

Određivanje protoka na prilazima cevni turbina uz pomoć EM senzora brzine: Određivanje nesigurnosti izmerenog protoka

Damjan Ivetić¹
Dušan Prodanović²
Predrag Vojt³

APSTRAKT: Određivanje hidrauličke efikasnosti turbina se zasniva na pouzdanom poznavanju nekoliko osnovnih hidrauličkih, mašinskih i elektro veličina. Iz ove grupe, protok vode kroz turbinu je veličina koju je najteže pouzdano izmeriti. Merna nesigurnost je uobičajeno veća nego kod merenja ostalih osnovnih veličina. Pored toga, i sama procedura određivanja merne nesigurnosti je složenija, prvenstveno usled kompleksnosti samog mernog procesa ali i zbog specifičnosti hidrauličkih uslova na mernim mestima. U okviru plana revitalizacije cevni agregata na HE Đerdap 2, sa ciljem bolje procene hidrauličke efikasnosti turbina, projektovan je i primenjen inovativni sistem za posredno merenje protoka. Merni sistem koristi metodu Brzina – Proticajni presek i može se postaviti na ulazu u turbinu, uzvodno od grube rešetke. Pomoću 15 komada 3D elektromagnetnih senzora brzine, horizontalno postavljenih na čelični ram, koji se podiže po celoj visini proticajnog preseka, snima se polje brzina. Pored EM senzora, na ram su postavljena i dva redundantna akustična Dopler senzora, merači položaja rama i dubine vode. Sva merenja su sinhronizovana sa lokalnim SCADA sistemom, tako da se u konačnom obračunu protoka, koriste i odgovarajući podaci o radu turbine. Imajući u vidu specifičnosti dva moguća režima rada tokom merenja (inkrementalni i kontinualni), samog mernog sistema sa novorazvijenim EM sensorima, kao i hidrauličkih uslova (koso dostrujavanje), razvijena je posebna procedura za procenu nesigurnosti izmerenog protoka. Analizirani su doprinosi svih uticajnih veličina na samo merenje kao i na postupak interpolacije u toku obračuna protoka. U ovom radu je predstavljena navedena procedura i detaljno su opisane komponente merne nesigurnosti koje utiču na konačnu nesigurnost izmerenog protoka. Takođe, prikazani su rezultati primene na delu dosadašnjih merenja na agregatima HE Đerdap 2.

Ključne reči: Merna nesigurnost, Merenja protoka, Merenje brzine tečenja, Merni sistemi, Elektromagnetni senzori, Hidroelektrane

Discharge measurements at the tubular turbine intakes with EM current meters: Assessment of the discharge measurement uncertainty

ABSTRACT: The assessment of the turbine hydraulic efficiency is based upon the reliable information on several hydraulic, mechanical and electric quantities. Out of these, discharge, or the flow rate, is the quantity which is most difficult to accurately measure. Measurement uncertainty is typically higher than in rest of the cases. Furthermore, the procedure for the measurement uncertainty assessment is more complex, mainly due to the complexity of the measurement process and the specific flow conditions at the measurement site. As a part of the tubular turbine revitalization plans for the HPP Iron Gate 2, with a goal of improved assessment of the turbine hydraulic efficiency, a novel discharge measurement system was designed and applied. The system is using the Velocity – Area approach for the discharge measurements, and can be installed at the turbine intakes, upstream of the trash rack. The core of the measurement system are 15 novel 3D electromagnetic velocity meters, mounted on steel frame spanning across the width of the flow area. The steel frame is traversed across the height of the flow area to allow for the velocity field mapping using the EM sensors and 2 redundant acoustic Doppler velocimeters. The position of the frame is monitored via 2 position transducers, while 2 pressure transducers are used for the water depth measurements. The measurements are synchronized with local SCADA system, thus in the post processing – and in the final discharge evaluation, additional turbine data are used. Two operating modes of the system can be used: incremental and continuous. Due to the specifics

¹Dr Damjan Ivetić, Građevinski fakultet Beograd, docent, divetic@grf.bg.ac.rs

²Dr Dušan Prodanović, Građevinski fakultet Beograd, redovni profesor, dprodanovic@grf.bg.ac.rs

³Predrag Vojt, Institut za vodoprivredu “Jaroslav Černi”, samostalni istraživač, predrag.vojt@jcerni.rs

of the operating modes, actual measurement system with novel EM sensors, and hydraulic conditions, a detailed measurement uncertainty assessment was performed. Contributions from each uncertainty component and the procedure for the interpolation of the measured velocities, on the measurement results, are incorporated. In this paper, the above-mentioned procedure is presented, while the components of the final discharge measurement uncertainty are described in detail. Additionally, the results of the procedure application on the conducted measurements, are shown.

Keywords: Measurement uncertainty, Discharge measurements, Velocity measurements, Measurement systems, Electromagnetic sensors, Hydro power plants

1 Uvod

Na deonici reke Dunav, u zoni zajedničkog interesa Republike Srbije i Republike Rumunije, nalaze se dve najveće hidroelektrane (HE) na teritoriji Republike Srbije: HE Đerdap 1 i HE Đerdap 2. Ovi sistemi predstavljaju ključne elemente elektroenergetskog sistema Srbije, kako zbog svojih značajnih doprinosa u ukupnoj proizvodnji električne energije, tako i zbog mogućnosti da se relativno brzo adaptiraju na varijacije u potrošnji. Procenjuje se da hidroenergetski sektor doprinosi sa 30% u ukupnoj proizvodnji električne energije u Srbiji (www.eps.rs).

U sklopu plana revitalizacije cevnih agregata na HE Đerdap 2, sa osnovnim ciljem pouzdane procene trenutne hidrauličke efikasnosti, kao i efikasnosti nakon revitalizacije, projektovan je i primenjen inovativni sistem za posrednje merenje protoka (IJČ, GRF i SI, 2020). Procena hidrauličke efikasnosti agregata, se zasniva na pouzdanom merenju više hidrauličkih, mašinskih i elektro veličina. Upravo merenje protoka je najzahtevniji zadatak, budući da je merna nesigurnost obično veća nego kod ostalih veličina, a i sam proces merenja je složen (Adamkowski i sar., 2019). Takođe, usled složenosti procesa merenja i određivanje same merne nesigurnosti je komplikovan zadatak. U opštem slučaju, za projektovanje mernog sistema za merenje protoka na agregatima HE, i primenu istih za merenja, na raspoložanju su nekoliko pravilnika odnosno standarda (IEC 60041, 1999; PTC 18, 2002). Iako su cevne turbine, ili Kaplanove turbine za male padove, u relativno raspostranjenoj upotrebi, ne postoje jasne preporuke za merenja protoka u ovim slučajevima (Almquist i sar., 2011). Pored toga, na ulazu u HE Đerdap 2 se javlja fenomen dostrujavanja vode pod značajnim uglom u horizontalnoj ravni (Prodanović i sar., 2011), čime je polje raspoloživih rešenja, za merenje protoka, bilo dodatno suženo.

Kako bi se ispunili standardima zahtevani uslovi, ali i omogućilo pouzdano merenje u specifičnim hidrauličkim uslovima na ulazima u turbine HE Đerdap 2, razvijen je inovativni sistem za merenje protoka koji se zasniva na primeni metode Brzina-Proticajni presek (Ivetić i sar., 2021). Za potrebe ovog sistema, projektovane su nove 3D EM sonde, koje su praktično funkcionisale kao EM (hidrometrijska) krila. Petnaest EM sondi 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 (Lohrmann, 1994), prikupljani su podaci pomoću kojih je određena srednja profilska brzina i površina proticajnog preseka.

