

Kompletan merni sistem je prikazan na slici 5. Čelični ram dimenzija 14,5x3,1 m se diže i spušta pomoću kрана kroz vođice predviđene za rad grajfera. Na ramu je u prvim ispitivanjima bio postavljen i akcelerometar, da se provere oscilacije rama, frekvencija i amplituda pri različitim režimima rada turbine.

Položaj rama se meri kontinualno preko dve čelične sajle koje se namotavaju na shaft-ekoder, tačnosti bolje od 0,025 %. Koriste se dva pretvarača, tako da se prati i eventualna nagnutost rama.



Slika 5. Skica korišćenog sistema za merenje rasporeda brzina

Položaj slobodne površine (nivo) vode se meri pomoću senzora apsolutnog pritiska, odvojeno sa leve i sa desne strane preseka, klase 0,2 %. Za svako merenje nivoa se koriste po dva senzora u paru: jedan za merenje pritiska u vodi na poznatoj dubini a drugi za merenje atmosferskog pritiska i kompenzaciju.

Stvarni oblik dna se proverava UZV sonarima pre sprovedenih merenja. Sonari mere razdaljine do 50 m pod vodom sa rezolucijom 0,5 %. Koriste se 4 sonara postavljena sa donje strane noseće grede (ne vide se na prikazanim slikama).

Sve EM sonde su povezane na ramu pomoću RS485 mreže podvodnim kablovima. Na površini terena se nalazi motolica na ručni pogon, sa klizajućim kontaktima. U istu mrežu su spojena i dva shaft-ekodera za položaj rama i dva sistema za merenje nivoa vode. Iako svi logeri imaju sopstvenu bateriju, izvedeno je i dodatno napajanje preko RS485 kabla, pomoću akumulatora. Komunikacija sa svim uređajima se ostvaruje koristeći MODBUS protokol. Svaka od sonde u svom internom logeru čuva širi set podataka sa vremenskom diskretizacijom od 1 sekunde, dok se preko RS485 veze svi podaci šalju nadzornom sistemu u realnom vremenu, sa diskretizacijom od 2 sekunde (osim ADV sonde, koje nisu povezane u sistem).

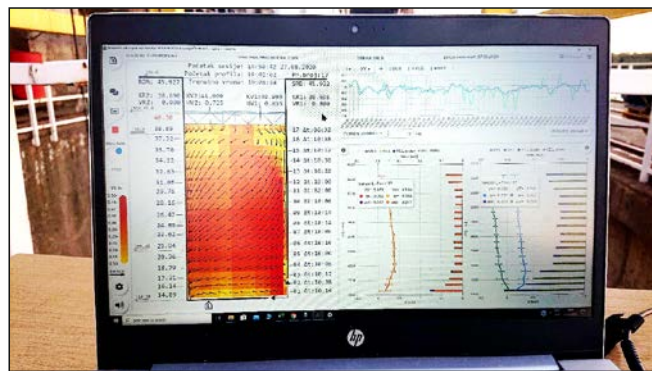
Usvojena metodologija snimanja profila brzina na ulazu u turbinu sa pokretnim ramom je kompromis između dva

suprostavljena zahteva. Sa stanovišta merne nesigurnosti, kao i neustaljenosti protoka, bolje bi bilo postaviti fiksni ram koji ceo ulazni profil istovremeno snima pomoću nekih 230 sonde. Pošto se koriste sonde koje mogu da mere sve tri komponente vektora brzine u jednoj tački, cena takvog sistema bi bila „prilično“ visoka. Takođe, takav sistem bi značajno povećao pad nivoa na mernoj rešetki, što bi na turbinama HE „Đerdapa 2“ bio relativno veliki pad s obzirom da je ukupni pad oko 7 m. Sa druge strane, pokretni ram je osetljiv na neustaljenost rada turbine, tako da korišćena metodologija zahteva da se sve merene veličine „normalizuju“ prema jednom referentnom protoku (ili snazi turbine).

Snimanje polja brzina može biti inkrementalno (sa „zastajkivanjem“ na određenom profilu, dok se ne skupi dovoljno podataka za osrednjavanje merenja) i kontinualno (ram kontinualno klizi od najniže do najviše kote, približno konstantnom brzinom). Metoda sa zastajkivanjem vrši bolje osrednjavanje ali je ukupno vreme trajanja merenja dugačko (oko 10 min u jednom profilu, mereno oko 17-18 profila) pa je velika šansa da će doći do nekog poremećaja u radu turbine i da će se drastično promeniti radni uslovi. Sa druge strane, metodom kontinualnog merenja se može obaviti profilisanje relativno brzo (prosečna brzina podizanja rama 0,045 m/s i visina 27 m), ali je velika standardna devijacija merenih brzina. Obe metode su proverene i postignuti rezultati su dati u nastavku.

