

NASTAVNO NAUČNOM VEĆU
GRAĐEVINSKOG FAKULTETA
UNIVERZITETA U BEOGRADU

Predmet: Pokretanje postupka za verifikaciju tehničkog rešenja

Prema Pravilniku o sticanju istraživačkih i naučnih zvanja (Sl. Glasnik RS, br. 159/2020) i Priloga 2: Kriterijumi za određivanje kategorije naučnih publikacija, obraćamo se Nastavno-naučnom veću Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu sa molbom da pokrene postupak za verifikaciju tehničkog rešenja kategorije M82 pod nazivom:

Sistem za merenje protoka na ulazima u cevne turbine na bazi elektromagnetnih senzora brzine

M82 – novo tehničko rešenje (metoda) primenjeno na nacionalnom nivou

Autori rešenja:

prof. dr Dušan Prodanović, dipl. građ. inž., Univerzitet u Beogradu - Građevinski fakultet

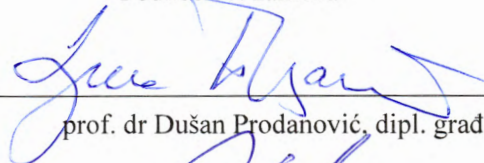
doc. dr Damjan Ivetić, mast. građ. inž., Univerzitet u Beogradu - Građevinski fakultet

dr Nikola Milivojević, dipl. maš. inž., Institut za vodoprivredu Jaroslav Černi

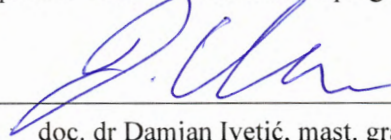
Predrag Vojt, dipl. građ. inž., Institut za vodoprivredu Jaroslav Černi

Mile Cvitkovic, dipl. el. inž., Svet Instrumentata

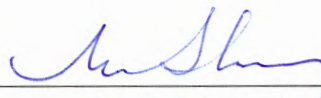
Podnosioci zahteva



prof. dr Dušan Prodanović, dipl. građ. inž.



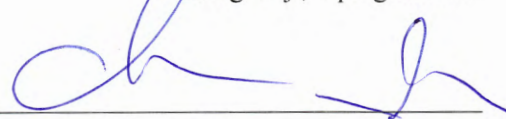
doc. dr Damjan Ivetić, mast. građ. inž.



dr Nikola Milivojević, dipl. maš. inž.



Predrag Vojt, dipl. građ. inž.



Mile Cvitkovic, dipl. el. inž.

TEHNIČKO REŠENJE

M82 – Novo tehničko rešenje (metoda) primenjeno na nacionalnom nivou

Sistem za merenje protoka na ulazima u cevne turbine na bazi elektromagnetnih senzora brzine

Autori rešenja:

prof. dr Dušan Prodanović, dipl. građ. inž., Univerzitet u Beogradu - Građevinski fakultet, Bulevar Kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd

doc. dr Damjan Ivetić, mast. građ. inž., Univerzitet u Beogradu - Građevinski fakultet, Bulevar Kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd

dr Nikola Milivojević, dipl. maš. inž., Institut za vodoprivredu Jaroslav Černi, Jaroslava Černog 80, 11226 Pinosava, Beograd

Predrag Vojt, dipl. građ. inž., Univerzitet u Beogradu - Građevinski fakultet, Institut za vodoprivredu Jaroslav Černi, Jaroslava Černog 80, 11226 Pinosava, Beograd

Mile Cvitkovic, dipl. el. inž., Svet instrumenata d.o.o., Krajinska 1, 11351 Vinča, Beograd

Beograd, oktobar 2021.

Sadržaj

1. Opšti podaci.....	4
1.1. Autori tehničkog rešenja	4
1.2. Naziv tehničkog rešenja	4
1.3. Kategorija tehničkog rešenja.....	4
1.4. Ključne reči	4
1.5. Za koga je rešenje rađeno.....	4
1.6. Godina kada je rešenje kompletirano	4
1.7. Godina kada je rešenje počelo da se primenjuje	4
1.8. Oblast i naučna disciplina na koju se tehničko rešenje odnosi	4
2. Problem koji se tehničkim rešenjem rešava	5
3. Stanje rešenosti tog problema u svetu	5
4. Opis tehničkog rešenja.....	6
4.1. Proračun protoka na osnovu realnog polja brzina.....	6
4.2. Merenje prostornog polja brzina	9
4.3. Analiza neodređenosti merenja i proračuna protoka.....	10
4.4. Merni sistem.....	10
4.5. Softver za akviziciju i obradu.....	13
4.6. Rezultati i validacija tehničkog rešenja.....	15
4.6.1. Inkrementalno profilisanje	15
4.6.1.1. Potrebno vreme merenja na jednom profilu.....	15
4.6.1.2. Neustaljenost protoka tokom profilisanja	15
4.6.1.3. Merenja na turbinama A1 i A7.....	16
4.6.1.4. Nulti protok	17
4.6.1.5. Poređenje EM i ADV sondi	17
4.6.2. Kontinualno profilisanje.....	18
5. Zaključak	19
6. Literatura	19
7. Prilog	20

1. Opšti podaci

1.1. Autori tehničkog rešenja

prof. dr Dušan Prodanović, dipl. građ. inž., Univerzitet u Beogradu - Građevinski fakultet, Bulevar Kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd

doc. dr Damjan Ivetić, mast. građ. inž., Univerzitet u Beogradu - Građevinski fakultet, Bulevar Kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd

dr Nikola Milivojević, dipl. maš. inž., Institut za vodoprivredu Jaroslav Černi, Jaroslava Černog 80, 11226 Pinosava, Beograd

Predrag Vojt, dipl. građ. inž., Univerzitet u Beogradu - Građevinski fakultet, Institut za vodoprivredu Jaroslav Černi, Jaroslava Černog 80, 11226 Pinosava, Beograd

Mile Cvitkovac, dipl. el. inž., Svet instrumenata d.o.o., Krajinska 1, 11351 Vinča, Beograd

1.2. Naziv tehničkog rešenja

Sistem za merenje protoka na ulazima u cevne turbine na bazi elektromagnetnih senzora brzine

1.3. Kategorija tehničkog rešenja

Novo tehničko rešenje (metoda) primenjeno na nacionalnom nivou

1.4. Ključne reči

Merenje protoka, hidroelektrane, cevne turbine, elektromagnetni senzori

1.5. Za koga je rešenje rađeno

Tehničko rešenje je rađeno u sklopu projekta "Oprema za merenje protoka na brani HE Đerdap 2", zavodni broj kod naručioca posla JP Elektroprivreda Srbije Beograd je 01.01.-10816/18-2019 од 29.07.2019. godine, koji je Institut „Jaroslav Černi“ ugovorio sa EPS, zavodni broj Instituta je 31/19/73/02 od 26.07.2019.

1.6. Godina kada je rešenje kompletirano

2020. godina.

1.7. Godina kada je rešenje počelo da se primenjuje

2020. godina.

1.8. Oblast i naučna disciplina na koju se tehničko rešenje odnosi

Oblast: Tehničko-tehnološka; Disciplina: Uređenje, zaštita i korišćenje voda, zemljišta i vazduha

1.9. List ranije prihvaćenih tehničkih rešenja

Za autora prof. dr Dušana Prodanovića:

- **Prodanović D.**, M. Stanić i N. Branisavljević: GIS bazirani distribuirani hidrološki model sa kombinacijom prirodnih i veštačkih tokova (sliv Vlasine). Investitor: Institut Jaroslav Černi, 2007. (M85)
- Jovanović M., R. Kapor, D. Đorđević i **D. Prodanović**: Hidraulička studija funkcionisanja vodozahvata Makiš. Investitor: Gradska uprava za vode, 2007. (M84)

- **Prodanović D.** i M. Stanić: Primena GIS-a u pripremi podataka za fizički baziran hidrološki model (sliv Vrbasa). Investitor: Institut Jaroslav Černi, 2008. (M85)
- **Prodanović D., D. Pavlović, P. Vojt:** Pregled merila protoka, analiza rezultata merenja protoka i bilansiranja količina vode na sistemima Makiš i Bele Vode. Investitor: Beogradski vodovod i kanalizacija, 2010. (M86)

Za autora dr Nikolu Milivojevića:

- Stojković M., S. Kostić, **N. Milivojević, B. Pokorni:** Metoda za modeliranje trenda godišnjih protoka uključivanjem višegodišnje periodičnosti. Investitor JP Elektroprivreda Srbije, 2021. (M82)

Za autora Predraga Vojta:

- Prodanović D., D. Pavlović, **P. Vojt:** Pregled merila protoka, analiza rezultata merenja protoka i bilansiranja količina vode na sistemima Makiš i Bele Vode. Investitor: Beogradski vodovod i kanalizacija, 2010. (M86)

2. Problem koji se tehničkim rešenjem rešava

Procena hidrauličke efikasnosti agregata, se zasniva na pouzdanom merenju više hidrauličkih, mašinskih i elektro veličina. Merenje protoka je tehnički najzahtevniji zadatak, budući da je merna nesigurnost obično veća nego kod ostalih veličina, a i sam proces merenja je složen (Adamkowski i sar., 2019). Težište problema koji se rešava ovim tehničkim rešenjem je na merenju protoka kod tzv. cevni turbina (agregata), odnosno Kaplanovih turbina za male padove. Međutim metodologija je primenjiva i za druge tipove turbina kod kojih je moguće obezbediti prostor za montažu opreme. Uprkos činjenici, da se cevni agregati sa kratkim i konvergirajućim deonicama, relativno rasprostranjeni, ne postoji jasan standard koji definiše uslove za formiranje mernog sistema za merenje protoka. Prema postojećim standardima, u ovim situacijama jedino se može primeniti metoda koja se zasniva na merenju brzina u velikom broju tačaka, primenom hidrometrijskih krila. Međutim, strogi uslovi primene ovakvog pristupa bi zahtevali ne-racionalnu investiciju, čineći ovu mogućnost nepraktičnom. Pored toga, specifično za HE Đerdap 2, gde je primenjeno tehničko rešenje, je da se javlja fenomen dostrujavanja vode pod značajnim uglom u horizontalnoj ravni (Prodanović i sar., 2011), čime se mogućnost primene hidrometrijskih krila poništava, zbog loše osetljivosti na ovaj tip dostrujavanja.