Budući da je sistem inovativnog karaktera, posebno je razvijena procedura za procenu merne nesigurnosti protoka, 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. Takođe, prikazani su i rezultati primene ove procedure na izmerenim podacima, sa posebnim osvrtom na poređenje vrednosti merne nesigurnosti prilikom upotrebe dva različita režima rada.

2 Metodologija

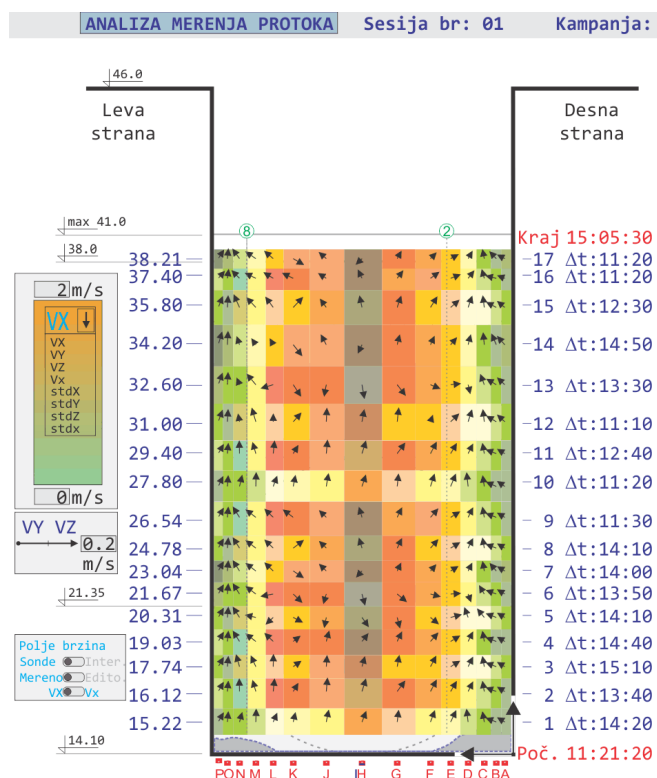
2.1 Određivanje protoka na osnovu izmerenih podataka

Novorazvijeni sistem za merenje protoka je koncipiran tako da se postavlja na prilaze/ulaze u turbine HE Đerdap 2, uzvodno od grube rešetke. Kruti čelični ram, opremljen mernom opremom, se

kranskom dizalicom prvo spušta na dno proticajnog preseka, pa se zatim u okviru jedne merne sesije (merenje jednog protoka) podiže do površine vode. Tokom rada, merna oprema kontinualno radi i može da beleži podatke na svaku sekundu (IJČ, GRF i SI, 2020).

Korišćena su dva režima rada: 1.) Inkrementalni i 2.) Kontinualni. U inkrementalnom režimu rada, čelični ram se podiže po visini preseka između „profila“, na jednakim rastojanjima najčešće od 1-2 m. U svakom profilu, ram miruje barem 10 minuta. Koristeći ovaj režim rada, merenje jednog protoka traje 2 – 4 sata. U kontinualnom režimu, ram se podiže konstantnom, minimalnom brzinom od 5 cm/s po celoj visini proticajnog preseka. U ovom režimu, merenje jednog protoka traje 7 - 10 minuta. Treba napomenuti da je tokom oba režima rada, potrebno obezbediti stabilne hidrauličke uslove na analiziranoj turbini kao i na susednim (Ivetić i sar., 2021).

Kako se merenje protoka zasniva na merenjima brzina u većem broju tačaka i njihovom integracijom po proticajnom preseku, tako i proračun ukupne nesigurnosti izmerenog protoka obuhvata uticaje svakog pojedinog merenja koje učestvuje u konačnoj vrednosti protoka. Uticaj merenja brzina, određenom EM sondom (npr G pozicije) u određenom profilu (npr na koti 14,90 m) je uračunat u mernoj nesigurnosti protoka kroz pripadajuću proticajnu površ $A_{m,n}$. Pripadajuća površ za svaku sondu m , u svakom profilu n , je definisana kao pravougaonik dimenzija $w_m * d_n$, gde je $m = 1:N_V$ (broj elektromagnetnih sonda na ramu = broj mernih vertikala) a $n = 1:N_H$ (broj horizontalnih profila u kojima je vršeno merenje). Svaka m -ta sonda ima pripadajuće w_m definisano susednim uređajima (polovina odstojanja između dve susedne sonde) i/ili susednom granicom (odstojanje do zida za sonde uz Srpsku i Rumunsku stranu). Za svaki n -ti profil definiše se vertikalno d_n ograničeno polovinom odstojanja do prethodnog ili narednog profila i/ili dna odnosno površine vode (za prvi i poslednji profil). Na slici 1 prikazan je primer podele pripadajućih površi.



Slika 1. Prikaz pripadajućih površina $A_{m,n}$ korišćenih u proračunu ukupne merne nesigurnosti.

Figure 1. Probe sub-areas $A_{m,n}$ used in the assessment of the combined measurement uncertainty.

Za potrebe proračuna merne nesigurnosti protoka, pretpostaviće se da se ukupan protok računa kao suma protoka po svim pripadajućim površinama:

$$Q = \sum_{m=1}^{N_V} \sum_{n=1}^{N_H} w_m \cdot d_n \cdot V_{m,n} = \sum_{m=1}^{N_V} \sum_{n=1}^{N_H} A_{m,n} \cdot V_{m,n} \quad (1)$$

Treba napomenuti da srednja profilska brzina $V_{m,n}$, nije izmerena brzina već osrednjena brzina po pripadajućoj površini, nakon izvršene rasterizacije, interpolacije i ekstrapolacije.

Poređenja radi, konačna vrednost izmerenog protoka se zapravo izračunava integracijom dosta detaljnijeg rasterizovanog polja brzina preko proticajnog preseka:

$$Q = \sum_{i=1}^{N_{V,rast}} \sum_{j=1}^{N_{H,rast}} w_i \cdot d_j \cdot V_{i,j} = \sum_{i=1}^{N_{V,rast}} \sum_{j=1}^{N_{H,rast}} A_{i,j} \cdot V_{i,j} \quad (2)$$

gde su w_i i d_j širina i visina elementarnog delića proticajnog preseka, $V_{i,j}$ srednja profilska protokometrijska komponenta brzine po površini $A_{i,j}$ elementarnog delića, a N_{rast} broj elementarnih delića ukupnog proticajnog preseka A . Praktično za svaku površinu $A_{m,n}$, moguće je definisati skup rasterizovanih površina $A_{i,j}$, koje joj pripadaju. Imajući u vidu, da je usvojena uniformna veličina elementarnih delića ($w_i = d_j = 5$ cm), izraz za proračun protoka se može jednostavnije predstaviti:

$$Q = A \frac{\sum_{i=1}^{N_{V,rast}} \sum_{j=1}^{N_{H,rast}} V_{i,j}}{N_{V,rast} N_{H,rast}} \quad (3)$$

2.2 Određivanje ukupne merne nesigurnosti protoka

Jedna od specifičnosti metodologije merenja protoka na HE Đerdap 2, gde se uz pomoć rama sa $N_V = 15$ EM sondi (N_V broj mernih vertikalna koji odgovara broju EM sondi instaliranih na ram), meri brzina u određenom broju horizontalnih profila (broj profila N_H između 15 i 20), se ogleda u činjenici da su 3D EM sonde korišćene praktično kao hidrometrijska krila. Tako su 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). Takođe, nezaobilazna literatura u analizi merne nesigurnosti predstavlja i dokument GUM (2008) (eng. Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement) izdat od strane međunarodnog organizacije za mere i težine (eng. International Bureau of Weights and Measures).