III SOFTWARE ZA AKVIZICIJU I OBRADU PODATAKA

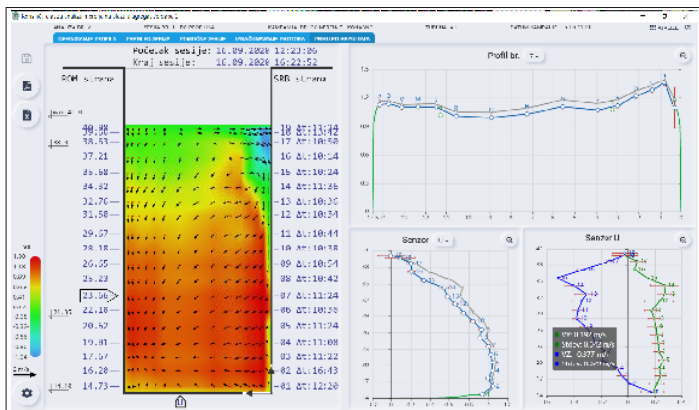
Softveri za akviziciju i obradu su pravljani za Windows PC računare i izvršavaju se na jednom prenosnom računaru.



Slika 6. Namenski software za monitoring akvizicije

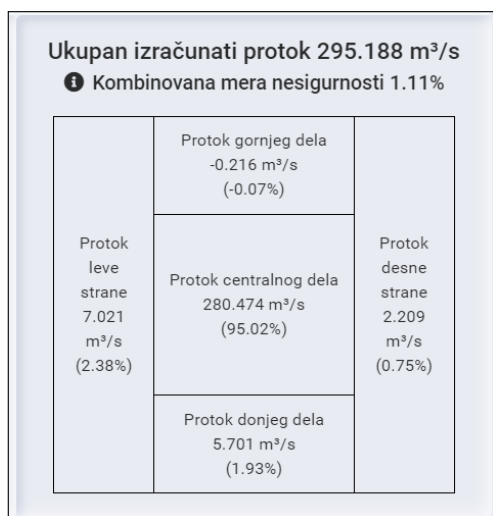
Softver za akviziciju se sastoji od dve komponente: programa „DC234Server“ (DC234 [9]) za upravljanje radom RS485 mreže i komunikaciju sa svim uređajima na toj mreži i programa „RealTimeHydroVisual“ (RTHV [11]) za praćenje, upravljanje, vizuelizaciju i prikupljanje podataka tokom merenja. DC234 je opšti komunikacioni program sa sofisticiranim upravljačkim interfejsom i nije predviđen za neiskusne korisnike. On se izvršava u pozadini i direktno komunicira sa glavnim upravljačkim programom RTHV, sa grafičkim interfejsom i funkcijama prilagođenim konkretnom poslu snimanja rasporeda brzina na ulazu u turbinu. Korisnik započinje novi posao (kampanju, merenje na određenoj turbini) i u okviru njega obavlja više različitih profilisanja (sesija, rad pri različitim uslovima). U svakoj sesiji može da odabere da li je u pitanju

kontinualno profilisanje ili inkrementalno, sa zastajkivanjem, kao i da unese druge bitne parametre. Tokom merenja, grafički se prikazuju svi očitani podaci (slika 6), stanje merne opreme, standardne devijacije brzina, crta se realni položaj rama i slično. Ukoliko zbog korišćenja Windows okruženja dođe do povremenog „zastoja“ u komunikaciji i „preskakanja“ nekog merenja, oni će biti naknadno učitanii direktno iz logera.



Slika 7. Software za obradu merenih rezultata i proračun protoka (prikazan ekran provere profila brzina po visini i širini)

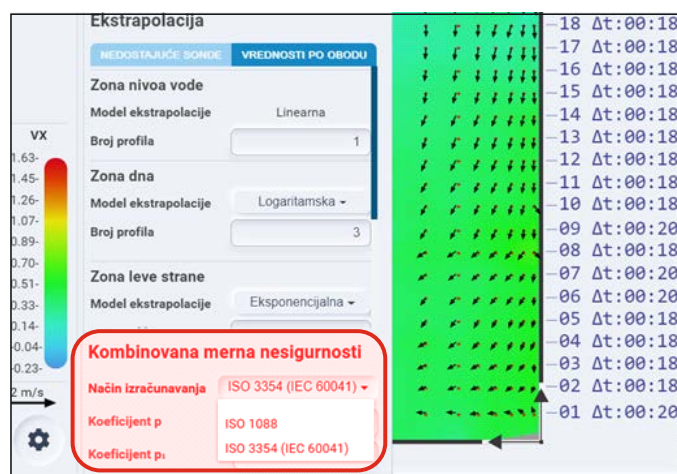
Softver za obradu podataka „AnalysisHydroVisual“ (AHV [11]) se pokreće u off-line-u. Softver AHV omogućava preuzimanje podataka očitanih na ADV sondama, sa SCADA-e turbine kao i direktno preuzimanje merenih podataka iz logera EM sonde ako je tokom merenja dolazilo do prekida u podacima. Obrada podataka podrazumeva detaljan pregled podataka sa SCADA-e i izbor referentnog perioda, normalizaciju svih merenih podataka, interpolaciju merenja u prostoru između EM sonde i ekstrapolaciju prema zidovima i površini vode, pregled svih komponenti brzina (slika 7) i upoređivanje EM i ADV podataka, korekcije merenih podužnih komponenti u zonama gde je došlo do blokade senzora i na kraju, proračun protoka (slika 8) sa svim informacijama o komponentama izračunatog protoka u centralnoj mernoj zoni (oko 95 % površine) i u ekstrapolovanim zonama kao i komponentama merne nesigurnosti.