Predloženo tehničko rešenje podrazumeva primenu novih elektromagnetnih sondi, praktično elektromagnetnih krila, koja mogu da mere sve tri komponente vektora brzine i to u dispoziciji prema kojoj su sonde postavljene u nizu na čeličnom ramu, koji se pruža celom širinom prilazne deonice. Čelični ram, sa mernom opremom, se kranskom dizalicom podiže od najniže kote preseka, kako bi se mapiralo polje brzina u realnom vremenu. Koristeći dodatnu opremu za snimanje dna i merenje dubina, definiše se površina proticajnog preseka koja kada se pomnoži sa srednjom profilskom brzinom daje protok.

3. Stanje rešenosti tog problema u svetu

Kontinualni monitoring ili merenje protoka na cevni agregatima sa kratkom prilaznom deonicom, se zbog navedenih ograničenja uglavnom obavlja posredno. Naime, primenjuje se tzv. indeksna metoda „Winter-Kennedy“ po kojoj se na osnovu modelskih ispitivanja definiše

zakonitost između razlike pritiska u dve tačke sprovodnog aparata i protoka kroz agregat. Kako se uslovi dostrujavanja u prirodi u određenim slučajevima, kao kod HE Đerdap 2, razlikuju od uslova na modelskim ispitivanjima, neophodno je upotrebiti redundantnu kontrolnu metodu za validaciju i korigovanje koeficijenta indeksne metode.

Redundantna, kontrolna merenja protoka bi trebala da se obave nekom od direktnih metoda. Postojeći standardi (IEC 60041, 1999; PTC 18, 2002) identifikuju jedino upotrebu hidrometrijskih krila u dispoziciji sa velikim brojem krila postavljenih na merni nosač (ili merni krst). Takva merenja su rađena, na primer, na HE Zvornik, na dovodu do Kaplanove turbine. Merenja je obavila 2016. godine strana firma a radni uslovi su dozvoljavali primenu hidrometrijskih krila. Na žalost, takvo rešenje je neprihvatljivo na HE Đerdap 2, zbog radnih uslova (previše kratka dovodna deonica) ali i zbog postojanja značajnog ugla dostrujavanja koji zavisi od turbine do turbine kao i od režima rada. Kako uglovi dostrujavanja prevazilaze maksimalni radni ugao postojećih hidrometrijskih krila, bilo je neophodno razviti novo tehničko rešenje kojim će moći da se izmeri protok na HE Đerdap 2.

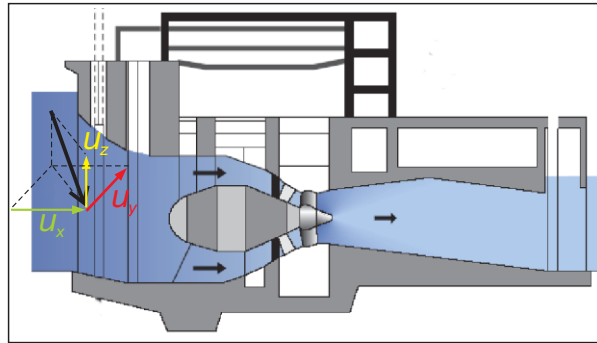
Američko društvo mašinskih inženjera (eng. American Society of Mechanical Engineers - ASME) je sprovedo analizu mogućih alternativnih rešenja (Almquist i sar., 2011) u sličnim situacijama, gde su poređeni pristupi sa hidrometrijskim krilima, akustičnim "transit-time" sensorima i akustičnim korelacionim sensorima. Najbolje slaganje sa referentnim merenjima protoka (dobijenih hidrometrijskim krilima) su dobijeni primenom akustičnih "transit-time" senzora. Ograničenje sa primenom ovog rešenja se ogleda u činjenici da se zahteva montaža u suvom, kao i u tome što je neophodno proticajni presek pokriti sa velikim brojem parova primopredajnika. U slučaju HE Đerdap 2, suhu montažu nije moguće ostvariti zbog dispozicije sistema, dok bi zbog velikih dimenzija proticajnog preseka bilo potrebno postaviti veliki broj primopredajnika čime bi se dobilo previše skupo rešenje. Akustični korelacioni senzori kao drugo najbolje rešenje, po navedenim ispitivanjima, mogu da registruju samo dve komponente vektora brzine. U slučaju kratkih, konvergetnih prilaznih deonica sa kosim dostrujavanjem, javljaju se izražene sve tri komponente vektora brzine, zbog čega bi ovo rešenje bilo prihvatljivo u slučaju HE Đerdap 2.

Iz iznete analize, vidi se da problematika merenja protoka na cevima turbinama sa malim padom, gde ne postoji dovoljno dugačka prava deonica na kojoj se mogu obezbediti uslovi za primenu standardnih rešenja, nije adekvatno rešena. Zbog toga je bilo neophodno razviti novu metodu merenja protoka i procenu merne neodređenosti, primenjivu na HE Đerdap 2.

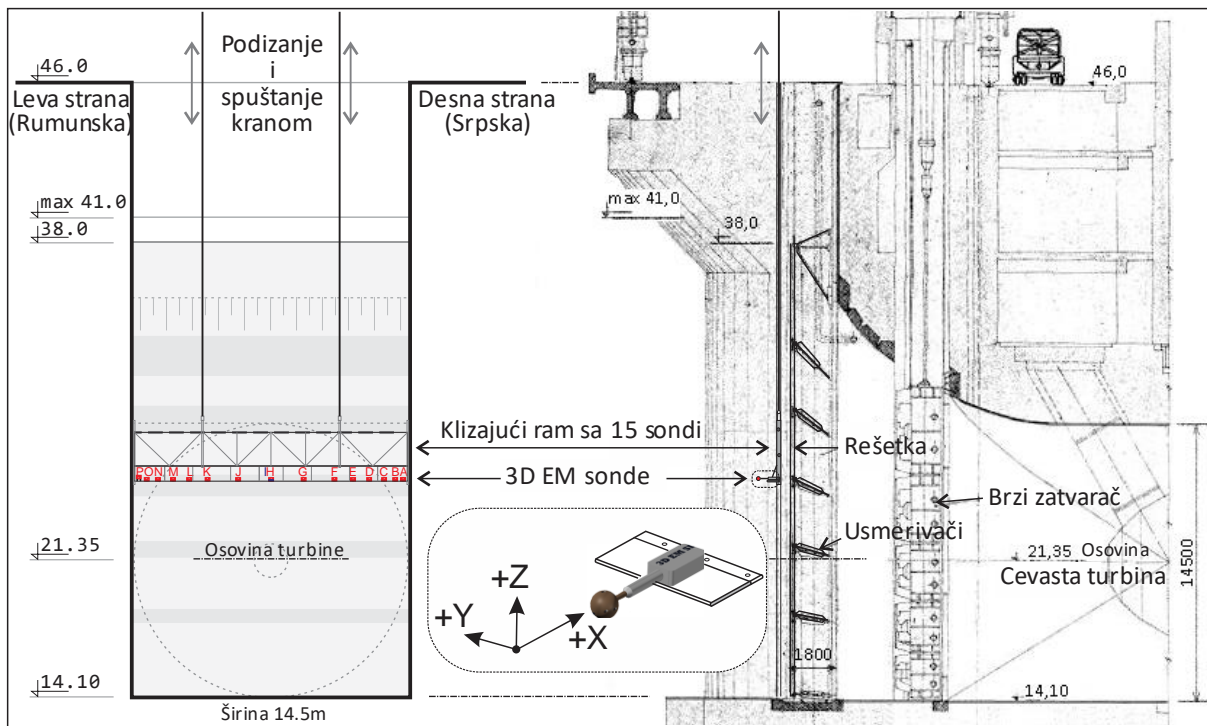
4. Opis tehničkog rešenja

4.1. Proračun protoka na osnovu realnog polja brzina

Da bi se obavilo merenje protoka na turbinama HE "Đerdap 2", na osnovu slike 1 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 1. Cevna turbina sa dostrujavanjem koje onemogućava standardno merenje protoka.