Budući da se usvojena metodologija za merenje protoka na agregatu ipak razlikuje od standardnih procedura za merenje protoka u otvorenim tokovima, neophodno je bilo nadograditi predloženu metodologiju kako bi se obuhvatile sve specifičnosti ovog kompleksnog zadatka.

Osnovni obrazac za proračun kombinovane merne nesigurnosti protoka $u(Q)$ se koristi u sledećem obliku:

$$u(Q) = \sqrt{u_s(Q)^2 + u_{var}(Q)^2 + u_{stat}(Q)^2} \quad (4)$$

gde je $u_s(Q)$ sistematska nesigurnost u merenju protoka (opisana u poglavlju 2.3.), $u_{var}(Q)$ merna nesigurnost usled varijabilnosti protoka tokom trajanja jedne merne sesije na analiziranom agregatu (poglavlje 2.4.) a $u_{stat}(Q)$ statistička merna nesigurnost u merenju protoka (poglavlje 2.5.)

Statistička merna nesigurnost se dodeljuje svakoj površini $A_{m,n}$ (Herschy, 1995), pa se zapravo osnovni obrazac može predstaviti i na drugačiji način:

$$u(Q) = \sqrt{u_s(Q)^2 + u_{var}(Q)^2 + \frac{\sum_{m=1}^{N_V} \sum_{n=1}^{N_H} [(w_m d_n V_{m,n})^2 \cdot (u(w_m)^2 + u(d_n)^2 + u(V_{m,n})^2)]}{\underbrace{[\sum_{m=1}^{N_V} \sum_{n=1}^{N_H} (w_m d_n V_{m,n})]^2}_{u_{stat}(Q)^2}}}$$
 (5)

gde je sad $u(w_m)$ statistička merna nesigurnost u merenju širine m -te pripadajuće proticajne površine (poglavlje 2.5.1.), $u(d_n)$ statistička merna nesigurnost u merenju visine n -te pripadajuće proticajne površine (poglavlje 2.5.2.) a $u(V_{m,n})$ statistička merna nesigurnost u merenju srednje profilske brzine i -te pripadajuće proticajne površine (poglavlje 2.5.3.)

2.3 Sistematska nesigurnost izmerenog protoka

Sistematska nesigurnost izmerenog protoka, kao posledica sistematskog odstupanja odnosno greške koje ima deterministički karakter, se procenjuje prema sledećem obrazcu:

$$u_s(Q) = \sqrt{u_s(w)^2 + u_s(d)^2 + u_s(V)^2}$$
 (6)

gde je $u_s(w)$ sistematska nesigurnost u merenju širine proticajnog preseka, $u_s(d)$ sistematska nesigurnost u merenju visine proticajnog preseka a $u_s(V)$ sistematska nesigurnost usled uticaja ekstrapolacije rezultata ka površini vode i čvrstim konturama.

2.3.1 Sistematska nesigurnost u merenju širine proticajnog preseka

Sistematska nesigurnost u merenju širine proticajnog preseka se može zanemariti imajući u vidu da se radi o konstatnom i fiksirnom odstojanju između vertikalnih razdelnih zidova sa Srpske i Rumunske strane svakog agregata. Ova pretpostavka se može potvrditi činjenicom da se čelični nosač mernog sistema bez problema kreće duž vertikalnih niša izvedenih unutar razdelnih zidova. Međutim, zbog sigurnosti, usvojena je sistemska nesigurnost od 1 cm (na 14.5 m), koja procentualno iznosi: $u_s(w) = 0,07\%$.

2.3.2 Sistematska nesigurnost u merenju visine proticajnog preseka

Sistematska nesigurnost u merenju visine proticajnog preseka je minimizovana kalibracijom senzora pritiska koji se koriste za merenje dubine, kao i preciznošću izrade enkodera za merenje relativnog, odnosno apsolutnog položaja rama. Uticaj atmosferskog pritiska je anuliran uz pomoć barometra u suvom, dok se može pretpostaviti da će temperaturne razlike uticati na rezultat do 1 cm, odnosno do $u_s(d) = 0,05\%$.

2.3.3 Sistematska nesigurnost usled uticaja ekstrapolacije brzina

Brzine u većem delu poprečnog preseka (oko 89%) se mere kalibrisanim EM sondama. Međutim, brzine u manjem delu preseka, uz dno, zidove i pri površini, brzine nije moguće izmeriti. Imajući u vidu da se raspored brzina u ne-merenim zonama ekstrapoluje teorijskim obrascima koji važe u graničnim zonama proticajnog preseka, očekuje se određen uticaj nepoklapanja teorijskih obrazaca sa stvarnim rasporedom na mernu nesigurnost. U literaturi se predlaže da se u rečnim tokovima pri određivanju protoka merenjem brzina pomoću hidrometrijskih krila u 2 ili 3 tačke u vertikali, u relativno malom broju preseka, usvoji vrednost sistematske nesigurnosti od 0,5% (Sauer & Meyer, 1992). Imajući u vidu da se ovde koristi 5 do 10 puta više tačaka po jednom profilu i veći broj profila po visini, ekstrapolacija protoka se vrši u relativno značajno manjem delu proticajnog preseka (oko 11%) kroz koju protiče još manji deo protoka, usvaja se vrednost od $u_s(V) = 0,1\%$.

2.4 Nesigurnost usled varijabilnosti izmerenog protoka tokom trajanja jedne merne sesije

Prilikom upotrebe inkrementalnog režima rada, usvojeno je trajanje profilisanja (merenja) u svakom od profila od minimum 10 minuta. Imajući u vidu da je prilikom merenja jednog protoka, potrebno izmeriti brzine u barem 15 profila, može se proceniti prosečno vreme trajanje protoka od 3 časa. Iako je procedurom definisano da se protok kroz agregat održava konstantnim tokom merenja, u realnim uslovima će se javiti određene oscilacije protoka. Navedene oscilacije se verodostojno mogu pratiti pomoću pokazivanja protoka Q_{W-K} pomoću Vinter-Kenedi metode, prikupljenih preko lokalnog SKADA sistema. U okviru alata za analizu rezultata merenja, izmerene vrednosti se upravo i normalizuju prema usvojenom referentnom Q_{W-K} , kako bi se minimizovao uticaj varijabilnosti protoka tokom merne sesije. Posredno, ovde je uvedena pretpostavka o linearnosti rasporeda brzina, odnosno linearnoj promeni brzine u zavisnosti od protoka.