Slika 8. Izračunat protok za obrađen profil brzina

IV ANALIZA NEODREĐENOSTI MERENJA

Sprovedena je detaljna analiza merne nesigurnosti svake od komponenti mernog sistema. Osnovne smernice za definisanje procedure za određivanje merne nesigurnosti su preuzete iz ISO standarda. Kao što je već navedeno, problematika merenja protoka ispred ulaza u turbinu ne spada u standardnu proceduru, a kao poseban kuriozitet je što merenja mogu da se posmatraju kao klasična merenja u rekama i kanalima (otvoreni tokovi) mada zbog specifičnosti vodozahvata mogu spadati i u sisteme pod pritiskom (tečenje u tunelima) jer se sav protok zahvata na velikoj dubini. Zbog toga su razvijene dve metodologije proračuna merne nesigurnosti, jedna se zasniva na postavkama standarda ISO 748 [12] i ISO 1088 [13] (standardi za merenje protoka u rekama pomoću hidrometrijskih krila), a druga metodologija je razvijena na osnovu ISO 3354 [14] (odnosno, IEC 60041 [3]) koji se koristi kod tokova pod pritiskom.



Slika 9. Izbor metodologije za proračun merne nesigurnosti

U osnovi obe metodologije je da ukupnu mernu nesigurnost izmerenog protoka čine tri komponente: sistematska nesigurnost, statistička nesigurnost i novo dodata nesigurnost izmerenog protoka usled varijabilnosti uslova na agregatu tokom merenja. Sistematsku nesigurnost definišu odstupanja determinističkog karaktera koja se mogu javiti u proceni protoka kao i osnovnih veličina preko koje se određuje protok, dubina, širina proticajnog preseka i brzina. Statističku nesigurnost definišu uticaji na merni rezultat koji su stohastičkog karaktera, koji se javljaju kao posledice promene mernih uslova kao i nesavršenosti merne opreme. Ovdje su se našle nesigurnosti usled konačnog broja mernih tačaka po vertikalima i horizontalima, nesigurnosti samih merila, nesigurnosti usled veličine napadnog ugla kao i usled turbulentnih pulzacija u toku. Konačno, budući da merenja, tokom jedne merne sesije, mogu trajati i po nekoliko sati, tokom kojih je teško održati protok konstantnim, uvedena je nesigurnost usled varijabilnosti uslova tokom trajanja merne sesije. U izradi metodologija korišćene su preporuke date u GUM [15]. Svi detalji su dati u izveštajima [5, 16] kao i u radu [17]. Na slici 9 je prikazan izbor metodologije za proračun merne nesigurnosti, koji korisnik ima u programu za obradu podataka: metodologija koja se oslanja na ISO 748 i ISO 1088 koji se standardno koriste za merenja u otvorenim tokovima pomoću hidrometrijskih krila, ili

metodologija koja je razvijena na osnovu ISO 3354 [15] (odnosno, IEC 60041) koji se koristi kod tokova pod pritiskom.

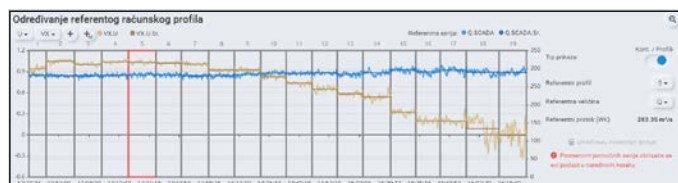
V REZULTATI MERENJA I DISKUSIJA

Merenja na ulazima u turbine je organizaciono i vremenski zahtevan posao, koji traži značajno angažovanje i Korisnika. Rad turbine na kojoj se meri treba da bude ustaljen u dužem vremenskom periodu. Ali, isto se odnosi i na rad dve susedne turbine jer one značajno utiču na strujnu sliku dostrujavanja pa samim time i na radni režim turbine na kojoj se meri. Što sve zahteva pomno praćenje hidrološke situacije (rast, stagnacija ili opadanje protoka Dunavom) i dobru koordinaciju sa glavnim EPS dispečerima.

Potrebno vreme osrednjavanja U inkrementalnom režimu profilisanja koji obezbeđuje veću tačnost, korisnik sam odlučuje koliko će dugo ram mirovati na određenoj koti. Softver RTHV pomaže korisniku time što u realnom vremenu prikazuje, pored trenutnih vrednosti svih komponenti brzina i njihove standardne devijacije. Kada se ram pozicionira na određeni profil, standardne devijacije postepeno opadaju kako raste vreme osrednjavanja.