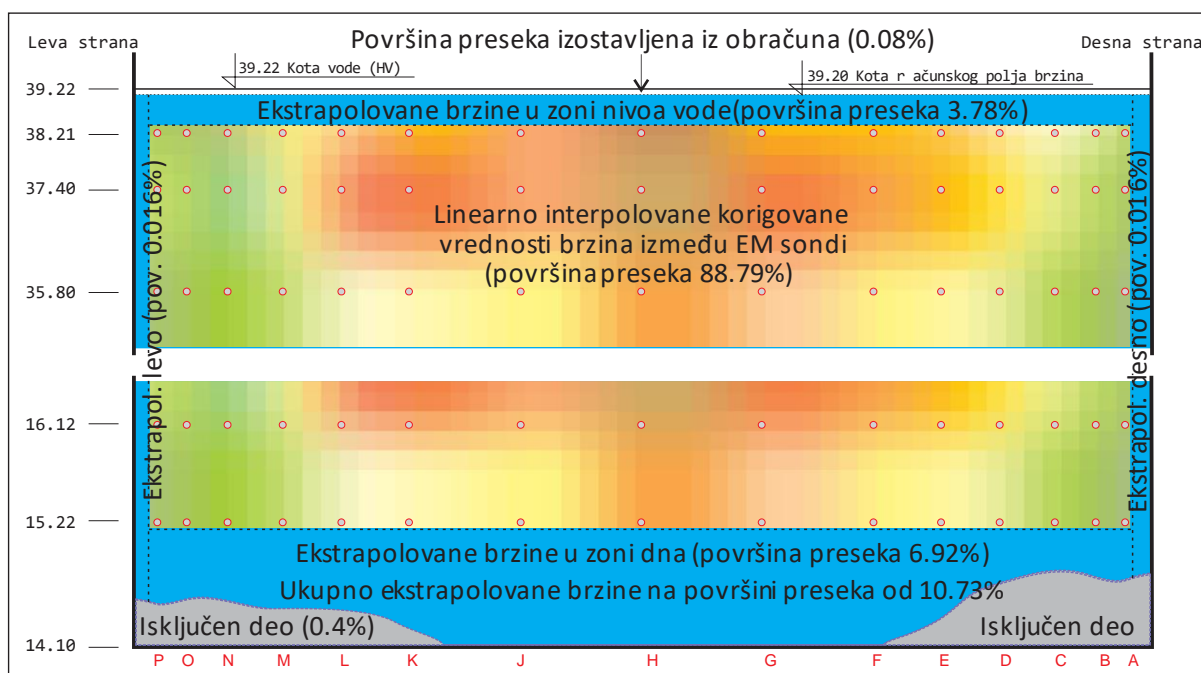
Slika 2. Merenje rasporeda brzina na ulazu u turbinu, pomoću sonde koje mere sve tri komponente brzine.

Sistem za merenje protoka je koncipiran tako da se postavi niz senzora za merenje brzine na prilazu/ulazu u turbinu, uzvodno od grube rešetke (slika 2). Kruti čelični ram, opremljen mernom opremom, se postavlja u vodice predviđene za grajfer kojim se čisti rešetka. Sa hidrauličke strane bi bilo povoljnije koristiti lokaciju brzog predturbinskog zatvarača (slika 2, desni deo), nizvodno od ulazne rešetke. Na toj lokaciji je strujna slika nešto povoljnija. Veliki vrtlozi i uticaj poprečne komponente su smanjeni prolaskom kroz rešetku koja se ponaša kao „turbulentni generator“ manjih vrtloga zajedno sa velikim usmerivačima. Takođe, uticaj nanosa na mernu opremu bi bio znatno manji. Na žalost, zbog starosti turbine, dispečeri elektrane se ne mogu osloniti samo na brzo zatvaranje turbinskog kola i u nekim operativnim situacijama im je neophodno brzo spuštanje predturbinskog zatvarača, tako da nije bilo dozvoljeno postavljanje opreme na njegovoj lokaciji.

Na slici 2 se vidi da je predviđeno postavljanje 15 sondi na horizontalnom nosaču čeličnog rama, koji se kranom dizalicom prvo spušta na dno proticajnog preseka, pa se zatim u okviru jedne merne sesije (merenje jednog protoka), odnosno tokom profilisanja brzina pri jednom protoku, podiže do površine vode, oko 27 m. Pored rasporeda brzina na jednoj

horizontali, meri se stalno i položaj te merne horizontale. Tokom kretanja rama, sva merna oprema kontinualno radi i može da beleži podatke na svaku sekundu (IJČ i ostali, 2020).

Usvojeni sistem snimanja profila brzina na ulazu u turbinu sa pokretnim ramom je kompromis između suprostavljenih zahteva: visoke tačnosti merenja, brz rad, neuticajne na radne parametre turbine i prihvatljive cene. Sa stanovišta merne nesigurnosti, kao i neustaljenosti protoka, bolje bi bilo postaviti fiksni ram kojim bi se ceo ulazni profil istovremeno snimao pomoću N horizontalata, a na svakoj horizontali bi bilo M sonde. Za date dimenzije proticajnog profila, trebalo bi najmanje $N=16$ profila i $M=14$ sonde, odnosno ukupno 224 sonde. Pošto se koriste sonde koje mogu da mere prostorni vektor brzine, 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 poremećaj s obzirom da je ukupni radni pad oko 7 m.



Slika 3. Linearna interpolacija polja brzina unutar merenog dela profila i ekstrapolacija u četiri namerena dela.

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 vreme trajanja dugačko: ako je na svakom profilu vreme osrednjavanja oko 10 minuta, za 18 profila (oko 1,5 m razmak između profila) je ukupno vreme profilisanja 3 sata. U tom periodu 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 za nekih 10 minuta (prosečna brzina podizanja rama 0,045 m/s i visina 27 m), ali je velika standardna devijacija merenih brzina.

Neustaljenost tokom profilisanja je neminovna, tako da je potrebno normalizovati sve izmerene brzine prema jednom referentnom protoku (ili snazi turbine). Zbog toga se pored snimanja profila brzina, uzimaju trenutni podaci o radu turbine: snaga, protok na Winter-Kennedy (WK) davaču, položaj sprovednog aparata i neto pad. Podatak o promenama u odnosu na izabrani referentni protok (ili snagu) se koristi u procesu normalizovanja svih merenih veličina.

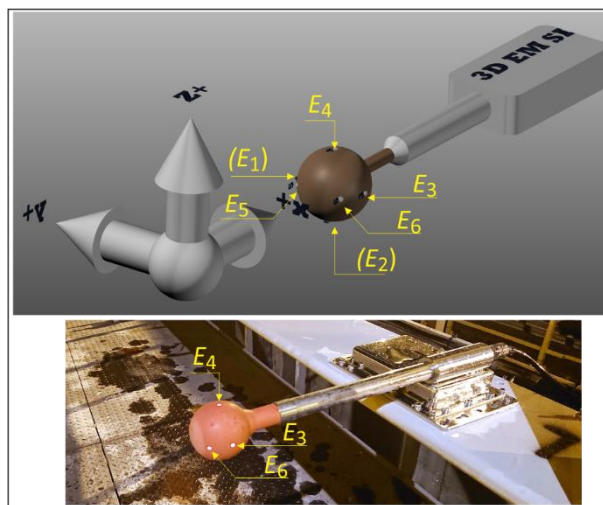
Na slici 3 je prikazan prostorni raspored podužne (U_x) komponente brzine nakon normalizacije. Ceo merni profil je rasterizovan pravilnom mrežom kvadrata sa korakom

$\Delta Y = \Delta Z = 0,05$ mm (na slici je prikazan grublji raster, da bi se lakše videlo). Kružićima su prikazana mesta gde su se nalazile EM sonde i gde postoji podatak o izmerenim i normiranim brzinama. Između sonde se mreža popunjava vrednostima na osnovu linearne interpolacije i taj deo pokriva malo manje od 90% proticajnog profila. Plavom bojom su prikazane površine pravilne mreže u kojima se ekstrapoluju brzine koristeći teorijske obrasce koji važe u graničnim zonama. Moguća je primena linearne, eksponencijalne i logaritamske zakonitosti sa različitim parametrima, za svaku od zona.

Protok kroz merni profil je jednak integralu rasterizovanog polja brzina V_x , podužne komponente. Taj protok se na kraju poredi sa protokom izmerenim na WK davaču, u periodu koji je izabran kao referentni prilikom normalizovanja merenih podataka. Podaci o druge dve komponente brzina se ne koriste u obračunu protoka već služe kao provera rada ukupne metode. Takođe, podaci sa dve kontrolne ADV sonde se koriste samo kao kontrola izmerenom polju brzina, ne koriste se u obračunu protoka.

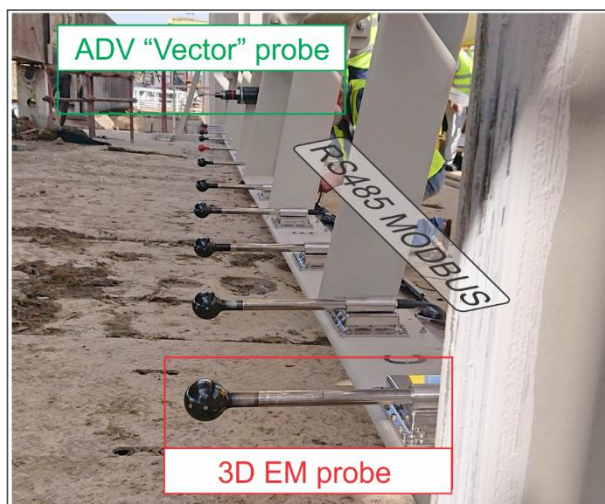
4.2. Merenje prostornog polja brzina

Merenje brzina je obavljeno elektromagnetnim sondama (Ivetić, 2019; Prodanović i Ivetić, 2019). Na slici 4 gore je prikazana novorazvijena 3D EM sonda LOG-xXYZ-65 proizvođača "Svet Instrumentata", sa svojim lokalnim koordinatnim sistemom. Prečnik sferne merne glave je 63 mm a ukupna merna zona sonde je prečnika oko 120 mm. Merni opseg sonde je +/- 5 m/s, tačnost merenja brzina je bolja od 1% za opseg brzina 0,2-2 m/s 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.



Slika 4. Korišćena 3D+EM sonda sa elektrodama

Pomoću elektroda E_1 i E_3 , E_2 i E_4 (slika 4) i dva elektromagnetna kalema u glavi sonde koje se nalaze po obimu sfere, sonda meri bidirekzione (u oba smera) tri komponente brzine V_x , V_y i V_z . Pored ove tri komponente, sonda je tako projektovana da može da meri podužnu komponentu V_x i pomoću dve dodatne elektrode (E_5 i E_6) koje se nalaze pod uglom od 45° sa prednje strane (zato je u nazivu sonde oznaka 3+D). Podužna komponenta V_x je uglavno osetljivija i može se koristiti samo za užu opseg uglova dostrujavanja (oko +/- 20° - 30°) i bez povratnog toka, ali u datom opsegu brzina može pouzdanije da meri (tačnost 0,5%) i pri velikim dolaznim brzinama (od 2 do 5 m/s).