U opštem slučaju ova pretpostavka ne može potpuno biti zadovoljena, pa je za očekivati je da će u konačnoj izmerenoj vrednosti protoka, jedan deo merne nesigurnosti poticati od efekta varijabilnosti protoka. U okviru alata za analizu merenja, definišu se pomoćne vrednosti $\overline{Q_{W-K_n}}$ kao protoci osrednjeni po profilima (odnosno tokom merenja u jednom profilu). Da bi se procenio uticaj varijabilnosti protoka, potrebno je definisati referentnu vrednost protoka $\overline{Q_{W-K_{ref}'}}$, tokom merne sesije (Slika 2). Koristeći navedene vrednosti, moguće je definisati meru za varijabilnost protoka pomoću standardne devijacije oko referentne vrednosti protoka:

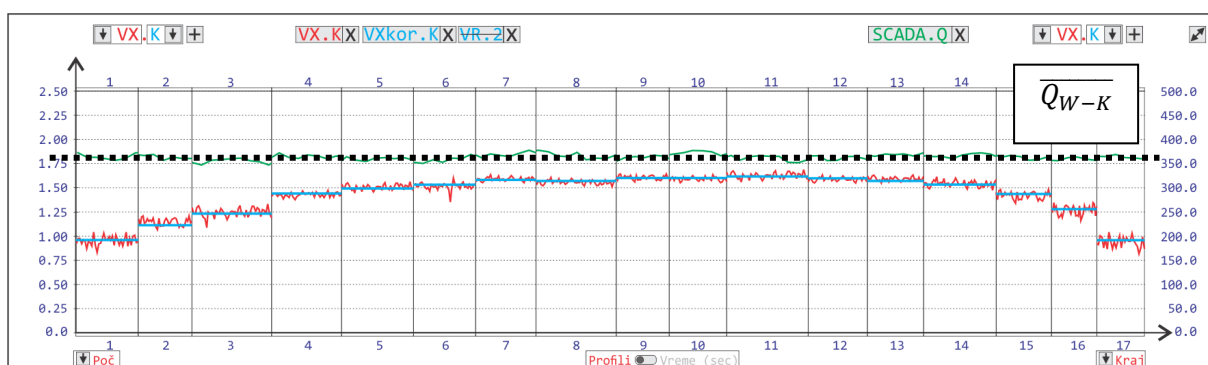
$$\sigma_{Q_{W-K}} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{N_H} (\overline{Q_{W-K_n}} - \overline{Q_{W-K_{ref}'}})^2}{N_H - 1}} \quad (7)$$

Takođe, potrebno je odrediti ukupnu srednju vrednost protoka Q_{W-K} , tokom merne sesije, odnosno $\overline{Q_{W-K}}$. Imajući u vidu činjenicu da je postupkom normalizacije vrednosti minimizovan ovaj uticaj, merna nesigurnost usled varijabilnosti protoka se računa pomoću obrazca:

$$u_{var}(Q) = \frac{\sigma_{Q_{W-K}} \cdot p_1}{\overline{Q_{W-K}}} \cdot 100 \quad (8)$$

gde je p_1 koeficijent proporcionalnosti, čija se vrednost usvaja kao: $p_1 = 0,4$.

U slučaju da se za normalizaciju polja brzina, umesto Q_{W-K} , koriste izmerena snaga P ili neto pad H_{neto} , za proračun uticaja varijabilnosti se uzimaju vrednosti usvojene referentne veličine.



Slika 2. Prikaz promene protoka Q_{W-K} , kao i osrednjene vrednosti $\overline{Q_{W-K}}$ tokom merne sesije.

Figure 2. Probe sub-areas $A_{m,n}$ used in the assessment of the combined measurement uncertainty.

2.5 Statistička nesigurnost izmernog protoka

Poslednji element u proračunu kombinovane merne nesigurnosti, predstavljaju statističke nesigurnosti. Statističke nesigurnosti se javljaju uglavnom usled promenljivosti uslova merenja ili nesavršenosti merne opreme, odnosno parametara na koje korisnik ne može da utiče. Iz obrazca (5) se može izvući izraz za statističku mernu nesigurnost protoka:

$$u_{stat}(Q) = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^{N_V} \sum_{n=1}^{N_H} [(w_m d_n V_{m,n})^2 \cdot (u(w_m)^2 + u(d_n)^2 + u(V_{m,n})^2)]}{[\sum_{m=1}^{N_V} \sum_{n=1}^{N_H} (w_m d_n V_{m,n})]^2}} \quad (9)$$

2.5.1 Statistička merna nesigurnost širine pripadajućeg proticajnog preseka

Budući da je ova vrednost konstantna po dubini proticajnog preseka, usvaja se da je statistička merna nesigurnost u određivanju širine pripadajućeg proticajnog preseka zanemarljiva: $u(w_m) \approx 0$.

2.5.2 Statistička merna nesigurnost visine pripadajućeg proticajnog preseka

Za razliku od širine, u slučaju merenja visine pripadajućeg proticajnog preseka, izvedene od ukupne dubine vode, jasno se može identifikovati pojava statističke merne nesigurnosti. Na proračun visine pripadajućeg proticajnog preseka, će pored merenja dubine, uticati i merenje položaja pomoću enkodera sa sajnom. Može se pretpostaviti da će na merenje visine proticajnog preseka poslednjeg profila (najvišeg), dominantan uticaj vršiti merenje dubine H , dok će na sve profile ispod dominantan uticaj vršiti merenje položaja rama preko enkodera.

Stoga će se statistička merna nesigurnost, za poslednji profil ($n = N_H$) računati pomoću srednje vrednosti dubine vode tokom merne sesije H , kao i standardne devijacije σ_H . Međutim, treba napomenuti da je sistem opremljen sa dva nezavisna nivomera, preko kojih se mere dve dubine H_{srb} i H_{rum} (sa Srpske i Rumunske strane polja). Tako se mogu odrediti i dve vrednosti standardne devijacije $\sigma_{H_{srb}}$ i $\sigma_{H_{rum}}$. Integralne vrednosti se dobijaju osrednjavanjem:

$$H = \frac{H_{srb} + H_{rum}}{2} \quad (10)$$

$$\sigma_H = \frac{\sigma_{H_{srb}} + \sigma_{H_{rum}}}{2}$$

Vrednost merne nesigurnosti za poslednji profil ($n = N_H$) se računa preko sledećeg obrazca:

$$u(d_n) = \frac{\sigma_H}{H} \cdot 100 \quad (11)$$

Za sve profile, izuzev poslednjeg $n < N_H$, usvojiće se da je merenje pod dominantnim uticajem statističke greške enkodera od $e_{enk} = 0,001$ m. Vrednost nesigurnosti se dobija na sledeći način:

$$u(d_n) = \frac{e_{enk}}{d_n} \cdot 100 \quad (12)$$

2.5.3 Statistička merna nesigurnost srednje profilske brzine pripadajućeg proticajnog preseka.

Statistička merna nesigurnost u određivanju srednje profilske brzine $V_{m,n}$ pripadajućeg proticajnog preseka $A_{m,n}$, sadrži pet komponenata i računa se prema sledećem obrazcu:

$$u(V_{m,n}) = \sqrt{\frac{u_V(V_{m,n})^2 + u_H(V_{m,n})^2 + u_\alpha(V_{m,n})^2}{1 + \frac{1}{N_V}(u_{EM}(V_{m,n})^2) + \frac{1}{N_V N_H}(u_{pulz}(V_{m,n})^2)}(1 + \bar{p})} \quad (13)$$

Merna nesigurnost usled upotrebe konačnog broja tačaka u vertikali - $u_V(V_{m,n})$. Tokom određivanja konačne vrednosti protoka, raspored protokometrijske komponente brzine između tačaka u kojima su izvršena merenja se dobijaju bilinearnom interpolacijom. Na ovaj način uvodi se merna nesigurnost u određenu srednju profilsku brzinu pripadajuće površine koja se može definisati pomoću sledećeg obrazca (Sauer & Meyer, 1992):

$$u_V(V_{m,n}) = \frac{u_{EM}(V_{m,n})\sqrt{1 + (N_H - 1)\bar{p}}}{\sqrt{N_H}} \quad (14)$$

Gde je \bar{p} prosečni korelacioni koeficijent za proticajni presek. U literaturi (Sauer & Meyer, 1992) se predlaže vrednost $\bar{p} = 0,04$. Međutim, za strujno polje ispred agregata brane Đerdap 2, može se pretpostaviti 2,5 puta veća vrednost korelacionog koeficijenta, prvenstveno zbog činjenice da je sam raspored brzina pod uticajem nizvodne rešetke, bočnih razdeonih zidova kao i specifičnog kosog dostrujavanja $\bar{p} = 0.1$. Treba napomenuti da se negde ova vrednost izdvaja kao zaseban član u proračunu kombinovane merne nesigurnosti (Herschky, 2002).