Da bi se proverila kolika je neustaljenost strujanja prilikom konstantnog rada turbine, urađen je duži snimak rasporeda brzina u jednoj ravni (oko ose turbine), bez pomeranja rama i bez osrednjavanja. Na tako dobijenim rezultatima snimanja brzina u „stacionarnim“ uslovima vidi se da, pored „bržih“ oscilacija brzina („šum“ usled relativno brzih vrtloga vode), postoji i sporija komponenta varijacije od nekih 3 minuta. U razgovoru sa drugim istraživačima potvrđeno je da su uočene te spore varijacije protoka, koje najverovatnije potiču od automatike turbine. Naime, turbina je podešena za rad sa konstantnom snagom i povremeno se sprovodni aparat turbine podešava prema ostalim uslovima. Na osnovu učinjenih provera kao i na osnovu iskustva sa obavljenih merenja, zaključeno je da je optimalno vreme osrednjavanja na jednom profilu 10 minuta.

Neustaljenost rada tokom profilisanja Inkrementalno profilisanje znači da će jedna merna sesija trajati par sati. U tom periodu će turbina automatski održavati snagu, ali će, ukoliko se promene radni uslovi usled rada okolnih agregata ili dotoka Dunavom, dolaziti do varijacija u protoku. Prema usvojenoj metodologiji, te varijacije će biti kompenzovane prema jednom, izabranom referentnom protoku.



Slika 10. Neustaljenost protoka tokom snimanja profila brzina (plava linija) i odabir referentnog protoka

Na slici 10 je prikazan redovan režim merenja gde nije bilo velikih varijacija u dotoku na turbinu (mereno sa WK davačem, plava linija, protok u m^3/s prikazan na desnoj osi dijagrama). U prvoj polovini merenja je dotok bio oko $280 \text{ m}^3/\text{s}$ da bi se u drugom delu merenja popeo na $290 \text{ m}^3/\text{s}$. Na istom dijagramu je

oker bojom nacrtana i podužna komponenta brzine za EM sondu na vertikali U (vertikala je označena na slici 7), trenutne vrednosti i osrednjene po profilu. Kako merenja kreću od dna profila pa idu na gore, vidi se da brzine postižu maksimum na mestu gde se nalazi turbina (profili 2-7) da bi u zoni u blizini površine vode došlo i do negativnih brzina usled velikih vrtloga.

Korisnik je u obradi rezultata odabrao profil 5 kao referentni (označen crvenim pravougaonikom na slici 10) sa protokom od $283,35 \text{ m}^3/\text{s}$ u odnosu na koji se sve merene brzine normalizuju. To podrazumeva da se za sve ostale profile računa koeficijent neustaljenosti kao odnos referentnog i protoka na WK za taj profil, a onda se merenja brzina na EM sondama u svakom od profila dele sa tako dobijenim koeficijentima, prema [3] i [15]. Ovakvo „linearno“ normalizovanje je primenljivo samo za relativno male promene tokom rada. Moguće je da tokom profilisanja dođe do značajne promene režima rada turbine najčešće zbog potreba dispečera koji promeni režim rada turbine. S obzirom da se koristi WK merač koji je u osnovi nelinearan i, verovatno pogrešno podešen, ovakve veće promene nije moguće kompenzovati i potrebno je odbaciti takva merenja.

Primer regularnog merenja Primenom inkrementalnog profilisanja, sa osrednjavanjem od 10-tak minuta po profilu i sa 18 do 19 snimljenih profila po visini, obavljena su merenja protoka na agregatu A7 (27. i 28.08.2020.) pri tri protoka, Q_{max} , Q_{sr} i Q_{min} . Tokom snimanja, susedne turbine A6 i A8 su radile sa istim snagama kao i turbina A7, obezbeđujući što simetričniju strujnu sliku na dotoku. U tabeli 1 su dati postignuti rezultati proračuna protoka preko integracije merenog rasporeda brzina i protoka očitano na SCADA-i merenog na WK-u. U poslednjoj koloni je data relativna greška WK merača.

Na slici 11 je dat prikaz rasporeda brzina na ulazu u agregat A7, za slučaj maksimalnog protoka. Podužna komponenta brzine U_x je predstavljena bojama, sa skalom koja je data uz levu ivicu slike. Komponente U_y (poprečna komponenta) i U_z (vertikalna komponenta) su prikazane kao vektori na mestima gde su se fizički nalazile EM sonde tokom merenja (data je skala za dužinu vektora od 1 m/s). Isprekidanom linijom je prikazan i položaj ulaza u cevnu turbinu, odnosno, realni nizvodni proticajni profil.