Slika 5. Korišćena 3D+EM sonda montirana na ram zajedno sa ADV sandom

Da bi se obezbedilo kontrolno merenje brzine, pored 3+D EM sonde, na merni ram (slika 5 u gornjem delu slike) su postavljene i dve trokomponentne ADV sonde „Vector“ proizvođača NORTEK, fabrički predviđene za horizontalnu ugradnju. Tačnost sonde je 1%. Sonde imaju ugrađen loger, baterije i senzor pritiska. Brzina uzorkovanja je bila najniža moguća, 1 sekunda. Da bi se obezbedio neometan i pouzdan rad ADV sonde, korišćene su u autonomnom radu, samo sa lokalnim logerom i sa baterijskim pogonom, bez spajanja na komunikacioni sistem.

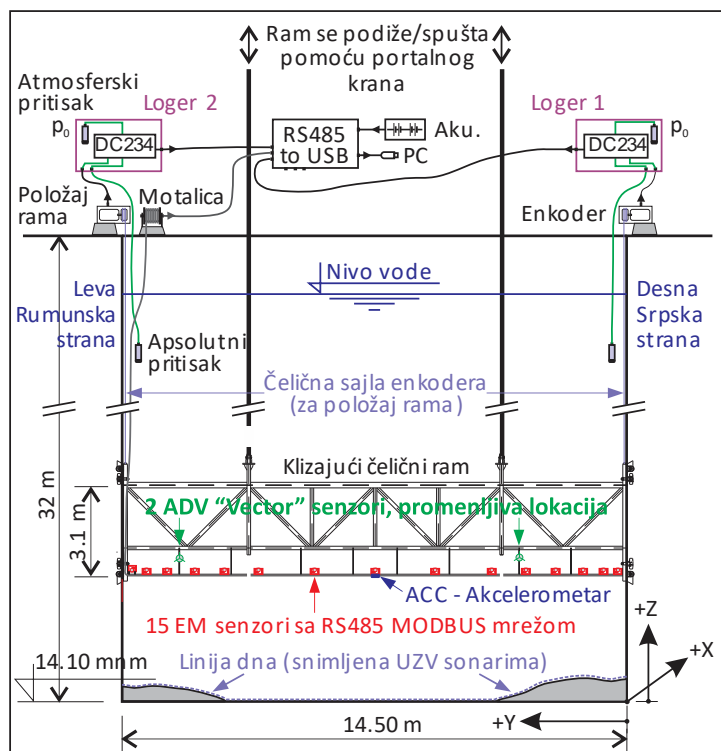
4.3. Analiza neodređenosti merenja i proračuna protoka

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 za merenje protoka u rekama pomoću hidrometrijskih krila ISO 748 (ISO, 1997) i ISO 1088 (ISO, 1973), a korišćena je metodologija prema Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement - GUM (Joint committee for Guides in Metrology, 2008).

Kako je merni sistem inovativnog karaktera, sa novorazvijenim EM sondama i specifičnim režimima rada, razvijena je posebna procedura za određivanje merne nesigurnosti (Ivetić i ostali, 2021b). U osnovi, 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. Ovde su se našle nesigurnosti usled konačnog broja mernih tačaka po vertikali i horizontali, 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.

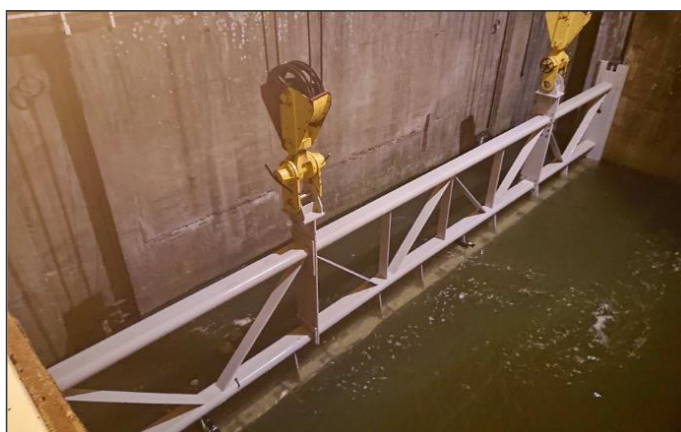
4.4. Merni sistem

Merenja prema opisanoj metodologiji su urađena pomoću sistema koji je prikazan na slici 6, gde je dat šematski prikaz celokupne korišćene opreme.



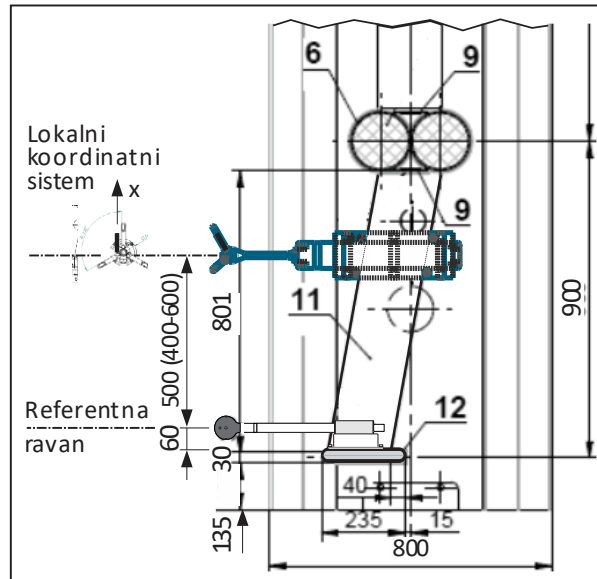
Slika 6. Sistem za merenje rasporeda brzina na ulazu u turbinu

Čelični ram dimenzija (14.5x3,1m) je projektovan sa gornjim nosećim delom rešetkastog tipa sa masovnim hidraulički oblikovanim profilima i sa relativno tankom donjom gredom za kačenje mernih sondi, koja je izbačena u napred i nalazi se izvan uticaja samog rama. Duž te grede, sa nizvodne strane, se nalazi i niša za vođenje kablova. Zbog lakšeg transporta i manipulacije ramom na samom objektu, napravljen je iz tri segmenta. Vođice rama su tako projektovane da smanje trenje uz sprečavanje pomeranja rama. Na fotografiji na slici 7 se vidi ram prilikom merenja u poslednjem, najvišem profilu mernog preseka (pa su ADV sonde iznad površine vode). Ram je okačen na kran na mestu gde se spajaju segmenti.



Slika 7. Fotografija sistem za merenje rasporeda brzina na ulazu u turbinu, ram je u najvišljnoj mernoj poziciji za EM sonde, ADV sonde su u ovom najvišem profilu izvan vode, ne mere brzine

Na ram je postavljen akcelerometar, kako bi se proverile oscilacije rama, frekvencija i amplituda, pri različitim režimima rada turbine. Zahvaljujući svom obliku i dizajnu ukućenja, kao i sistemu vođica, ram je pokazao minimalna pomeranja tokom merenja.



Slika 8. Detalj rama sa sondama

Na donjoj gredi rama je postavljeno 15 EM sonde, sa većom gustinom u zonama bliže zidu (slika 6). Merna zona je pozicionirana ispod glavne konstrukcije rama (slika 8, profili 6 i 9 su nosači donjeg dela rama) i ispred noseće grede (pozicija 12 na slici 8) kako bi se smanjio uticaj rama na merene brzine. Na vertikalnim nosačima (pozicija 11) su postavljene dve ADV sonde „Vector“ firme Nortek (NORTEK, 2021). Sonde su tako pričvršćene da omogućavaju laku demontažu i premeštanje. ADV sonde su montirane oko 0,5 m iznad referentne ravni, tako da prilikom obrade rezultata, zbog izrazite prostorne neravnomernosti strujanja, treba uzeti u obzir da EM sonda i ADV ne mere u istoj tački.

Položaj rama se meri kontinualno preko dve čelične sajle koje se namotavaju na shaft-encoder, pretvarači firme UniMeasure „HX-EP“ (UniMeasure, 2021), tačnosti bolje od 0,025%. Koriste se dva pretvarača, tako da se prati i eventualna nagnutost rama.

Položaj slobodne površine se meri pomoću senzora apsolutnog pritiska, odvojeno sa leve i sa desne strane preseka. Koriste se senzori MEAS 86 Series, firme TE CONNECTIVITY (2021), linearnosti 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. Nakon obavljenih merenja, sa SCADA-e HE „Đerdap 2“ se preuzimaju i njihova merenja nivoa vode ispred rešetke, sa sistema koji se na žalost ne kontroliše redovno pa su podaci niže tačnosti.