Za slučaj kontinualnog profilisanja polja brzina, bez zastajkivanja rama, usled relativno velike brzine rama kao i upotrebe filtera sa bazom od 30 s, potrebno je dodatno uvećati vrednost korelacionog koeficijenta na $\bar{p} = 1.0$.

Merna nesigurnost usled upotrebe konačnog broja tačaka u horizontali. Slično kao i za konačan broj tačaka u vertikali, može se definisati i komponenta merne nesigurnosti koja potiče od upotrebe konačnog broja tačaka u horizontali. Za prirodne rečne tokove, u literaturi se (ISO 748, Sauer & Meyer, 1992) preporučuje upotreba empirijskog obrazca. Međutim kako je ovde odnos širine toke w i dubine d veći od 10, a neretko i od 50, dok je ovde taj odnos približan 0,55. Imajući navedeno u vidu, ovde se usvaja obrazac sličan kao u prethodnom poglavlju:

$$u_H(V_{m,n}) = \frac{u_{EM}(V_{m,n})\sqrt{1 + (N_V - 1)\bar{p}}}{\sqrt{N_V}} \quad (15)$$

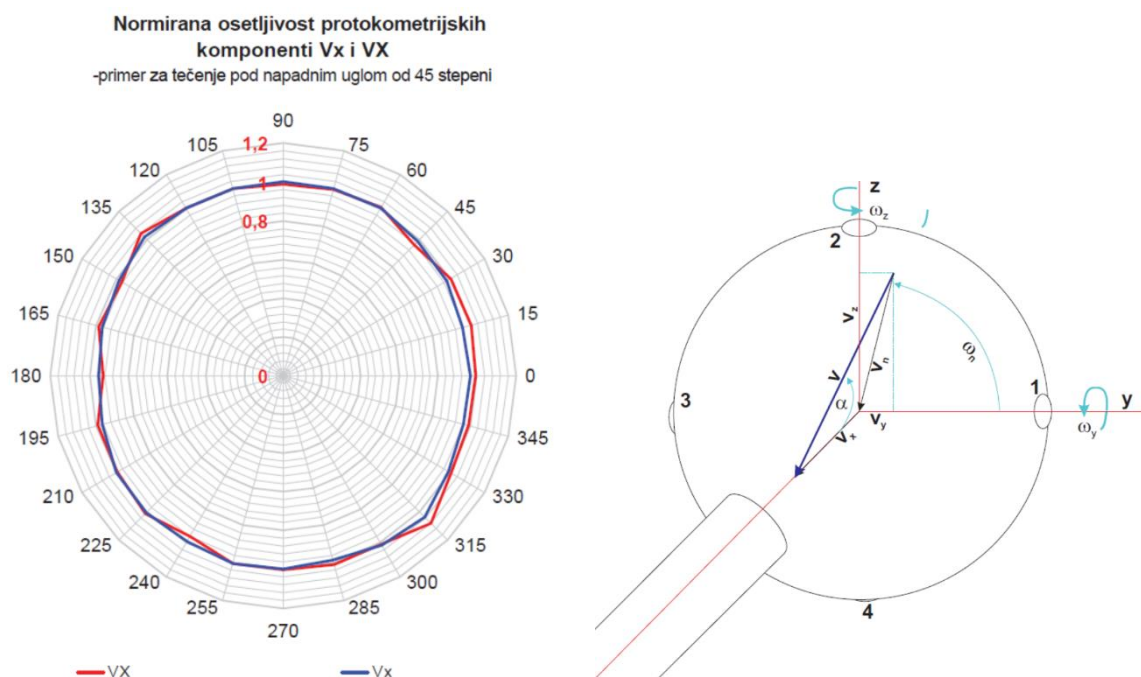
gde \bar{p} ima istu vrednost kao ranije, budući da se stepen korelacije po horizontalnoj osi proticajnog preseka približno isti kao i po vertikalnoj osi, usled uporedivih dimenzija širine i dubine preseka $\bar{p} = 0.1$, odnosno za slučaj kontinualnog profilisanja polja brzina, $\bar{p} = 1.0$.

Merna nesigurnost usled uticaja napadnog ugla vektora brzine. U svakoj mernoj tački, odnosno za svaku pripadajuću površinu, izmerene su sve tri komponente vektora brzine. Pomoću izmerenih vrednosti komponenata brzina, moguće je definisati napadni ugao vektora brzine $\alpha_{m,n}$. Imajući u vidu da je fabrička tačnost EM sonde, odnosno merna nesigurnost, deklarirana za napadne uglove između -15° i 15° , u slučaju da se jave napadni uglovi van ovog opsega, potrebno je uračunati odgovarajuću mernu nesigurnost.

Merna nesigurnost se može dobiti iz rezultata kalibracionih testiranja i tehničke dokumentacije, tokom kojih je ispitana uglovna osetljivost za širi opseg uglova (Slika 3). Aproksimacijom izmerenih odstupanja, kvadratnom funkcijom, vrednost merne nesigurnosti se određuje:

$$u_\alpha(V_{m,n,mer}) = 6 \cdot 10^{-5} \alpha_{m,n}^2 + 0.0133 \cdot \alpha_{m,n} - 0.2121 \quad (15)$$

gde je $V_{m,n,mer}$ izmerena vrednost brzine (ne osrednjena po pripadajućoj površini), a $\alpha_{m,n}$ ugao u stepenima.



Slika 3. Levo) Primer rezultata kalibracionog ispitivanja uglovne osetljivosti VX komponente brzine izmerene pomoću EM sonde, Desno) Shematski prikaz „glave“ EM sonde

Figure 3. Left) An example of angular sensitivity calibration testing results for the VX velocity component measured with EM probe, Right) Scheme of the „head“ of the EM probe

Fabrička merna nesigurnost. Deklarisana tačnost EM sonde se može predstaviti kao fabrička merna nesigurnost uređaja, za potrebe proračuna kombinovane merne nesigurnosti ukupnog protoka. Deklarisana tačnost uređaja je definisana u tehničkoj dokumentaciji i iznosi 1%, odnosno odgovarajuća fabrička merna nesigurnost se definiše na isti način i konstantna je za sve uređaje $u_{EM}(V_{m,n}) = 1\%$.

Imajući u vidu da je pretpostavljen stohastičan karakter ove komponente merne nesigurnosti, svaki uređaj greši „na svoju stranu“, što znači da upotrebom više različitih uređaja sam uticaj greške se smanjuje. Zbog toga se ova komponenta merne nesigurnosti deli sa kvadratnim korenom od ukupnog broja sonde na ramu N_V (13).