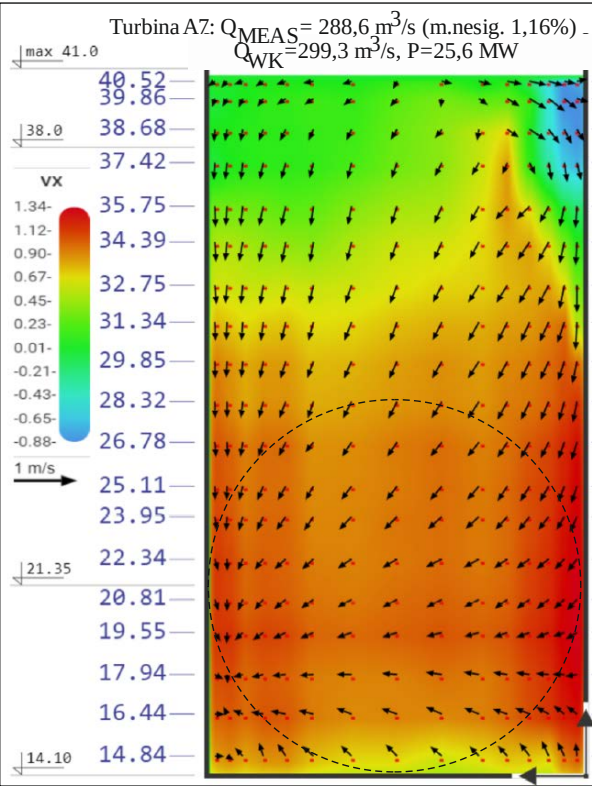
Na prikazanom profilu brzina se jasno uočava postojanje značajne poprečne komponente brzine od desnog ka levom zidu u zoni glavnog proticajnog profila. Takođe, u gornjoj zoni se vidi postojanje vrtloga, koji prouzrokuje i negativne podužne brzine kao i poprečnu brzinu vode ka desnom zidu. Očekivano, u gornjoj zoni su vertikalne brzine usmerene na dole.

Prikazan raspored brzina na A7 je jedan od „boljih“ rezultata. Raspored brzina, uglavnom poprečne komponente U_y dosta zavisi od položaja turbine na brani, pa agregati bliže sredini brane, A1, A2... imaju značajnije poprečne komponente od udaljenijih A7 i A8. To je i bilo pokazano na modelskim ispitivanjima [1], gde je bilo jasno da agregati bliže Rumunskoj strani kao i Rumunski agregati rade u boljim uslovima, a to je sada potvrđeno i ovim merenjima.

Interesantni su i rezultati ispitivanja uticaja rada susednih agregata na strujno polje radnog agregata. Merenja su pokazala da je taj uticaj značajan, te da je bolje da više agregata radi sa sličnom snagom nego da jedan radi a drugi da ne radi.

Tabela 1. Rezultati merenja rasporeda brzina i obračuna protoka na turbini A7

Datum	EM sonde		SCADA		Merna nesigurnost				Relativna greška WK (Qwk-Q)/Q * 100
	Vreme profilisanja (od-do)	Obračunat protok Q	Referentni profil i vreme (od-do)	Protok Qwk	Sistematska nesigurnost	Nesigurnost usled varijabilnosti protoka	Slučajna (statistička) nesigurnost	Kombinovana nesigurnost	
	hh:mm	m ³ /s	-	m ³ /s	%	%	%	%	%
27.08.2020.	09:43–13:23	288,6	Prof. 7 10:54-11:05	299,3	0,13	0,71	0,91	1,16	3,7
28.08.2020.	11:37–15:11	202,5	Prof. 7 12:46-12:57	220,8	0,13	0,35	0,95	1,02	9,0
27.08.2020.	14:50-19:34	108,1	Prof. 6 15:48-15:58	122,4	0,13	0,42	1,47	1,53	13,2

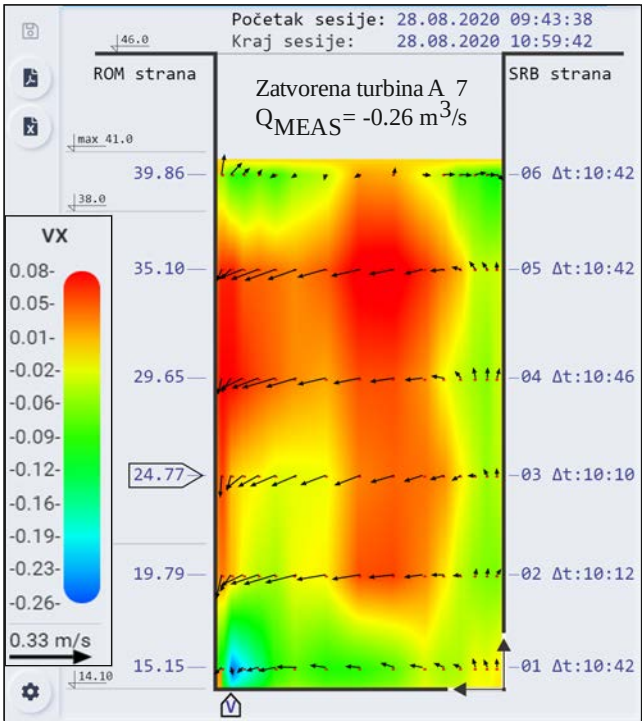


Slika 11. Rezultati snimanja polja brzina na agregatu A7

Inkrementalno ili kontinualno merenje Tokom niza merenja na agregatima (ovde je prikazan samo agregat A7) više puta je poređeno inkrementalno i kontinualno merenje. Osnovna prednost kontinualnog merenja je što se ceo proticajni profil snimi za petnaestak minuta, dok je za inkrementalno snimanje potrebno par sati (tokom kojih agregat mora da radi sa stabilnim protokom). Međutim, najmanja brzina podizanja rama koju kran može da postigne je 0,05 m/s (uz veliko grejanje motora), što ne dozvoljava kvalitetno merenje brzine i osrednjavanje, pa su merne nesigurnosti u takvom režimu do 5 %! Zbog toga se u finalnim rezultatima koriste samo rezultati dobijeni inkrementalnim profilisanjem.