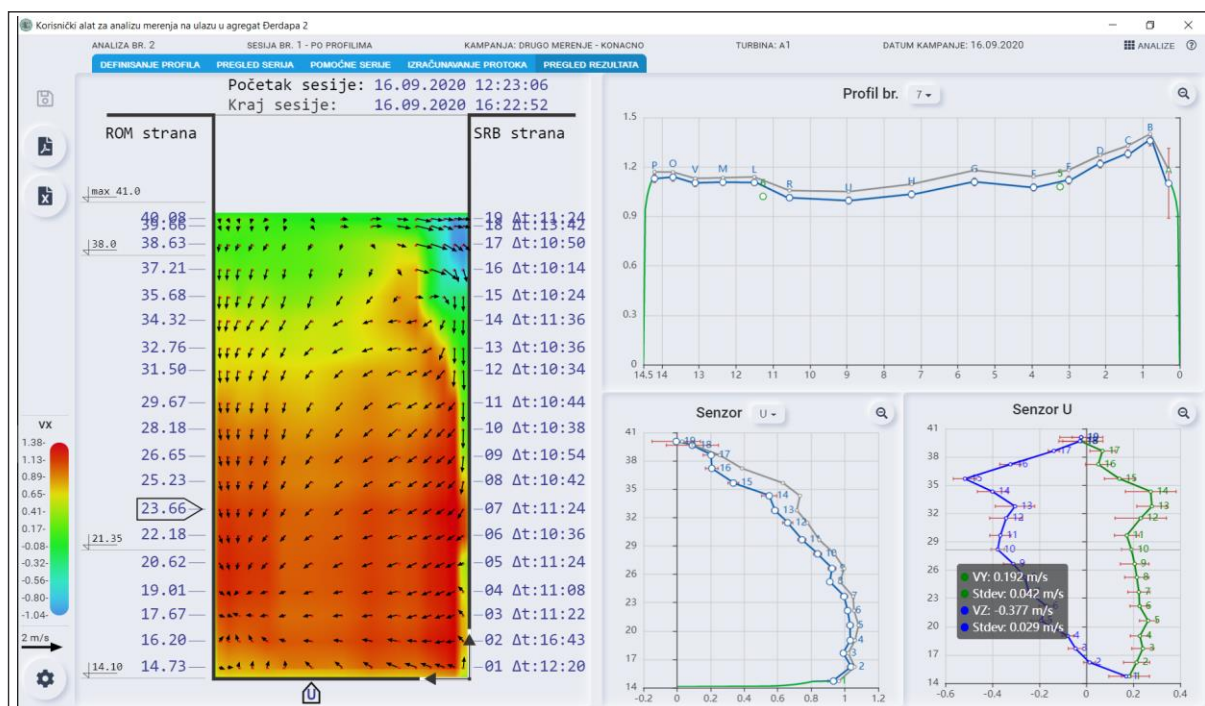
Stvarni oblik dna se proverava UZV sonarima pre sprovedenih merenja. Sonari su „Ping Sonar Altimeter and Echosounder“ firme Bluerobotics (2021), single-beam echosonderi koji mere razdaljine do 50 m pod vodom, do maksimalne dubine od 300 m. Rezolucija sonara je 0,5% od specificiranog radnog opsega. Koriste se 4 sonara postavljena sa donje strane noseće grede (ne vide se na prikazanim slikama). Prilikom merenja kota dna, ram se spušta do 1 m iznad najniže tačke tako da se postiže tačnost merenja kota dna od par santimetara.

Sve EM sonde su povezane na ramu pomoću RS485 mreže podvodnim kablovima. Na površini terena se nalazi metalica na ručni pogon, sa klizajućim kontaktima. U istu mrežu su spojena i dva shaft-encodera 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. Svi podaci se iščitavaju na 1 do 2 sekunde. Istovremeno, svaka od sonde u svom logeru čuva širi set podataka, koji je moguće na poseban zahtev preuzeti istom kablovskom vezom.

Dve postavljene ADV sonde nisu povezane u mrežni sistem da bi se obezbedila potpuna nezavisnost i redundatnost merenja. Te sonde imaju svoje interno napajanje i dataloger. Podaci o sve tri komponente brzine i o pritisku (dubini) čuvaju se na 1 sekundu. Po završenom profilisanju i sklanjanju rama sa ulaza u turbinu, vrši se preuzimanje tih podataka. Takođe, sa SCADA-e HE „Đerdap 2“ se po završenom merenju preuzimaju sekundni podaci o radu turbine i sprovodnog kola. Sinhronizacija ovih „off-line“ podataka se vrši preko realnog vremena.

4.5. Softver za akviziciju i obradu

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



Slika 9. Softver za obradu podataka – radni ekran

Softver za akviziciju se sastoji od dve komponente: programa „DC234Server“ (DC234, Svet Instrumenata, 2021) za upravljanje radom RS485 mreže i svim uređajima na toj mreži i programa „RealTimeHydroVisual“ (RTHV, Vodena, 2021) za praćenje, upravljanje, vizuelizaciju i prikupljanje podataka tokom merenja. DC234 je program opšte namene za komunikaciju sa različitim konfiguracijama merne opreme i ima svoj sofisticirani upravljački interfejs koji nije predviđen za neiskusne korisnike. Zbog toga je napravljeno da se DC234 izvršava u pozadini a da je glavni upravljački program RTHV, sa grafičkim interfejsom i funkcijama prilagođenim konkretnom poslu snimanja rasporeda brzina na ulazu u turbinu. Korisnik započinje novi posao (kampanju) i u okviru njega obavlja više različitih profilisanja (sesija). 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, stanje merne opreme, standardne devijacije brzina, crta se realni položaj rama i slično. Podaci sa DC234 se preuzimaju on-line sa zadatom brzinom. Zbog korišćenog Windows okruženja, moguće je da dođe do povremenog „zastoja“ u komunikaciji i da se neki podaci „preskoče“ – oni će biti naknadno učitani direktno iz logera! Kroz sistem komentara, u svakom trenutku se može uneti dodatna informacija (metapodatak)

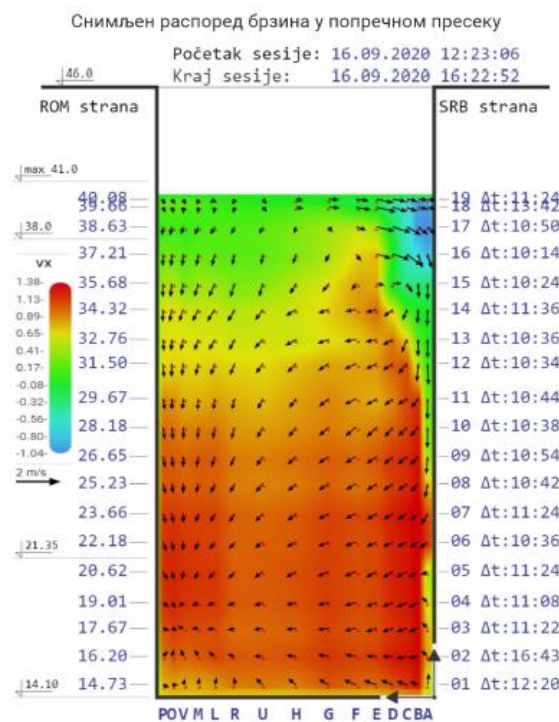
o trenutnom zapažanju ili očitavanju dispečera („Prestala da radi susedna turbina“, i slično) bitnom u kasnijem tumačenju i obradi podataka.

Записник са снимања поља брзина и обрачуна протока на турбини ХЕ Ђердап 2

Датум обављеног мерења: 16.09.2020 у времену од: 12:23:06 до: 16:22:52.

Референтни профил број: 5 у времену од: 13:22:44 до: 13:34:08.

Турбина А1 са активном снагом на генератору у референтном периоду од 26.50 MW, средњим протоком у референтном периоду Q_WK 283.35 m³/s, и нето падом у референтном периоду од 9.51 m.



Обрачуна проток по мерним зонама
Укупан израчунати проток 295.188 m³/s
Комбинована мерна несигурност 1.1%

Проток леве стране 7.021 m³/s (2.38%)	Проток горњег дела -0.216 m³/s (-0.07%)	Проток десне стране 2.209 m³/s (0.75%)
	Проток централог дела 280.474 m³/s (95.02%)	
	Проток доњег дела 5.701 m³/s (1.93%)	

Део	Метода екстраполације	Образац
Површина:	Линеарна	$V_x = 0.53 * Z^{-21.26}$
Румунија:	Експоненцијална	$V_x = 0.94 * Z^{1/9}$
Србија:	Експоненцијална	$V_x = 0.29 * Z^{1/9}$
Дно:	Експоненцијална	$V_x = 0.92 * Z^{1/6}$

Обраду података урадио: Dusan
Датум обраде података: 23.09.2020 18:26

Слика 10. Записник о урађеном мерењу и обради

Softver за обраду података „AnalysisHydroVisual“ (AHV, Vodena, 2021) се покреће по завршеном профилisanju. Softver AHV омогућава преузимање off-line података са ADV сензора, SCADA-е турбине као и директно преузимање мерених података из EM сонди ако је током мерења долазило до застajkивања система и прескока неких од on-line података. Обрада података подразумева детаљан преглед података са SCADA-е и избор референтног периода,

normalizaciju svih merenih podataka, pregled svih komponenti brzina (slika 9) i upoređivanje EM i ADV podataka, korekcije merenih podužnih komponenti u zonama gde je došlo do blokade senzora i na kraju, proračun protoka sa svim informacijama o komponentama izračunatog protoka kao i komponentama merne nesigurnosti.

Po završenoj jednoj obradi merenih podataka u sesiji, AHV sprema Zapisnik o obavljenom merenju u PDF formatu (slika 10) sa prikazanim režimom rada turbine tokom merenja i izabranim referentnim periodom, sa položajima rama tokom snimanja profila brzina, prostornom komponentom brzine (podužna komponenta prikazana bojom a dve poprečne vektorom), izmerenim i obračunatim protocima po sektorima kao i sa korišćenim analitičkim izrazom za ekstrapolaciju. S obzirom da je moguće birati različita podešavanja filtera, referentnog perioda i referentne veličine, kao i korigovati neke od merenih brzina, AHV omogućava pravljenje više varijanti obrade jedne merne sesije, pri čemu se pri generisanju finalnog Zapisnika (slika 10) „zaključava“ ta obrada.