Merna nesigurnost usled pulzacija toka. Poseban doprinos mernoj nesigurnosti izmerene srednje profilne brzine za pripadajuću površinu, potiče od turbulentnih pulzacija u toku. Naime tokom merenja u svakom profilu, za svaki uređaj, pod uticajem jednog ili više turbulentnih vrtloga različitih veličina i perioda, dolazi do oscilacija izmerene protokometrijske komponente brzine. Da bi se procenila vrednost merne nesigurnosti, potrebno je kvantifikovati rasipanja merenja tokom perioda profilisanja (od minimum 10 minuta) za svaku od m EM sonde u svakom od n profila. Rasipanja se kvantifikuju preko standardne devijacije:

$$\sigma_{V_{m,n}} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{N_{mer,n}} (V_{m,n}^k - V_{m,n})^2}{N_{mer,n} - 1}} \quad (16)$$

gde je $N_{mer,n}$ broj zabeleženih merenja brzina u n -tom profilu, dok je $V_{m,n}^k$ brzina izmerena u k -tom trenutku. Merna nesigurnost usled pulzacija toka se usvaja da je jednaka standardnoj devijaciji:

$$u_{pulz}(V_{m,n}) = \frac{\sigma_{V_{m,n}}}{V} \cdot 100 \quad (17)$$

gde je V ukupna srednja brzina kroz proticajni presek. Budući da su pulzacije većim delom stohastičnog karaktera po prostoru, ukupan doprinos ove komponente merne nesigurnosti se deli sa kvadratnim korenom ukupnog broja mernih tačaka $N_V N_H$ (13). Za potrebe proračuna odgovarajuće merne nesigurnosti, pretpostaviće se da se međusobna korelacija pulzacija opisuje prosečni korelacionom koeficijentom od $\bar{\rho} = 0.1$. Praktično na ovaj način, procenjuje se da je korelisanost po prostoru turbulentnih vrtloga koje izazivaju pulzacije jednaka 10%.

Za slučaj kontinualnog profilisanja polja brzina, bez zastajkivanja rama, usled relativno velike brzine rama kao i upotrebe filtera sa bazom od 30 s, potrebno je dodatno uvećati vrednost korelacionog koeficijenta na $\bar{\rho} = 1.0$.

2.6 Primer određivanja ukupne merne nesigurnosti protoka

Inovativni sistem za merenje protoka na cevnim turbinama HE Đerdap 2 je korišćen u okviru dve merne kampanje, koje su realizovane tokom 2020. godine. U okviru prve merne kampanje, merenja su obavljena na agregatu A7 koji je blizu rumunskog dela hidroelektrane, odnosno gde su vrednosti napadnog ugla α relativno male. Druga merna kampanja je sprovedena na agregatu A1, koji je prvi agregat (na glavnoj zgradi HE) sa Srpske strane, gde je izraženo tzv. „koso dostrujavanje“ odnosno vrednosti napadnog ugla α su relativno velike.

Ukupno je sprovedeno 13 merenja protoka, od toga su 6 obavljena na agregatu A7, a 7 na agregatu A1. Takođe, od svih sprovedenih merenja, 7 merenja je obavljeno u inkrementalnom režimu (3 na A7 i 4 na A1) a 6 merenja u kontinualnom režimu rada (po 3 na oba agregata). Na slici 4, dat je vizuelni prikaz obrađenih rezultata merenja u okviru četiri merne sesije sprovedene na agregatu A1. Na slikama 4.1, 4.2 i 4.3 prikazani su rezultati dobijeni u inkrementalnom režimu rada za Q_{max} (Qmax_ink), Q_{sr} (Qsr_ink) i Q_{min} (Qmin_ink) respektivno. Na slici 4.4. dat je prikaz rezultata dobijenih u kontinualnom režimu rada za Q_{min} (Qmin_kont). Slike su eksportovane iz namenski razvijenog softvera za obradu izmerenih podataka, preko novorazvijenog mernog sistema, za HE Đerdap 2. Boje ukazuju na magnitudu protokometrijske komponente vektora brzine (V_x) dok strelice pokazuju pravac i magnitudu preostale dve komponente vektora brzine V_y i V_z . Na prve tri slike, strelice su postavljene na položajima gde su EM sonde merile brzine tokom profilisanja. Na poslednjoj, četvrtoj slici, strelice su postavljane na mestima gde je korisnik izabrao, budući da se tokom merne sesije, ceo ram kontinualno pomerao.

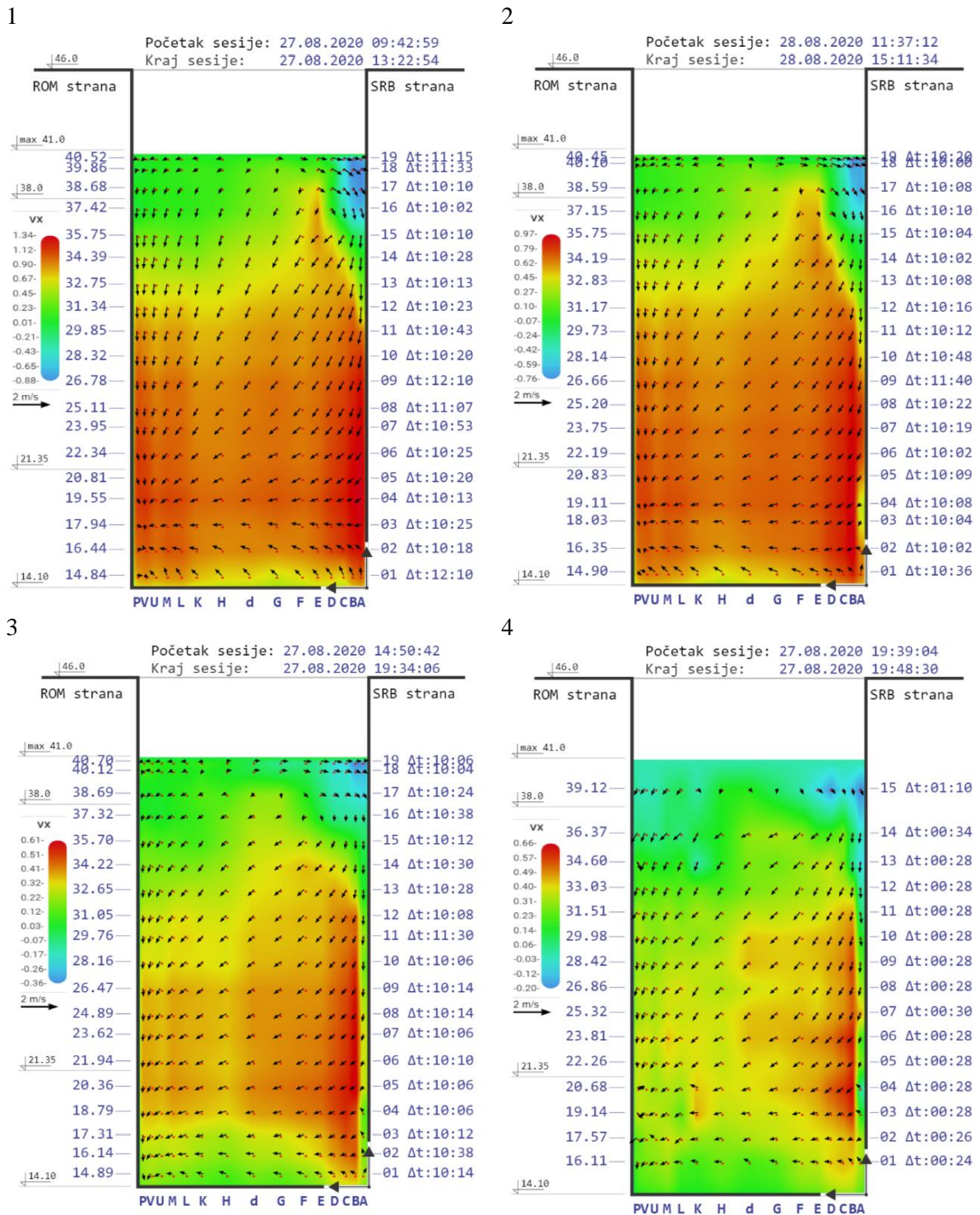
Za izabrane merne sesije, u rezultatima su prikazane vrednosti svih komponenata merne nesigurnosti, uz konačnu ukupnu kombinovanu mernu nesigurnost. Dobijeni rezultati su upotpunjeni diskusijom kojom je dat jedan vid tumačenja na složen postupak merenja protoka i određivanje ukupne merne nesigurnosti.

3 Rezultati i diskusija

Nakon izvršenih merenja, bilo u inkrementalnom ili kontinualnom režimu, prikupljeni podaci su obrađeni u namenski razvijenom softveru. Softver za obradu učitava podatke i sa lokalnog SKADA sistema. Treba napomenuti da korisnik ima mogućnost da u softveru manipuliše prikupljenim podacima, tako da može da ukloni segmente prikupljenih serija za koje se sumnja da su opterećeni nekom greškom merenja (npr kada se zakači rečna trava za sondu), izabere različite modele ekstrapolacije ka površini vode (ili čvrstim konturama) ili na neki treći način. Praktično to implicira da i na sam rezultat merenja, izmereni protok kroz turbinu, korisnik može u određenoj meri da utiče. Slično, treba napomenuti da korisnik ima mogućnost manipulisanja i nad parametrima koji figurišu u proceni merne nesigurnosti (npr prosečni korelacioni koeficijent $\bar{\rho}$). U rezultatima prikazanim u ovom radu, nad izmerenim podacima nisu vršene posebne korekcije, a korišćene su vrednosti parametara za procenu merne nesigurnosti navedene u poglavlju 2.

19. Savetovanje SDHI i SDH - Beograd, Srbija 2021.

Conference SDHI & SDH - Belgrade, Serbia 2021.



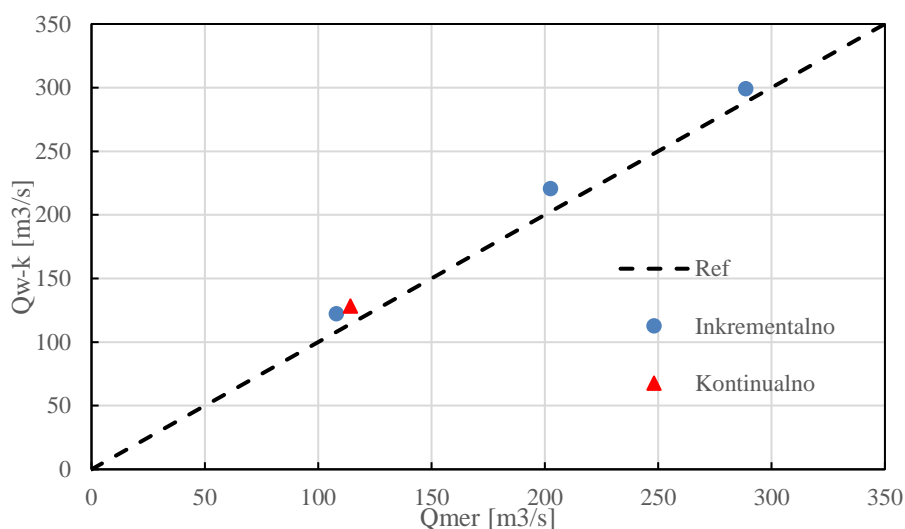
Slika 4. Prikaz konačnih rezultata merenja protoka na agregatu 1 HE Đerdap 2: 1) Q_{max_ink} , 2) Q_{sr_ink} , 3) Q_{min_ink} i 4) Q_{min_kont}

Figure 4. Final results of the flow measurements at turbine 1 of the HPP Đerdap 2: 1) Q_{max_ink} , 2) Q_{sr_ink} , 3) Q_{min_ink} i 4) Q_{min_kont}

Tabela 1. Osnovni podaci o četiri merne sesije na agregatu A7.

Table 1. Basic data regarding four measurement sessions on the turbine A7.

Oznaka	Režim rada	dt [min]	Q_{w-k} [m ³ /s]	Q_{mer} [m ³ /s]	$u(Q)$ [%]
Qmax_ink	Inkrementalni	220	299.3	288.6	1.16
Qmin_ink	Inkrementalni	284	122.4	108.1	1.53
Qsr_ink	Inkrementalni	214	220.8	202.5	1.02
Qmin_kont	Kontinualno	9	128.3	114.3	2.79



Slika 5. Poređenje rezultata merenja protoka na agregatu 1 HE Đerdap 2 između novog sistema i Winter-Kennedy metode: 1) Qmax_ink, 2) Qsr_ink, 3) Qmin_ink i 4) Qmin_kont

Figure 5. Comparison between the novel system and Winter-Kennedy method results of the flow measurements at turbine 1 of the HPP Đerdap 2: 1) Qmax_ink, 2) Qsr_ink, 3) Qmin_ink i 4) Qmin_kont

Za četiri navedene merne sesije, Qmax_ink, Qsr_ink, Qmin_ink i Qmin_kont, osnovni podaci o mernim sesijama, kao i ukupna kombinovana merna nesigurnost su prikazani u okviru Tabele 1. Može se uočiti da se vreme trajanja inkrementalnih mernih sesija kretalo između 214 i 284 minuta, dok je kontinualna merna sesija trajala svega 9 minuta (u proseku oko 26 puta kraće!). Takođe, u sva četiri slučaja, protok izmeren pomoću novog mernog sistema je bio manji nego protok koji je izmeren preko postojećih Winter-Kennedy uređaja. Ukoliko se pogleda Slika 5, gde isprekidana dijagonala predstavlja referentnu liniju savršenog slaganja između Winter-Kennedy uređaja i novog mernog sistema, može se uočiti da su sve izmerene vrednosti sa gornje strane dijagonale na ujednačenom odstojanju. Prikazani podaci ukazuju, da Winter-Kennedy na agregatu A7 precenjuje protok za nekih 14 m³/s u proseku, kao i da se kontinualna merenja dobro poklapaju sa inkrementalnim. Sa stanovišta ukupne merne nesigurnosti, interesantno je uočiti da je opseg mernih nesigurnosti za inkrementalni režim 1,02 do 1,53 %, dok je za kontinualnu sesiju merna nesigurnost bila oko 2 puta veća.

Podaci o vrednostima komponenta merne nesigurnosti su prikazani u okviru Tabela 2 i 3. Tabela 2. prikazuje podatke o sistematskim mernim nesigurnostima kao i o mernoj nesigurnosti usled varijabilnosti protoka tokom trajanja jedne merne sesije. Sistematske merne nesigurnosti su definisane praktično uslovima na mernom mestu, i one su „konstante“ za sve merne sesije, uzimajući vrednosti navedene u poglavlju 2.3. Sa druge strane vrednosti merne nesigurnosti usled varijabilnosti protoka su u proseku tri puta manje za inkrementalna merenja u odnosu na kontinualna. Razlog leži u činjenici da je niz izmerenih podataka kraći u slučaju kontinualnih merenja pa samim tim i standardna devijacija (7)

koja definiše vrednost merne nesigurnosti (8), mora biti veća. Tokom samih merenja, varijabilnost protoka je zapravo bila sličnog inteziteta.

Tabela 2. Sistematska merna nesigurnost protoka, širine, dubine i brzine vode kao i merna nesigurnost usled varijabilnosti protoka.

Table 2. Flow, width, depth and velocity measurement uncertainty along with the measurement uncertainty due to the flow variability.

Oznaka	$u_s(Q)$ [%]	$u_s(w)$ [%]	$u_s(d)$ [%]	$u_s(V)$ [%]	$u_{var}(Q)$ [%]
Qmax_ink					0.71
Qmin_ink					0.42
Qsr_ink	0.13	0.07	0.05	0.10	0.35
Qmin_kont					1.55

U Tabeli 3. su prikazane vrednosti statističkih mernih nesigurnosti protoka i odgovarajućih komponentata. Može se uočiti da su najveće vrednosti statističke merne nesigurnosti protoka zapravo za najmanje izmerene protoke Qmin_ink i Qmin_kont. Ukoliko se detaljnije pogledaju podaci, uočava se da se po komponentama vrednosti nesigurnosti malo razlikuju u većini slučajeva izuzev kod merne nesigurnosti usled pulzacija u toku. Razlog za porast nesigurnosti se može tražiti u hidrauličkim uslovima tečenja kroz merni profil. Može se pretpostaviti da se pri manjim protocima javljaju veće oscilacije u toku, kao posledice nemogućnosti da se tok u potpunosti prilagodi otvorima rešetki i ulazu u agregat. Sa povećanjem protoka, strujnice su stabilnije i tok se lakše prilagođava geometrijskim uslovima.

Tabela 3. Statistička merna nesigurnost protoka i odgovarajućih komponentata.

Table 3. Total flow and corresponding component statistical measurement uncertainty.

Oznaka	$u_{stat}(Q)$ [%]	$u_{stat}(H)$ [%]	$u_{EM}(V)$ [%]	$u_V(V)$ [%]	$u_H(V)$ [%]	$u_\alpha(V)$ [%]	$u_{pulz}(V)$ [%]
Qmax_ink	0.91	0.07		0.38	0.40	0.30	0.59
Qmin_ink	1.47	0.07		0.38	0.40	0.49	1.24
Qsr_ink	0.95	0.07	1.00	0.38	0.40	0.36	0.63
Qmin_kont	1.58	0.06		0.40	0.40	0.50	1.36

Konačno, posmatrajući integralno analizirana merenja, rezultati ukazuju da na mernu nesigurnost izmerenog protoka, pored režima rada uticaj ima i vrednost samog protoka koji se meri. Takođe, jasno je da na postojećem Winter-Kennedy merilu postoji određena sistematska nesigurnost usled koje ova metoda daje veće vrednosti protoka. Konačno, imajući u vidu da se merenje kontinualnim režimom dobro uklapa u trend odstupanja od podataka dobijenih Winter-Kennedy metodom, postavlja se pitanje da li je metodologija previše restriktivna, prvenstveno prema ovom bržem režimu rada.

4 Zaključak

U sklopu plana revitalizacije cevnih agregata na HE Đerdap 2, sa osnovnim ciljem pouzdane procene hidrauličke efikasnosti cevnih agregata, projektovan je i primenjen inovativni sistem za posredno merenje protoka. Iako su cevne turbine decenijama u upotrebi, postojeći referentni standardi za merenje protoka, i odgovarajuću procenu merne nesigurnosti, na hidroelektranama ne obrađuju posebno ovaj tip agregata. Takođe, specifičnost merenja protoka na HE Đerdap 2 se ogleda u pojavi fenomena kosog dostrujavanja vode na ulaze u agregate. Kako bi se ispunili opštim standardima

zahtevani uslovi, ali i omogućilo pouzdano merenje u specifičnim hidrauličkim uslovima na ulazima u turbine HE Đerdap 2, razvijen je inovativni sistem za merenje protoka koji se zasniva na primeni metode Brzina-Proticajni presek. Za potrebe ovog sistema, projektovane su nove 3D EM sonde, praktično EM (hidrometrijska) krila, koja su zajedno sa merilima položaja, nivoa i redundantnim senzorima brzine, korišćena za određivanje protoka u okviru jedne merne sesije.

Kako je sistem inovativnog karaktera, sa novorazvijenim EM sondama i specifičnim režimima rada, razvijena je posebna procedura za određivanje merne nesigurnosti. Navedena procedura je osnovana na standardima koji su u upotrebi za određivanje protoka u rekama hidrometrijskim krilima, kao i za određivanje protoka na ostalim tipovima turbina, takođe upotrebom hidrometrijskih krila. Međutim, budući da EM sonde, imaju značajno veću frekvenciju uzorkovanja, mogućnost merenja tri komponente vektora brzine kao i činjenicu da se hidraulički uslovi tokom merenja mogu menjati, integrisani su dodatni elementi u proceni merne nesigurnosti. 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 turbulენტnih 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 radu su prikazani i rezultati primene procedure za procenu merne nesigurnosti na četiri merne sesije sprovedene na agregatu A7 HE Đerdap 2. Analizirane su tri merne sesije u inkrementalnom režimu rada (prosečnog trajanja preko 3 sata), i jedne kontinualne merne sesije (trajanja 9 minuta). Uočeno je da su merne nesigurnosti u proseku dvostruko niže u inkrementalnom režimu u odnosu na kontinualni režim. Međutim, svi rezultati pokazuju skoro pa uniformno odstupanje od podatka dobijenih Winter-Kennedy metodom, zbog čega je dovedeno u pitanje da li je predložena metoda previše restriktivna prema kontinualnom režimu rada. Svakako, pokazano je da se inovativni merni sistem može koristiti za kontrolu merenja dobijenih Winter-Kennedy metodom. Dalje analize na preostalim izvršenim merenjima, kao i na budućim merenjima na HE Đerdap 2 bi trebalo da pruže bolji uvid kako u rad novorazvijenog mernog sistema, tako i u pouzdanost postojećih Winter-Kennedy merila. Takođe, uz dodatne podatke omogućiće se i analiza mogućnosti za unapređenje predložene metodologije za procenu merne nesigurnosti.

Literatura

1. Adamkowski, A., Janicki, W., Krzemianowski, Z., & Lewandowski, M. (2019). Flow rate measurements in hydropower plants using the pressure-time method—Experiences and improvements. *Flow Measurement and Instrumentation*, 68, 101584..
2. Almquist, C.W., Taylor, J.W. and Walsh, J.T., (2011). Kootenay Canal Flow Rate Measurement Comparison Test Using Intake Methods. *HydroVision*, Sacramento, CA, July, pp.19-22.
3. Herschy, R. W. (2002). The uncertainty in a current meter measurement. *Flow measurement and instrumentation*, 13(5-6), 281-284.
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. ISO 1088, (2007) Collection of data for determination of errors in measurement by velocity area methods, *International Standards Organization*, Geneva.
6. ISO 748, (2007) Velocity area methods, *International Standards Organization*, Geneva.
7. 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.

8. Ivetić D., Prodanović D., Vojt., P (2021) 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. Lohrmann, A., Cabrera, R., & Kraus, N. C. (1994, August). Acoustic-Doppler velocimeter (ADV) for laboratory use. In *Fundamentals and advancements in hydraulic measurements and experimentation* (pp. 351-365). ASCE.
10. PTC. (2002). Performance Test Code 18: Hydraulic Turbines and Pump-Turbines. *ASME: New York, NY, USA*.
11. Prodanović, D., Pavlović, D., & Branisavljević, N. (2011). Flow measurement at the short structures in hydraulic complex conditions: HE Djerdap 2 case study. *Vodoprivreda*, 43(4-6), 103-115.
12. R.W. Herschy, *Streamflow Measurement*, second ed., Spon,UK, 1995.
13. Sauer, V. B., & Meyer, R. W. (1992). Determination of error in individual discharge measurements (No. 92-144). US Geological Survey; Books and Open-File Reports Section [distributor],.