Test nultog protoka Dobar test rada merne opreme je snimanje rasporeda brzina na ulazu u turbinu pri nultom protoku. Zbog rada okolnih agregata, postoji jaka vrtložna komponenta ispred

ulaza u turbinu, sa značajnim negativnim podužnom komponentom U_x . Ta komponenta je „zadužena“ i za pomeranje naslaga trave: evidentno je nakon zaustavljanja turbine kako okolne turbine polako „izvlače“ travu iz profila!

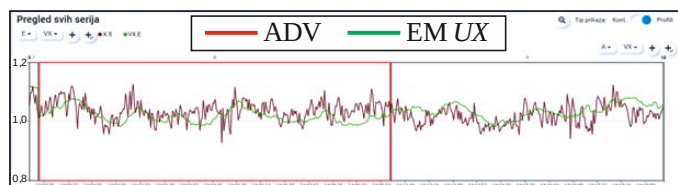


Slika 12. Rezultati snimanja nultog polja brzina na agregatu A7

Na slici 12 je dat rezultat snimanja polja brzina na agregatu A7 pri zatvorenom sprovednom aparatu turbine. Izmerene brzine su u opsegu od par cm/s dok je obračunati protok $-0,26 \text{ m}^3/\text{s}$. Na žalost, korišćeno je samo 6 mernih profila tako da je jako grubo snimljen raspored brzina, pa je i procenjena kombinovana merna nesigurnost jako velika. I pored toga, na slici se lepo vidi vrtlog koji cirkuliše unutar preseka, praveći pozitivne i negativne brzine. Iz rasporeda brzina i dobijenih rezultata se vidi da sonde dobro mere i brzine daleko ispod $0,05 \text{ m/s}$ u oba smera. Obračunati protok od $-0,26 \text{ m}^3/\text{s}$ najverovatnije nije pokazatelj da voda zaista „ističe“ iz agregata i ide nazad prema Dunavu, već je to greška merenja, koja je ispod $0,1\%$ punog opsega merne opreme od $300 \text{ m}^3/\text{s}$!

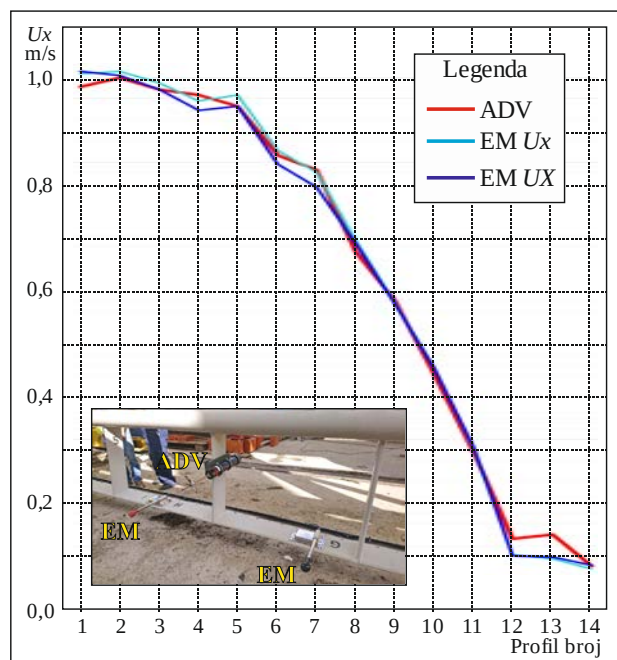
Poređenje ADV i EM sonde Osnovu mernog sistema čini 15 komada EM sonde. Sonde su posebno dizajnirane i napravljene [9] za posao merenja na HE „Đerdap 2“, tako da je postojala opravdana sumnja u kvalitet opreme i dobijene rezultate merenja. Da bi se potvrdilo funkcionisanje EM sonde predviđena je bila i montaža dve ADV sonde, od renomiranog proizvođača [10].

Tokom pripreme merne opreme i kalibracije sonde na mernom kanalu u Institutu „Jaroslav Černi“, vršen je niz provera i uporednih merenja. Sva ispitivanja na kanalu su bila rađena sa nosačem koji je geometrijski istovetan sa mernim ramom, da bi se otklonio uticaj geometrije rama na strujnu sliku vode. Kao potvrda dobrog rada EM sonde, urađena su i poređenja pokazivanja sonde u realnim radnim uslovima.



Slika 13. Fluktuacije brzina na ADV i EM sondi (bez prostorne korekcije)

Na slici 13 je dato direktno poređenje sirovih brzina sa jedne EM sonde i najbliže ADV sonde. ADV sonda meri „brže“ i vidi sitnije vrtloge. Sa dijagrama se vidi da su razlike u trenutnim brzinama reda veličine par cm/s, što je za merni opseg EM sonde oko 1 %. Zbog načina montaže, te dve sonde ne mere brzine u istoj tački, već u dve razmaknute tačke i po visini i po širini, tako da nije ni moguće očekivati bolje slaganje izmerenih brzina.