4.6. Rezultati i validacija tehničkog rešenja

4.6.1. Inkrementalno profilisanje

4.6.1.1. Potrebno vreme merenja na jednom profilu

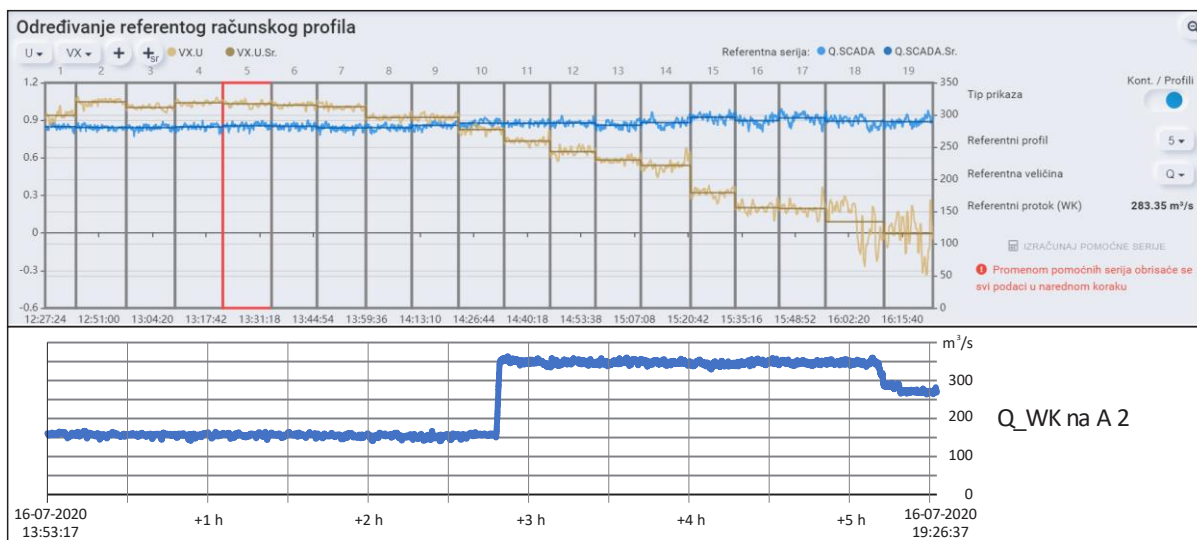
U inkrementalnom režimu profilisanja, korisnik sam odlučuje koliko će dugo ram mirovati na određenoj koti. Softver RTHV pomaže time što za trenutne vrednosti prikazuje sve komponente brzina i njihove standardne devijacije. Neustaljenost strujanja prilikom konstantnog rada turbine je proverena dužim snimanjem brzina u jednom profilu. Ustanovljeno je da, pored „bržih“ varijacija brzine usled postojanja turbulencije koja utiče i na varijacije protoka i pada, postoji i sporija komponenta varijacije od nekih 3 minuta. U razgovoru sa drugim istraživačima (Staubli, 2021) potvrđeno je da su uočene takve spore varijacije protoka na hidroelektranama sa sličnom dispozicijom (mali pad, kratak dovodni trakt, široki ulazni profil). Te spore varijacije utiču na potrebno vreme osrednjavanja prilikom merenja parametara, posebno rasporeda brzina, odnosno protoka i potrebno ih je proveriti na svakom objektu posebno.

Na osnovu učinjenih provera kao i na osnovu iskustva sa obavljenih merenja, zaključeno je da je optimalno vreme osrednjavanja na jednom profilu 10 minuta.

4.6.1.2. Neustaljenost protoka tokom profilisanja

Izbor inkrementalnog profilisanja 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.

Na slici 11 gore, je prikazan redovan režim merenja, gde nije bilo velikih varijacija u dotoku na turbinu (mereno sa WK davačem, plava linija). Na dijagramu je (oker boja) nacrtana i podužna komponenta brzine za sondu na vertikali U (slika 9), trenutne vrednosti i osrednjene (merenja kreću od dna profila pa idu na gore). Korisnik bira koji će profil (period vremena) proglasiti za referentni (na slici 11 je to profil 5) i za taj profil se sve merene brzine normalizuju (za sve ostale profile se računa koeficijent neustaljenosti kao odnos referentnog i protoka na WK za taj profil, a onda se merenja brzina dele sa tako dobijenim koeficijentima).



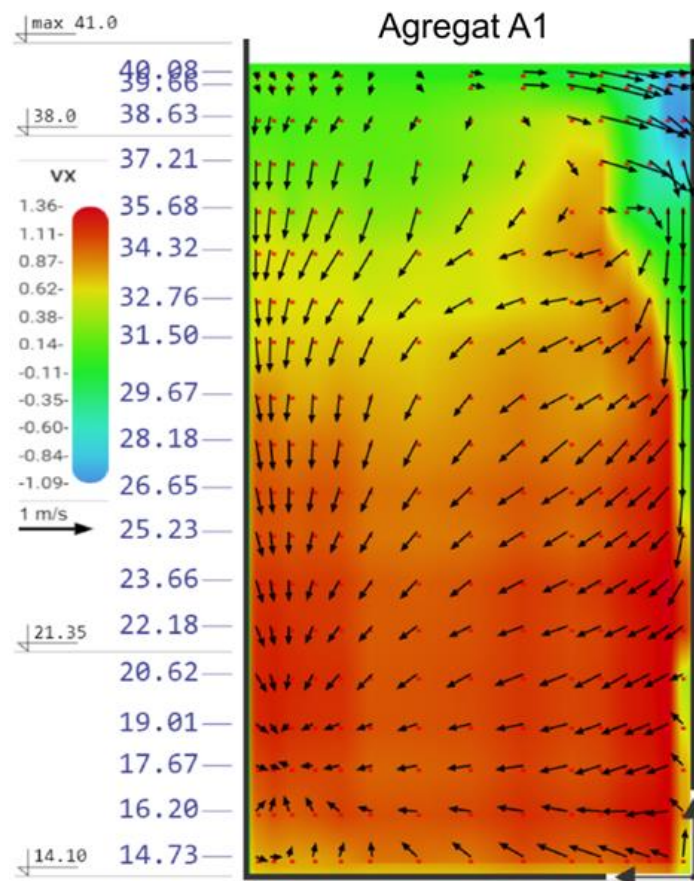
Slika 11. Neustaljenost protoka tokom snimanja profila brzina (plava linija) i odabir referentnog protoka – gornja slika sa korektnim (malim) varijacijama, donja slika primer neprihvatljive promene tokom profilisanja.

Moguće je, međutim, da tokom profilisanja dođe do značajne promene režima rada turbine (slika 11 donji deo, nesporazum sa dispečerom, nagle promene režima HE, ili nešto treće). S obzirom da koristimo WK merač koji je nelinearan i, verovatno, pogrešan, te veće promene nije moguće kompezovati i potrebno je odbaciti takvo merenje.

4.6.1.3. Merenja na turbinama A1 i A7

Primenom inkrementalnog profilisanja, sa osrednjavanjem od 10-tak minuta po profilu i sa 18 do 19 snimljenih profila, obavljena su merenja protoka na dva agregata A7 (27. i 28.08.2020.) i A1 (16. i 17.09.2020.) pri tri, odnosno četiri protoka. Kombinovane (ukupne) merne nesigurnosti za sva merenja su u rasponu 1,02 do 1,5%, jedino je pri maksimalnom protoku, pri promeni uslova rada agregata (slika 12 dole) dobijena kombinovana merna nesigurnost od 2,3% pa je to merenje ponovljeno. Tokom merenja pri minimalnom protoku, Q_{wk} je povremeno padao na 0 m³/s, što je u obradi (proračunu srednjeg protoka Q_{wk}) otklonjeno ugrađenim Mediana filterom.

Na slici 12 je dat i raspored brzina na ulazu u turbinu A1, pri maksimalnim protocima. Bojama su predstavljene podužne komponente V_x , a sa vektorima poprečne V_y i V_z . U gornjem desnom uglu je evidentan povratni tok, sa negativnim brzinama, dok je u donjem levom uglu maksimalna brzina. Osa turbine je na 21,35 mm, prečnim turbine 14,5 m pa je gornja kota ulaza turbine na 28,6 mm (slika 2).



Slika 12. Polje brzina na ulazu u turbine A1 pri maksimalnom protoku.

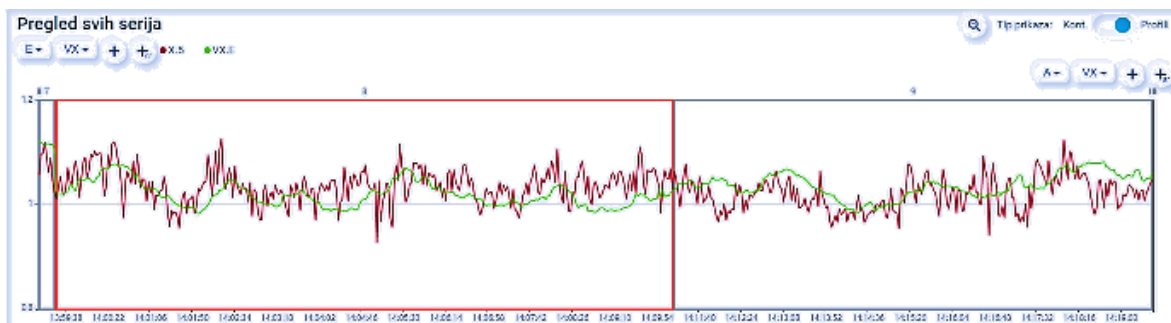
4.6.1.4. Nulti protok

Dobar test 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. Ta komponenta je „zadužena“ i za pomeranje naslaga trave: evidentno je nakon zaustavljanja turbine kako okolne turbine polako „izvlače“ travu iz profila.