Slika 14. Rezultati poređenja osrednjenih i korigovanih brzina na ADV i EM sondama

Kada se obavi detaljnija analiza merenih rezultata, uz korekcije očitavanja (prostornu interpolaciju) usled različitih lokacija sonde, dobijen je rezultat prikazan na slici 14. Poređene su obe

komponente podužne brzine koju snima EM interpolovane na lokaciju ADV sonde.

VIII ZAKLJUČAK

Zbog dispozicije elektrane HE „Đerdap 2“ i hidrauličkih uslova, postojeći posredni sistemi za određivanje protoka pomoću Winter-Kennedy metode i preko karakteristika turbine, koji su inicijalno podešeni u odnosu na sprovedena modelska ispitivanja, nisu bili do sada proveravani direktnim merenjima protoka. Razlog za to je što postojeći standardi ne definišu pravila za merenja u uslovima kada postoji izrazita neravnomernost komponente brzine. S obzirom na to da je u planu skora revitalizacija cevnih agregata uz podizanje hidrauličke efikasnosti, bilo je neophodno kvantifikovati postojeće karakteristike turbina, a pre svega omogućiti pouzdano određivanje protoka u realnim radnim uslovima.

U radu je prikazana razvijena metodologija koja omogućava merenje protoka na bilo kom agregatu HE „Đerdap 2“ bez njegovog zaustavljanja i posebnih pripremnih radnji. Prikazana je merna oprema, prateći sistemi i softver za merenja i obradu, koji su uspešno primenjeni na šest turbina HE „Đerdap 2“. Na osnovu dobijenih rezultata, uz dodatno aktivno uključivanje i kolega koji bi obavili indeksna ispitivanja uz prethodno sređivanje i tariranje merne opreme u elektrani, moguće je izvršiti kvalitetnije podešavanje ugrađenih Winter-Kennedy merača protoka.

Pored podatka o protoku, tokom obavljenih merenja na dva agregata se pokazalo da je jako koristan i podatak o izmerenim nivoima ispred rešetke. Sa stanovišta sistema koji upravlja radom agregatom, to je redundantan podatak ali se pokazalo da je zgodan za proveru merenja nivoa i padova na turbinama koje koristi postojeća SCADA.

Tokom primene razvijene metodologije snimanja profila brzina, uočeni su i problemi vezani za plivajuću travu: turbine tokom rada privlače dosta plutajuće trave koja „dolazi“ plutajući u paketima. Pokazalo se da trava ne smeta tokom merenja pod vodom („ne kači“ se na EM ni ADV sonde) a najugroženije su sonde u gornjim profilima, kada ram svojim dizanjem „pokupi“ travu i iznese je iz profila. Da bi se smanjio uticaja trave potrebno je grajferom pre merenja obaviti detaljno čišćenje rešetke. Redovna procedura podrazumeva samo skidanje i odnošenje krupnijih balvana i grana, dok se trava rastrese i vrati ponovo u vodu! Potrebno je grajferom čišćenje obaviti pri maloj snazi agregata, dok je trava „zalepljena“ za rešetke i tu travu izneti iz profila. Takođe, uočeno je da rad susednih agregata utiče na kretanje trave u dovodu na agregat gde se meri: ako susedni agregati promene režim rada, „njihova“ trava će preći u profil koji se meri (ako se smanji protok na susednim agregatima) ili će povući travu iz merenog agregata (ako se poveća protok).

ZAHVALNICA/ACKNOWLEDGEMENT

Rad je rezultat posla koji je Institut „Jaroslav Černi“ zaključio sa investitorom JP „Elektroprivreda Srbije“, Ogranak HE Đerdap, 2019. i 2022. godine, a u okviru kojeg je Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu imao priliku da razvije prikazanu metodologiju i koncipira softvere za akviziciju i obradu podataka. U ovom radu se prikazuje samo metodologija merenja, dok se za sve konkretne podatke i rezultate merenja čitao

upućuju na investitora. Autori rada se posebno zahvaljuju kolegama sa HE „Đerdap 2“ koji su aktivno učestvovali u pripremi merenja, obuci i organizaciji merenja tokom 2020. i 2023. godine.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“. Hidraulički model HE „Đerdap 2“ – Izveštaj ispitivanja na hidrauličkom modelu uslova dostrujavanja na turbine, Beograd, 2006.
- [2] Prodanović D., Pavlović D., Branislavljević N. Merenje protoka na kratkim objektima u hidraulički neregularnim uslovima na primeru HE „Đerdap 2“, Vodoprivreda, Vol. 43, No. 252-254, pp. 103-115, 2011.
- [3] IEC 60041. International standard: field acceptance tests to determine the hydraulic performance of hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines. European Equivalent: EN 60041, 1999.
- [4] Performance Test Code. Code 18: Hydraulic Turbines and Pump-Turbines, American Society of Mechanical Engineers, New York, USA, 2002.
- [5] Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Svet Instrumenata. Izveštaj o sistemu za merenje protoka na prilazima HE „Đerdap 2“, Beograd, 2020.
- [6] Ivetić D., Prodanović D., Vojt, P. Novel discharge measurement system at the turbine intakes of Iron Gate 2 hydropower plant: a system description, 8th International Conference Contemporary Achievements in Civil Engineering, Subotica, Srbija, April, 2021.
- [7] Prodanović D., Ivetić D., Milivojević N., Vojt P., Cvitkovic M. Sistem za merenje protoka na ulazima u cevne turbine na bazi elektromagnetnih senzora brzine. Tehničko rešenje priznato od strane Ministratsva nauke, 2022. <https://grafar.grf.bg.ac.rs/handle/123456789/3319> [pristupljeno 07.03.2024]
- [8] Ivetić D., Prodanović D., Milivojević N., Vojt, P. Uncertainty assessment of flow measurements at Iron Gate 2. 13th International conference on hydraulic efficiency measurement IGHEM, Grenoble, 2022.
- [9] Svet Instrumenata, <http://www.si.co.rs/> [pristupljeno 07.03.2024]
- [10] NORTEK, <https://www.nortekgroup.com/products/vector-300-m> [pristupljeno 07.03.2024]
- [11] Vodena, <https://vodena.rs/> [pristupljeno 07.03.2024]
- [12] ISO 748, Velocity area methods, International Standards Organization, Geneva, 2007.
- [13] ISO 1088, Collection of data for determination of errors in measurement by velocity area methods, International Standards Organization, Geneva, 2007.
- [14] ISO 3354, Measurement of clean water flow in closed conduits, Velocity-area method using current-meters in full conduits and under regular flow conditions, International Standards Organization, Geneva, 2008
- [15] Joint committee for Guides in Metrology, Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM), International Organization for Standardization, 2008.
- [16] Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Svet Instrumenata. Merenje protoka na agregatima HE „Đerdap 2“, Izveštaj, Beograd, 2023.
- [17] Ivetić D., Prodanović D., Vojt P. Određivanje protoka na prilazima cevni turbina uz pomoć EM senzora brzine: Određivanje nesigurnosti izmerenog protoka. SDHi i SDH, Beograd, 2021.

AUTORI/AUTHORS

Dušan Prodanović – prof. dr, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, dprodanovic@grf.bg.ac.rs, ORCID [0000-0003-0156-7271](https://orcid.org/0000-0003-0156-7271)
Damjan Ivetić – doc. dr, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, divetic@grf.bg.ac.rs, ORCID [0000-0001-7475-6108](https://orcid.org/0000-0001-7475-6108)
Predrag Vojt – samostalni istraživač, Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“ a.d., Beograd, predrag.vojt@jcerni.rs, ORCID [0009-0003-9975-3896](https://orcid.org/0009-0003-9975-3896)
Milan Ćusić – vodeći istraživač, Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“ a.d., Beograd, milan.cusic@jcerni.rs, ORCID [0009-0008-6582-5421](https://orcid.org/0009-0008-6582-5421)

Preparing for Revitalization of the Turbines of the Đerdap 2 HPP: Measurement of Velocity Distribution at Turbine Inlets

Abstract – The continuous flow measurement on hydroelectric turbine units is conventionally carried out using the relative methods (mostly Winter-Kennedy), where the complex velocity field in flow cross section is replaced by a single measured quantity. On a physical model, mapping parameters are determined. The Winter-Kennedy method is most used, where this relative (index) flow quantity is obtained by measuring differential pressure. The measurement uncertainty of the determined flow using this method is usually significantly higher than the uncertainty of other relevant quantities for determining the optimal turbine operating conditions. To reduce the flow uncertainty, it is necessary to perform "absolute measurements" of the entire velocity field and determine the necessary corrections to the index method under real operating conditions. This is especially true for plants where disposition is different from one used on physical model, which is the case of "Đerdap 2" and recognized problem of skewed inflow. With the aim of better assessing the hydraulic efficiency of turbines and to collect data on the actual operating velocity distribution in the inlet section in front of trash-rack needed for planned revitalization works, an innovative system for absolute flow measurement has been designed and implemented. The moving frame was designed and installed at the turbine inlet, upstream from the trash-rack. The 15 electromagnetic (EM) sensors and two redundant acoustic Doppler sensors were installed on horizontal bar. Each sensor measures all three velocity components. The frame moves by lifting along the entire height of the flow section, allowing the entire velocity field to be scanned. The position of the frame is tracked by two encoders, while two pressure sensors are used to measure the water depth. Measurements are synchronized with the local SCADA system, so appropriate turbine operation data are also used. Considering the specificities of the measurement system itself with newly developed EM sensors, as well as hydraulic conditions, an adequate procedure has been developed to assess the uncertainty of the measured flow. This paper presents the measurement method and provides some measurement results on the units of the "Đerdap 2" hydroelectric power plant.

Index Terms – Velocity measurement, Measuring uncertainty, Electromagnetic sensors, Hydro power units, Bulb turbines