Snimanja polja brzina na agregatu A7 pri zatvorenom sprovodnom aparatu turbine, dobijene su izmerene brzine u opsegu od par cm/s dok je ukupno obračunati protok $-0,26 \text{ m}^3/\text{s}$. Na žalost, korišćeno je samo 6 mernih profila, tako da je jako grubo snimljen prostorni raspored brzina pa je i procenjena kombinovana merna nesigurnost bila velika (veća od 5%). Obračunati protok naravno nije pokazatelj da voda zaista „ističe“ iz agregata i ide prema Dunavu, već je to greška merenja, koja je, i pored grubo snimljenog profila brzina, bila ispod 0,1% punog opsega merne opreme (od $300 \text{ m}^3/\text{s}$).

4.6.1.5. Poređenje EM i ADV sondi

Na ramu sa opremom, pored 15 komada EM sondi, postavljene su i dve ADV sonde (slike 6, 7 i detalj na slici 8). Kako ADV sonde nisu spojene na on-line sistem, tokom merenja korisnik nema na ekranu njihova trenutna očitavanja. Međutim, prilikom obrade podataka, korisnik ima uvid u pokazivanje ADV sondi na lokacijama gde su postavljene (nije fiksna lokacija, korisnik bira gde će ih postaviti). Na slici 10 se u rasporedu brzina po profilu (gore desno) ADV prikazane zelenim kružićima i brojevima 5 (na 6,5 m od desnog zida) i 6 (na 13 m).



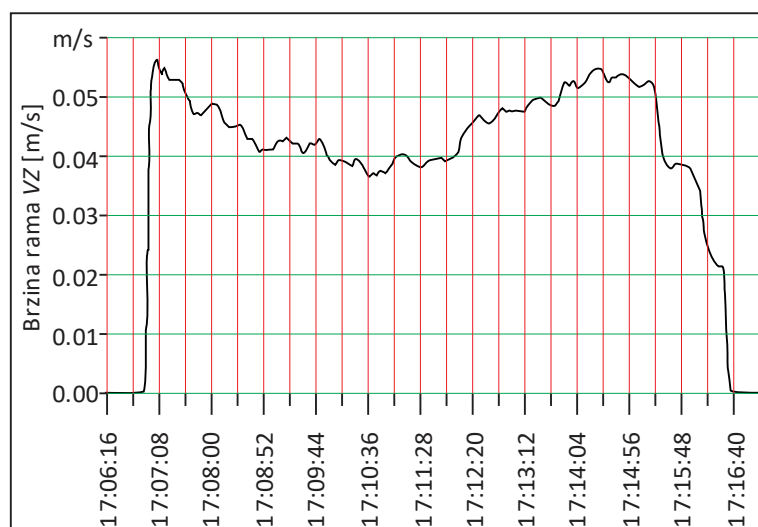
Slika 13. Poređenje podužne brzine merene EM sondom i ADV sondom.

Na slici 13 je dat uvećan prikaz merenja podužne komponente brzine na ADV sondi (crvena linija) i na EM sondi (zelena linija) iz prve sesije drugog merenja, na A1, u profilima 8 i 9. Opseg brzina na ordinati je razvučen na 0,8 – 1,2 m/s. Dat je sirovi signal, bez prostorne interpolacije (dve sonde ne mere u istoj tački), tako da se vidi da sonde ne mere iste vrtloge, ali ukupna osrednjena brzina je ista.

4.6.2. Kontinualno profilisanje

Kontinualno profilisanje značajno ubrzava mernu sesiju i omogućava da se snimi jedan profil brzina u celom strujnom polju za desetak minuta. Sa rukovaocem kрана je proverena mogućnost rada kрана sa kontinualnim sporim podizanjem. Na slici 14 je prikazana brzina rama, merena preko enkodera, tokom kontinualnog podizanja. Ta brzina će, prilikom snimanja profila brzina, biti dodata vertikalnoj komponenti brzine vode. S obzirom da se položaj rama meri u sekundnom intervalu, u softveru za obradu se računa brzina rama i smer (pozitivna brzina je smer na gore) i ta se brzina odbija od izmerenih vertikalnih komponenti brzina vode.

Sa slike 15 se vidi da je moguće veoma sporo podizati ram (brzina VZ je pozitivna na gore), sa brzinama koje su do desetak puta manje od merenih vertikalnih komponenti brzine vode. Dok je ram u vodi, brzina je 0,036-0,056 m/s, kada ram počne da se pojavljuje iz vode brzina pada prvo na 0,038 m/s (kada se pojavi kolutača kрана) pa na 0,022 m/s. Za prosečnu brzinu podizanja rama od 0,045 m/s i visinu od 27 m, potrebno je $t=10$ minuta za snimanje celog profila (za jednu sesiju profilisanja).



Slika 14. Brzina rama prilikom podizanja (VZ je pozitivno na gore).

Tokom merenja na turbini A7, urađeno je kontinualno profilisanje. Da bi se proverila ponovljivost, snimljene su tri sesije u istoj radnoj tački. U obradi rezultata sve serije su diskretizovane po visini na segmente od 1,5 m (u 18 profila) i izračunate su srednje vrednosti po segmentima. Nakon toga, sprovedena je analiza kao da je rađeno inkrementalno profilisanje. Dobijeni rezultati pokazuju značajno veću slučajnu mernu nesigurnost, jer su periodi osrednjavanja jako kratki. Ukupna kombinovana nesigurnost je bila u opsegu 2,39 do 2,79% za tri ponovljena profilisanja.

Prednost kontinualanog snimanja je što se brzo obavi posao snimanja polja brzina, a osnovna mana je što se ne osrednje dobro vrtlozi koji postoje u profilu. Ponavljanjem više merenja (što je i učinjeno na oba merenja), ako se ne menjaju radni uslovi, trebalo bi da se osrednjavanjem snimljenog protoka, dobije tačniji podatak: za dati primer, kombinovana merna nesigurnost bi se smanjila na 1,47%. Na žalost, većim brojem ponavljanja se opet otvara pitanje dugotrajne stabilnosti režima rada agregata.

5. 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 prostorne 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.

Predloženim tehničkim rešenjem definiše se metodologija koja omogućava merenje protoka na bilo kom agregatu HE „Đerdap 2“ bez njegovog zaustavljanja i posebnih pripremnih radnji. Opisana je merna oprema, prateći sistemi i softver za merenja i obradu, koji su uspešno primenjeni na dve turbine HE „Đerdap 2“. Osnovu mernog sistema čine novo-razvijene elektromagnetne sonde za merenje sve tri komponente brzine, postavljene u horizontalnoj, simetričnoj i neuniformnoj dispoziciji na čeličnom ramu, koji se pomoću kranske dizalice podiže po preseku. Ključne prednosti razvijene metodologije u odnosu na alternativna rešenja su:

- Mogućnost rada u uslovima prostorne strujne slike, odnosno u uslovima gde vektor brzine ima tri značajne komponente,
- Robusnost u pogledu primenjivosti merne tehnike, gde elektromagnetni princip rada zahteva jedino elektroprovodnost vode za merenje brzine,
- Inovativna procedura za procenu merne neodređenosti koja obuhvata širi spektar potencijalnih uticaja,
- Kontrola merenja u realnom vremenu i napredne mogućnosti post-procesiranja izmerenih podataka.
- Mogućnost rada u dva režima, inkrementalnom i kontinualnom, gde se sa inkrementalnim uz veći utrošak vremena postiže bolja tačnost, dok se sa kontinualnim značajno brže može obezbediti podatak nešto niže tačnosti.

6. Literatura

1. Benišek M., B. Ignjatović, M. Nedeljković (1994): *Uticao kosog dostrujavanja vode na karakteristike cevnih turbina*. 11. Savetovanje Hidrauličara i Hidrologa, Beograd.

2. Bluerobotics (2021): *Ping Sonar Altimeter and Echosounder*, Bluerobotics, USA <https://www.bluerobotics.com/store/sensors-sonars-cameras/sonar/ping-sonar-r2-rp/>
3. HE „Đerdap 2“ (2021): <http://www.eps.rs/cir/djerdap>
4. IEC 60041 (1999): *International standard: field acceptance tests to determine the hydraulic performance of hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines*. European Equivalent: EN 60041
5. Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“ (2006): *Hidraulički model HE „Đerdap 2“ – Izveštaj ispitivanja na hidrauličkom modelu uslova dostrujavanja na turbine*, Beograd.
6. Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Građevinski fakultet – Univerziteta u Beogradu, Svet Instrumenata (2020): *Izveštaj o sistemu za merenje protoka na prilazima HE „Đerdap 2“*, Beograd.
7. Ivetić D. (2019): Određivanje protoka tečnosti u složenim uslovima strujanja primenom ravnih elektromagnetnih senzora, *Doktorska disertacija*, Građevinski fakultet Beograd.
8. Ivetić D., D. Prodanović, P. Vojt (2021a): 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.
9. Ivetić D., D. Prodanović, P. Vojt (2021b): Određivanje protoka na prilazima cevnih turbina uz pomoć EM senzora brzine: Određivanje nesigurnosti izmerenog protoka. *SDHI i SDH*, Beograd.
10. ISO 1088, (2007): Collection of data for determination of errors in measurement by velocity area methods, *International Standards Organization*, Geneva.
11. ISO 748, (2007): Velocity area methods, *International Standards Organization*, Geneva.
12. Joint committee for Guides in Metrology (2008) Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM), *International Organization for Standardization*.
13. NORTEK (2021): <https://www.nortekgroup.com/products/vector-300-m>
14. Performance Test Code - PTC (2002): Code 18: Hydraulic Turbines and Pump-Turbines, *American Society of Mechanical Engineers*, New York, USA
15. Prodanović D., D. Pavlović, N. Branislavljević (2011): Merenje protoka na kratkim objektima u hidraulički neregularnim uslovima na primeru HE „Đerdap 2“, *Vodoprivreda*, 43, broj 252-254, strane 103-115.
16. Prodanović D., D. Ivetić (2019): Primeri primene ravnih elektromagnetnih sonde za merenje protoka u kolektorima, *Vodoprivreda*, 51, broj 300-302, strane 197-209.
17. Prodanović D., D. Ivetić, P. Vojt (2021): Određivanje protoka na prilazima cevnih turbina uz pomoć EM senzora brzine: Prikaz merne metode, *SDHI i SDH*, Beograd.
18. Staubli T. (2021): Private communication, Hochschule Luzern – Technik & Architektur, thomas.staubli@hslu.ch
19. Svet Instrumenata (2021): <http://www.si.co.rs/>
20. TE CONNECTIVITY (2021): MEAS 86 Series Sensors <https://www.te.com/usa-en/product-CAT-MIPS0020.html>
21. UniMeasure (2021): <https://unimeasure.com/wp-content/uploads/2019/12/HX-EP-SERIES-CATALOG-PAGES-1.pdf>
22. Vodena (2021): <https://vodena.rs/>

7. Prilog

Ugovor „Oprema za merenje protoka na brani HE Đerdap 2“, zavodni broj kod naručioca posla JP Elektroprivreda Srbije Beograd je 01.01.-10816/18-2019 од 29.07.2019. godine, koji je Institut „Jaroslav Černi“ ugovorio sa EPS, zavodni broj Instituta je 31/19/73/02 od 26.07.2019, sa potvrđama uplata.

На основу *Правилника о стицању истраживачких и научних звања* („Сл. Гласник, 159/2020“) и *Прилога 2: Разврставање и начин навођења научноистраживачких резултата*, даје се

МИШЉЕЊЕ **о техничком решењу**

Назив техничког решења: **Систем за мерење протока на улазима у цевне турбине на бази електромагнетних сензора брзине**

Аутори: проф. др Душан Продановић, дипл. грађ. инж., Универзитет у Београду - Грађевински факултет
доц. др Дамјан Иветић, маст. грађ. инж., Универзитет у Београду - Грађевински факултет
др Никола Миливојевић, дипл. маш. инж., Институт за водопривреду Јарослав Черни
Предраг Војт, дипл. грађ. инж., Институт за водопривреду Јарослав Черни
Миле Цвитковац, дипл. ел. инж., Свет Инструмената

Година: комплетирано решење 2020.

Пријављена категорија: **M82 - Ново техничко решење (метода) примењено на националном нивоу**

Прегледом свих приложених доказа сам утврдио да:

Обавезни показатељи:	
1. Решење поседује стручну компоненту целокупног и самосталног резултата	Да
2. Решење има оригинални научно-истраживачки допринос	Да
3. Решење поседује уредан технички елаборат – опис техничког решења/ техничке карактеристике, односно техничку документацију, са листом раније прихваћених ТР за сваког од аутора појединачно (за генске пробе доказ да је проба регистрована на сајту NCBI)	Да
4. Наведен је корисник решења (наручилац) – за кога је ТР рађено (правно лице или грана привреде)	Да
4.1. Година када је ТР комплетирано	2020
4.2. Приложен је доказ о комерцијализацији резултата (коришћењу) – када је почело да се примењује и од кога (потврда установе/компаније која га користи); за техничка софтверска и хардверска решења рад из часописа адекватне категорије	Да
5. Област и научна дисциплина на коју се ТР односи:	Техн.-технолошке науке, Уређење, заштита и коришћење вода, земљ. и ваздуха
6. Описан је проблем који се ТР решава:	Да
6.1. Дато је стање решености тог проблема у свету	Да
6.2. Дато је стање решености тог проблема код нас	Да
Допунски показатељи:	
7. Део је међународног пројекта	Не
8. Публикована је као интернет публикација или објављена на интернету	Не
9. Публиковано у часопису са SCI листе	Не
10. Решење је рађено у оквиру пројекта Министарства просвете, науке и т.р.	Не

Дато техничко решење:

1. Испуњава услове за признавање пријављене категорије	Да
2. Испуњава услове за признавање категорије, различите од пријављене.	-
3. Не испуњава услове за признавање техничких решења	-

КОМЕНТАР/РЕЦЕНЗИЈА:

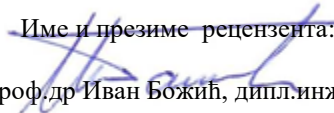
Мерење протока на улазу у цевну турбину великих хидроелектрана није адекватно обрађено постојећим важећим стандардима. Предмет предложеног техничког решења је систем којим се мери распоред све три компоненте брзина у контролном пресеку, без значајнијег утицаја на рад саме турбине. Пратећи софтвер омогућава контролу добијених мерења, просторну интерполацију, прорачун протока као и процену постигнуте мерне несигурности. Систем је успешно испоручен ЕПС-у и примењен на две турбине ХЕ „Ђердапа 2“, о чему постоји Уговор, као и Записници о квалитативном и квантитативном пријему добара. Аутори нове методе под називом „Систем за мерење протока на улазима у цевне турбине на бази електромагнетних сензора брзине“ су на јасан начин описали решење комплексног проблема мерења протока на цевним турбина, посебно истичући проблем мерења протока при косом дострујавању на ХЕ Ђердап 2.

Применом развијене методе добијени резултати неравномерног и неустаљеног просторног поља брзина омогућују квалитетније интеграљење профила проточних брзина по мерном пресеку у циљу прецизнијег одређивања протока на улазу турбину. Анализом добијеног протока могуће је проверити и по потреби предефинисати и побољшати коефицијенте постојећих протокомера заснованим на Winter-Kennedy методи, који се користе у континуалном мониторингу рада хидроагрегата.

Наведено техничко решење је по први пут примењено у Републици Србији, на комплексном хидроенергетском постројењу ХЕ Ђердап 2. Развијени метод представља техничко решење које се уз адекватна прилагођења може применити и на осталим хидроелектранама у електроенергетском систему Републике Србије и сличним постројењима других електропривреда.

На основу увида у предлог нове методе и остварене резултате, а у складу са одредбама Правилника о стицању истраживачких и научних звања („Сл. Гласник, 159/2020“) мишљења сам да она представља оригинални научноистраживачки и стручни допринос, те **предлажем да се нова метода примењена на националном нивоу (M82) под називом „Систем за мерење протока на улазима у цевне турбине на бази електромагнетних сензора брзине ” прихвати као ново техничко решење.**

Место и датум:
Београд, 11.10.2021.године

Име и презиме рецензента:

в.проф.др Иван Божић, дипл.инж.маш.

На основу Правилника о стицању истраживачких и научних звања („Сл. Гласник, 159/2020“) и Прилога 2: Разврставање и начин навођења научноистраживачких резултата, даје се

МИШЉЕЊЕ

о техничком решењу

Назив техничког решења: **Систем за мерење протока на улазима у цевне турбине на бази електромагнетних сензора брзине**

Аутори:

- проф . др Душан Продановић, дипл. грађ. инж., Универзитет у Београду - Грађевински факултет
- доц . др Дамјан Иветић, дипл. грађ. инж., Универзитет у Београду - Грађевински факултет
- др Никола Миливојевић, дипл. маш. инж., Институт за водопривреду Јарослав Черни
- Предраг Војт, дипл. маш. инж., Институт за водопривреду Јарослав Черни
- Миле Цвитковац, дипл. ел. инж., Свет Инструмената

Година: комплетирано решење 2020.

Пријављена категорија: **M82 - Ново техничко решење (метода) примењено на националном нивоу**

Прегледом свих приложених доказа сам утврдио да:

Обавезни показатељи:	
1. Решење поседује стручну компоненту целокупног и самосталног резултата	Да
2. Решење има оригинални научно-истраживачки допринос	Да
3. Решење поседује уредан технички елаборат – опис техничког решења/ техничке карактеристике, односно техничку документацију, са листом раније прихваћених ТР за сваког од аутора појединачно (за генске пробе доказ да је проба регистрована на сајту NCBI)	Да
4. Наведен је корисник решења (наручилац) – за кога је ТР рађено (правно лице или грана привреде)	Да
4.1. Година када је ТР комплетирано	2020
4.2. Приложен је доказ о комерцијализацији резултата (коришћењу) – када је почело да се примењује и од кога (потврда установе/компаније која га користи); за техничка софтверска и хардверска решења рад из часописа адекватне категорије	Да
5. Област и научна дисциплина на коју се ТР односи:	Техн.-технолошке науке, Уређење, заштита и коришћење вода, земљ. и ваздуха
6. Описан је проблем који се ТР решава:	Да
6.1. Дато је стање решености тог проблема у свету	Да
6.2. Дато је стање решености тог проблема код нас	Да
Допунски показатељи:	
7. Део је међународног пројекта	Не
8. Публикована је као интернет публикација или објављена на интернету	Не
9. Публиковано у часопису са SCI листе	Не
10. Решење је рађено у оквиру пројекта Министарства просвете, науке и т.р.	Не

Дато техничко решење:

1. Испуњава услове за признавање пријављене категорије	Да
2. Испуњава услове за признавање категорије, различите од пријављене.	/
3. Не испуњава услове за признавање техничких решења	/

КОМЕНТАР/РЕЦЕНЗИЈА:

Предложено техничко решење је иновативни систем за одређивање протока на основу мерења распореда брзина у пресеку испред улазне решетке турбине. Решење омогућава несметан рад турбине током мерења. Поред хардвера, мерних сонди, развијени су и софтвери за контролу мерног система, прикупљање података, преглед, обраду, прорачун протока као и мерне несигурности. Предложено техничко решење је успешно примењено на турбинама ХЕ „Бердап 2“, приложени су Уговор, Анекс уговора, потврде о испоруци система као и потврде о плаћању.

Место и датум:
Београд, 7.10.2021. године

Име и презиме рецензента: