

PROCENA MERNE NESIGURNOSTI PRI MERENJU PROTOKA PROFILISANJEM POLJA BRZINA

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

* Doc. dr Damjan Ivetić, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet (divetic@grf.bg.ac.rs) - kontakt za korespondenciju, tel: 064-239-77-52

** Prof. dr Dušan Prodanović, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet (dprodanovic@grf.bg.ac.rs)

***Predrag Vojt, Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi" (predrag.vojt@jcerni.rs)

Ključne reči: merenje protoka, merenje brzine, merna nesigurnost, elektromagnetne sonde

KRATAK SADRŽAJ

Za potrebe pouzdanije procene hidrauličke efikasnosti cevnih agregata na HE Đerdap 2, kao i unapređenja efikasnosti nakon revitalizacije agregata, projektovan je i primenjen inovativni sistem za posredno merenje protoka kroz jedan agregat. Merni sistem se može postaviti na ulazu u turbinu uzvodno od grube rešetke. Koristi se pristup Brzina – Proticajni presek, gde se polje brzina profiliše (meri) pomoću 15 novorazvijenih 3D elektromagnetnih (EM) sondi, horizontalno raspoređenih na čelični ram koji se podiže po visini proticajnog preseka. Čelični ram je opremljen i sa dva redundantna akustična Dopler senzora brzine (takođe mere sve tri komponente vektora brzine), merilima visine rama i dubine vode. Mogu se koristiti dva režima rada mernog sistema: inkrementalni (sporiji i pouzdaniji) i kontinualni (brži ali manje pouzdan). Budući da je merni sistem sinhronizovan sa lokalnim SCADA sistemom, u konačnoj obradi podataka i obračunu protoka, koriste se i odgovarajući podaci o radu turbine. Poseban izazov u proračunu protoka izvedenim sistemom predstavlja procena merne nesigurnosti (grešku ipak ne možemo znati jer nikad i ne poznajemo tačnu vrednost merne veličine). Kako bi se u proceni merne nesigurnosti, obuhvatile specifičnosti korišćene merne opreme (sa akcentom na 3D EM sonde), režima rada mernog sistema i hidrauličkih uslova na mernim mestima (koso dostrujavanje), razvijena je posebna procedura za proračun komponenata (doprinosa) i konačni obračun ukupne nesigurnosti izmerenog protoka na agregatima. Procedurom su obuhvaćeni doprinosi svih relevantnih veličina tokom trajanja merenja, postupka ekstrapolacije i interpolacije u obradi podataka, kao i integracije konačnog rasporeda brzina. Sam postupak procene merne nesigurnosti je integrisan i u namenski korisnički softver za obradu prikupljenih podataka. U ovom radu predstavljena je korišćena procedura za procenu merne nesigurnosti, kao i rezultati njene primene na konačnom broju izmerenih podataka. Analizirani su uticaji pojedinih komponenata mernih nesigurnosti kao i njihova promena u zavisnosti od korišćenog režima rada.

UNCERTAINTY ASSESSMENT FOR THE FLOW MEASUREMENTS BASED ON THE VELOCITY FIELD PROFILING

Keywords: flow measurements, velocity measurements, measurement uncertainty, electromagnetic probes

ABSTRACT

To provide more reliable estimates of the tubular turbine hydraulic efficiency, and the expected efficiency improvements after the turbine revitalization, an innovative flow measurement system was designed and applied at HPP Đerdap 2. The measurement system can be installed at the turbine inlet, upstream of the trash rack. Velocity – Area approach is utilized, where the velocity field is profiled with 15 newly developed 3D electromagnetic (EM) probes, horizontally positioned on the steel frame which can be traversed across the flow cross section. The steel frame is equipped also with two redundant acoustic Doppler velocimeters (can measure all three velocity vector components), frame height transducers and water depth sensors (pressure transducers). Two operating modes are possible: incremental (slower and more reliable) and continuous (faster but less reliable). As the measurement system is synchronized with the local SCADA, in the final data processing and flow computing, data regarding the turbine operation are also used. Particular challenge in the flow measurement process is the assessment of the measurement uncertainty (the measurement error is never known as we cannot know the exact measured quantity). To envelop the specifics of the used measurement equipment (with focus on the 3D EM probes), operating modes and the hydraulic conditions at the measuring site, a novel procedure for the assessment of the uncertainty components and final computation of the turbine flow measurement uncertainty is developed. The procedure considers the contributions of all the relevant quantities during the measurement process, extrapolation, and interpolation within the data processing step, as well as the integration of the final velocity distribution. The procedure for the measurement uncertainty assessment is integrated in the dedicated software for the processing of the acquired data. In this paper, the suggested procedure for the uncertainty assessment is described along with the results of application on the measured data. Contributions from single uncertainty components are analyzed, as well as the relations to the applied operating mode.

UVOD

U procesu ispitivanja hidrauličke efikasnosti turbina, merenje protoka se smatra najzahtevnijim zadatkom. Po pravilu, projektovani postupak merenja je kompleksan, merne nesigurnosti su veće i komplikovanije ih je proceniti u poređenju sa merenjima snage ili pada turbine [1]. Postojeće preporuke i standardi pružaju praktična uputstva, pomažu kontroli i povećanju kvaliteta odnosno pouzdanosti merenja protoka na različitim tipovima turbina [2, 3]. Iako su Kaplanove turbine za male padove iliti tzv. „bulb“ turbine u relativnoj rasprostranjenoj upotrebi, postojeći standardi ne pokrivaju, ili veoma malo razmatraju, metodologije za merenje protoka i procene merne nesigurnosti izmerenog protoka na ovakvim agregatima [4]. U praksi, pri projektovanju rešenja, struka se poziva na standard ISO 3354 [5] za merenje protoka u ispunjenim, zatvorenim provodnicima, koji sugeriše mapiranje ili profilisanje rasporeda brzina sa nizom hidrometrijskih krila. Međutim, ukoliko bi se u mernom profilu javili nepravilni i/ili nestabilni rasporedi brzina, ostaje nejasno kako bi se obezbedio veliki broj hidrometrijskih krila koji mogu pouzdano i simultano da mere lokalne brzine a da pritom svojim prisustvom ne remete značajno polje brzina i rad agregata.

Predviđenom revitalizacijom turbina na hidroelektrani (HE) Đerdap 2, konstatovana je potreba za verifikacijom i proverom rada postojećih „Winter-Kennedy” (WK) posrednih merila protoka. Sumnja u pouzdanost rada WK merila, potiče od činjenice da su koeficijenti WK određeni kroz laboratorijska, indeksna ispitivanja koja nisu uračunala, kasnije uočene, visoke napadne uglove dotoka na turbine (do 40°). Da bi se obezbedila pouzdana verifikaciona merenja na HE Đerdap 2, potrebno je bilo savladati nasledne probleme merenja u kratkim i difuznim ulazima, nepovoljne uslove tečenja i ograničenja propisana od strane nadležnih operatora na elektrani [6]. Zbog toga, tokom projektovanja sistema za merenja protoka, zaključeno je da bi optimalno rešenje podrazumevalo upotrebu hidrometrijskih krila koja bi mogla da mere sve tri komponente vektora brzine u oba pravca. Kako klasična, hidrometrijska krila sa propelerom, mogu da mere samo jednu komponentu brzine i to u određenom opsegu napadnih uglova (manjem od učenih uglova do 40°), razvijena su posebna elektromagnetna (EM) krila od strane domaće firme „Svet instrumenata d.o.o.“ u saradnji sa Građevinskim fakultetom, Univerziteta u Beogradu i Instituta za vodoprivredu „Jaroslav Černi“. U konačnom rešenju, 15 EM krila je postavljeno na čelični ram koji je kranskom dizalicom pomeran po celom proticajnom preseku, koristeći nišu za čistilicu (tzv. „grajfer“), kako bi se mapirao ili profilisao raspored brzina. Dva merna režima su korišćena: 1.) inkrementalni režim u kojem je ram držan fiksiranim po barem 10 minuta u određenom broju profila i 2.) kontinualni režim, iliti metoda direktne integracije (po IEC 60041) gde je merni ram podizan od dna, konstantnom brzinom.

U ovom radu predstavljena je analiza merne nesigurnosti za oba režima rada mernog sistema pri merenju protoka. Metoda za analizu merne nesigurnosti preporučena od strane IEC 60041 [2] i ISO 3354 [5] standarda, je korišćena kao osnova usled sličnosti između tradicionalnih hidrometrijskih krila i EM krila. Međutim, određene modifikacije su bile neophodne kako bi se uvrstile specifičnosti na mernom mestu kao i samih EM krila. Neophodno je napomenuti, da su odgovarajući standardi definisani za merenje protoka u punim, zatvorenim provodnicima, dok je ovde merenje sprovedeno u uslovima tečenja sa slobodnom površinom. Slično kao i u [7], pretpostavljeno je da se ovi standardi mogu koristiti, budući da je varijacija površine proticajnog preseka zanemarljiva tokom trajanja merenja. Predložena analiza merne nesigurnosti je ovde detaljnije analizirana sa posebnim osvrtom na modifikovane komponente nesigurnosti. Takođe, prikazani su i rezultati primene analize na izabranim merenjima sprovedenim tokom 2020. god.

METODOLOGIJA MERENJA PROTOKA

Detaljnije objašnjenje razvijene metodologije za merenje protoka na HE Đerdap 2 se može naći u [6], dok se ovde navedeni samo ključni aspekti neophodni za opisivanje procedure za procenu merne nesigurnosti. Budući da su EM krila novorazvijena, relevantni standard IEC 60041 [2] ih ne prepoznaje kao merilo koje se koristi za apsolutno merenje protoka, međutim u konkretnoj situaciji HE Đerdap 2 su definisana kao optimalno inženjersko rešenje. Ključna ideja u primeni EM krila je njihova mogućnost da bidirekciono mere sve tri komponente vektora brzina (X, Y i Z) neophodne za profilisanje brzina, određivanje protoka i kasniju hidrauličku analizu polja brzina (veliki napadni uglovi, vrtložnost itd.). EM krila su projektovana tako da njihov oblik kao i oblik nosača, veoma liči na iste kod klasičnih hidrometrijskih krila, stoga su ovde protumačena kao EM hidrometrijska krila. Analogija sa primenom klasičnih hidrometrijskih krila u merenju protoka u zatvorenim provodnicima, prema [2, 5, 6], je iskorišćena da se opiše opšta metodologija merenja protoka, gde se protok Q dobija simultanim merenjem srednje profilske brzine V i površine proticajnog preseka A . Srednja profilska brzina V se računa aritmetičkom integracijom izmerenih lokalnih brzina $V_{i,j}$, pomoću EM krila $i = 1: N_V$ (jednako broju EM krila na ramu, odnosno broju mernih vertikalala) u profilima $j = 1: N_H$ (jednako broju horizontalnih profila na kojima su merenja obavljena).

$$V = \frac{\sum_{i=1}^{N_V} \sum_{j=1}^{N_H} k_{i,j} \cdot V_{i,j}}{\sum_{i=1}^{N_V} \sum_{j=1}^{N_H} k_{i,j}} = \frac{\sum_{i=1}^{N_V} \sum_{j=1}^{N_H} w_i \cdot d_j \cdot V_{i,j}}{\sum_{i=1}^{N_V} \sum_{j=1}^{N_H} w_i \cdot d_j} = \frac{\sum_{i=1}^{N_V} \sum_{j=1}^{N_H} A_{i,j} \cdot V_{i,j}}{A} \quad (1)$$

Gde je $k_{i,j}$ ($k_{i,j} = w_i \cdot d_j = A_{i,j}$) koeficijent osetljivosti ili težinski koeficijent, w_i i d_j su širina i dubina, respektivno, pripadajuće podpovršine $A_{i,j}$.



Slika 1. Levo) Rečna vegetacija upetljena na merni ram; Desno) Vrtlog na desnoj strani ulaza u turbinu A7

Zarad konciznosti i razumevanja komponenata merne nesigurnosti, ključne specifične karakteristike metode merenja protoka na HE Đerdap 2 bi trebalo naglasiti pre samog opisa procedure za procenu merne nesigurnosti:

- Dva merna režima su korišćena: inkrementalni (koji traje do 4 sata tokom kojih se prikupi >7200 merenja) i kontinualni (koji traje oko 9 minuta tokom kojih se prikupi približno 270 merenja). U inkrementalnom režimu tečenja, izmerene brzine su linearno korigovane zarad kompenzacije fluktuacija protoka tokom mernog procesa.
- Merenja su obavljena dok su turbine radile u režimu „konstantne snage“.
- Ekstrapolacija polja brzina u perifernoj zoni mernog profila se obavlja i sa eksponencijalnim i linearnim zakonom.
- Negativne brzine (koje potiču od velikih vrtloga sa vertikalnim i horizontalnim osovinama upravnim na osu agregata, Slika 1. Desno) su izmerene u blizini slobodne površine.
- Visoki napadni uglovi do 40° su redovno primećeni u različitim delovima proticajnog preseka.
- Tokom merenja značajne količine rečne vegetacije i različitog otpada je uočeno da prolazi pored i kroz merni ram, kao i da se zakače za merni ram (Slika 1. Levo).

ANALIZA MERNE NESIGURNOSTI

Standard ISO 3354 [5] definiše karakteristične korake u proceni nesigurnosti izmerenog protoka u odgovarajućim uslovima: proračun slučajne, sistematske i kombinovane nesigurnosti u merenjima lokalne brzine, proračun nesigurnosti srednje profilske brzine i kasnije slučajne, sistematske i kombinovane nesigurnosti izmerenog protoka. Razlikovanje slučajne i sistematske nesigurnosti je zapravo u koliziji sa GUM-om [8] i ISO 5168 [9], koji definiše da su merne nesigurnosti slučajne po prirodi i mogu se, u zavisnosti od korišćene metodologije za kvantifikaciju i podataka, klasifikovati kao nesigurnosti tipa A i tipa B. Međutim, zbog jasnoće u komunikaciji i izražavanju rezultata, ovde će se koristiti takođe termini slučajne i sistematske nesigurnosti, iako će u analizi sve biti tretirane kao da su slučajnog karaktera.

Slučajna (statistička) nesigurnost u merenju lokalnih brzina

Kod propellerskih hidrometrijskih krila razlikuju se dve komponente slučajne merne nesigurnosti: Nesigurnost usled ugaone frekvencije propelera krila i nesigurnost usled sporih oscilacija brzine vode. Prva komponenta potiče od principa rada propellerskih krila i nije primenjiva kod EM krila. Međutim, ovde će se uvesti jedna nova komponenta merne nesigurnosti, samo kod inkrementalnog režima merenja, kojom se

opisuje nesigurnost usled linearne korekcije izmerenih brzina. Stoga, slučajne nesigurnosti u izmerenim lokalnim brzinama su:

- Nesigurnost usled sporih oscilacija brzina

Ova komponenta nesigurnosti se razmatra u relativno neustaljenim uslovima, gde vreme akvizicije podataka nije dovoljno dugo da se na adekvatan način osrednje spore oscilacije u merenoj brzini [5]. Da bi se na odgovarajući način sračunala ova komponenta, neophodno je odrediti periodu oscilacija brzina tokom merenja t i uporediti je sa vremenom akvizicije T (dužinom merenja) [7]. Na HE Đerdap 2, pored „prirodnih“ pokretača oscilacija, režim rada turbina sa „konstantnom snagom“ je indukovao dodatne oscilacije brzine prilikom adaptiranja položaja lopatica sprovodnog aparata i radnog kola, trenutnom padu turbine. Tokom merenja, perioda „najsporijih“ oscilacija je procenjena da je između 1 i 2 minuta. Za proračun same komponente merne nesigurnosti, razlikovaće se pristupi sa dva merna režima, budući da se u inkrementalnom režimu prikupi za red veličine veći broj podataka negu u kontinualnom. Tako, u inkrementalnom režimu gde vreme akvizicije $T > 10$ minuta, a magnituda oscilacija brzine $\Delta V_{i,j}$ niska ($< 10\%$ srednje vrednosti $V_{i,j}$), sledeća jednačina se koristi:

$$(u_{r,i,j})_o^{ink} = 0.1 \cdot \frac{t}{T} \cdot \frac{\Delta V_{i,j}}{V_{i,j}} \cdot 100 [\%] \quad (2)$$

U kontinualnom režimu rada, komponenta merne nesigurnosti je korelisana sa fluktuacijama protoka izmerenog pomoću WK merila:

$$(u_{r,i,j})_o^{cont} = \frac{\sigma_{Q_{WK}}}{Q_{WK}} \cdot 100 [\%] \quad (3)$$

Gde je $\sigma_{Q_{WK}}$ standardna devijacija protoka izmerenog pomoću WK merila.

- Nesigurnost usled linearne korekcije izmerenih brzina

Uprkos činjenici da ISO 3354 standard prepoznaje potrebu za korekcijom izmerenih brzina tokom ne-simultanih merenja (ukoliko su promene male u poređenju sa referentnom brzinom), ne analizira se dodatna merna nesigurnost koja se unosi na ovaj način u merenja protoka. U ovom radu, za inkrementalni režim merenja, predlaže se uvođenje komponente slučajne merne nesigurnosti koja će izraziti grešku pretpostavke da se brzine mogu linearno korigovati naspram referentne brzine. Autori veruju da će usled visokih napadnih uglova, promena brzina u zavisnosti od promene protoka verovatno biti nelinearna (barem u delovima površine proticajnog preseka, manjeg od 20% ukupnog A). Stoga, dodatna komponenta merne nesigurnosti se može proceniti na sledeći način:

$$(u_{r,i,j})_{lk}^{ink} = 0.2 \cdot \frac{2 \cdot \sigma_{Q_{WK,j}}}{Q_{WK}} \cdot 100 [\%] \quad (4)$$

Gde je $\sigma_{Q_{WK,j}}$ standardna devijacija od j osrednjenih protoka $\overline{Q_{WK,j}}$ merenih pomoću WK merila.

Sistematska nesigurnost u merenju lokalnih brzina

Iste komponente merne nesigurnosti su analizirane ovde, kao i što bi u slučaju propellerskih hidrometrijskih krila, međutim da to je posebno tumačenje usled mernih specifičnosti:

- Nesigurnost usled kalibracije krila

Profilisanje brzina u postupku merenja protoka se obavlja sa 15 EM krila raspoređenih duž horizontalnog profila (na ramu). Ovde se pretpostavlja da od proširene merne nesigurnosti krila od 1% (što znači da je 0,5% standardne nesigurnosti) dobijene kroz kalibraciju krila u kanalu sa vučenim kolicima, deo nesigurnosti je korelisani i potiče od karakteristika kalibracione opreme (npr nesigurnost enkodera položaja preko kojeg se određuje položaj i brzina kolica) dok je drugi deo nekorelisani. Samim tim, u proračunu kalibracione nesigurnosti, nekorelisani deo je podeljen sa korenom broja EM krila (koja u paraleli zapravo mere V):

$$(u_{s,i,j})_c^{ink+cont} = \left(0.3 + \frac{0.2}{\sqrt{15}} \right) \cdot 100 [\%] \quad (5)$$

- Nesigurnost usled turbulencije i gradijenta brzina u mernoj zapremini

Kod tradicionalnih hidrometrijskih krila, navedene komponente merne nesigurnosti se računaju odvojeno, ali na sličan način kao što je i preporučeno standardom. Sferna konstrukcija EM krila i integrativni merni proces (brzine su integrisane u mernoj zapremini prečnika 0,15 m), impliciraju da su efekti turbulencije i gradijenta brzine uslovno rečeno „razmazani“ a mogu se odraziti na merenja kroz fluktuacije brzina sa većom frekvencijom. U inkrementalnom režimu rada, proračun ovog kombinovanog efekta se može sprovesti na sledeći način:

$$(u_{s,i,j})_{t+vg}^{ink} = \frac{\sigma_{V_{i,j}}}{V_{i,j}} \cdot 100 [\%] \quad (6)$$

Gde je $\sigma_{V_{i,j}}$ standardna devijacija merenja $V_{i,j}$. U kontinualnom režimu rada, koristi se drugačija jednačina gde se komponenta nesigurnosti dodeljuje i -tom EM krilu:

$$(u_{s,i})_{t+vg}^{cont} = \frac{\sigma_{V_i}}{V_i} \cdot 100 [\%] \quad (7)$$

Gde je σ_{V_i} standardna devijacija svih merenja pomoću i -tog EM krila tokom jednog prolaza, a V_i je odgovarajuća srednja izmerena brzina.

- Nesigurnost usled nesavršene orijentacije montiranog hidrometrijskog krila (usled visokog napadnog ugla)

Za razliku od tradicionalnih hidrometrijskih krila, EM krila mogu bidirekciono da mere komponente vektora brzine u X, Y i Z pravcu. Međutim, nesigurnost usled kalibracije je deklarirana za napadne uglove $\alpha_{i,j}$ do 15° u odnosu na osu uređaja. Za više vrednosti $\alpha_{i,j}$, i merna nesigurnost od kalibracije je viša (dostiže do 5% ukupno za napadne uglove do 180°), kao što je prikazano u [6]. Ukoliko bi se dijagram ove zavisnosti „razvio“ i normalizovao po uglovima u vertikalnoj ravni do 180°, polinom drugog reda bi mogao da se iskoristi da se aproksimira veza između merne nesigurnosti koja potiče od visokog napadnog ugla $(u_{s,i,j})_{\alpha}^{inc+cont}$ i vrednosti napadnog ugla $\alpha_{i,j}$:

$$(u_{s,i,j})_{\alpha}^{inc+cont} = 6 \cdot 10^{-5} \alpha_{i,j}^2 + 0.0133 \cdot \alpha_{i,j} - 0.2121 [\%] \quad (8)$$

Gde je $\alpha_{i,j}$ definisano u stepenima.

Kombinovana (ukupna) nesigurnost u merenju lokalne brzine

Kombinovana merna nesigurnost u merenjima lokalne brzine ($u_{i,j}$) se dobija sabiranjem uticaja slučajne ($u_{r,i,j}$) i sistematske ($u_{s,i,j}$) komponente merne nesigurnosti u formi kvadratnog korena, sume kvadrata:

$$(u_{r,i,j}) = \sqrt{(u_{r,i,j})_0^2 + (u_{r,i,j})_{lk}^2} \quad (9)$$

$$(u_{s,i,j}) = \sqrt{(u_{s,i,j})_c^2 + (u_{s,i,j})_{t+vg}^2 + (u_{s,i,j})_{\alpha}^2} \quad (10)$$

$$(u_{i,j}) = \sqrt{(u_{r,i,j})^2 + (u_{s,i,j})^2} \quad (11)$$

Gde je neophodno napomenuti da se odgovarajuće jednačine trebaju koristiti za proračun komponenata merne nesigurnosti u zavisnosti od režima merenja (inkrementalni ili kontinualni).

Nesigurnost u merenju srednje profilske brzine

Za procenu nesigurnosti u merenju srednje profilske brzine, na osnovu prethodno sračunatih kombinovanih nesigurnosti lokalno izmerenih brzina, neophodno je referencirati se na jednačinu (1). Koeficijenti osetljivosti $k_{i,j}$, korišćeni za proračun srednje profilske brzine, se koriste i ovde:

$$(u_V) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_V} \sum_{j=1}^{N_H} (A_{i,j}^2 \cdot (u_{i,j})^2)}{A^2}} \quad (12)$$

Slučajna nesigurnost u merenju protoka

Razlikuju se četiri komponente: nesigurnost u merenju srednje profilske brzine (definisana jednačinom (12)), nesigurnost u proceni eksponenta m (ekstrapolacija u perifernoj zoni toka), nesigurnost koja potiče od pozicioniranja krila i nesigurnost u proceni kote slobodne površine. Ovde se razmatraju poslednje tri komponente:

- Nesigurnost u proceni eksponenta m (nesigurnost ekstrapolacije brzina u perifernoj zoni toka)

U slučaju punih zatvorenih provodnika, tzv. koeficijent ekstrapolacije ka zidu m se određuje na osnovu površinske hrapavosti zidova provodnika i uslova tečenja (Rejnoldsov broj, raspored brzina itd.) ili pomoću grafičke metode (pogledati Aneks E u ISO 3354). Za merenja na HE Đerdap 2, način ekstrapolacije rasporeda brzina ka čvrstim konturama (zidovi i dno) i ka slobodnoj površini, određuje obrađivač. Dodatna ispitivanja sprovedena 2020. su ukazala da je za ekstrapolaciju ka čvrstim konturama, najbolje koristiti eksponencijalni zakon sa eksponentom $1/9$ i različitim koeficijentima razmere za levi i desni zid (zbog asimetrije toka), odnosno linearni zakon ka slobodnoj površini. Veličina periferne zone $A_{p,st}$ u blizini čvrstih granica je u proseku između $6 - 6,5\%$ dok je u blizini slobodne površine $A_{p,fs}$ između $0,8 - 1,3\%$. Samim tim, rezultujuća komponente merne nesigurnosti se računa sabiranjem dva uticaja, pretpostavljajući da je koeficijent $m = 9$ za sve tipove granica, i korišćenjem slučajne merne nesigurnosti (jednačina 11) u ekstremnim mernim tačkama:

$$(u_{Q,r})_m = \sqrt{\left((u_{r,i,j})_{p,st} \frac{A_{p,st}}{A \cdot m}\right)^2 + \left((u_{r,i,j})_{p,sf} \frac{A_{p,sf}}{A \cdot m}\right)^2} \quad (13)$$

- Nesigurnost koja potiče od pozicioniranja krila

Položaj mernog rama a samim tim i EM krila je kontrolisan tokom postupka merenja, pomoću dva enkodera položaja instalirana na oba kraja mernog rama. Merna nesigurnost enkodera položaja se može proceniti na oko 10 mm iliti 0,02% mernog opsega (50 m), iz deklarisanе linearnosti i ponovljivosti, pretpostavljajući pravougaonu raspodelu [9]. Modeliranjem merenja protoka sa hipotetičkim pomerajem položaja EM krila bi vodilo do razlike u protoku od ΔQ što se može iskoristiti za procenu magnitude ove komponente nesigurnosti:

$$(u_{Q,r})_{pos} = \sqrt{\sum_{i=1}^{N_V} \sum_{j=1}^{N_H} \left(\frac{\Delta Z \cdot \Delta Q}{Z}\right)^2} \quad (14)$$

- Nesigurnost koja potiče od merenja dubine (kote slobodne površine)

Nesigurnost u merenju dubine ili visine proticajnog preseka potiče od senzora dubine, sonara za procenu stanja dna i od geodetskih podataka. Merenja dubine se sprovode pomoću dva pretvarača pritiska (levi i desni) postavljenih u perforirane cevi, dok su podaci sa sonara prikupljeni pre početka merenja protoka. Kako su u svim dosadašnjim merenjima, sonari pokazivali slične rezultate, pretpostavljeno je da je dno čisto od sedimenta. Rezultujuća merna nesigurnost se zato računa iz nesigurnosti merenja dubine:

$$(u_{Q,r})_{dm} = \frac{\sigma_{H_{i,j}}}{\sqrt{2} \cdot H} \cdot 100 [\%] \quad (15)$$

Sistematska nesigurnost u merenju protoka

- Nesigurnost od merenja površine proticajnog preseka

Sistematska nesigurnost u merenju širine proticajnog preseka (merenja dubine su već razmatrano prethodno u j-ni 15), koja potiče od geodetskih merenja i projektne dokumentacije, se procenjuje na $(u_{Q,s})_A = 0.15 [\%]$.

- Nesigurnost koja potiče od aritmetičkih i numeričkih integracionih metoda

Integracija izmerenog rasporeda brzina, sama po sebi uvodi nesigurnost obrnuto proporcijalnu broju mernih tačaka, odnosno stepenu pokrivenosti regiona sa ključnim karakteristikama rasporeda. Za slučajeve gde su rasporedi brzina neuniformni, IEC standard definiše minimalan broj mernih tačaka kao uslov koji treba da se ispuni: $24 \cdot \sqrt[3]{A} < Z < 36 \cdot \sqrt[3]{A}$. Za prosečne dubine od 27 m, 15 EM krila po profilu i 16 do 19 profila, preporučeni minimalan broj tačaka je $240 < Z < 285$. Korišćena je bi-linearna integracija rasporeda. Usled složenih uslova tečenja, usvojena je pesimistična vrednost od $(u_{Q,s})_{in} = 0.3$ [%].

- Nesigurnost od broja mernih tačaka

Broj mernih tačaka se može smatrati dovoljnim i u inkrementalnom i u kontinualnom režimu rada, međutim, uslov simultanosti merenja nije zadovoljen. Posledično, nesigurnost koja potiče od broja mernih tačaka može biti pretpostavljena da iznosi $(u_{Q,s})_{nm} = 0,2$ [%].

Kombinovana nesigurnost u merenju protoka

Nakon proračuna slučajne i sistematske komponente, kombinovana nesigurnost u merenju protoku se može proceniti kao:

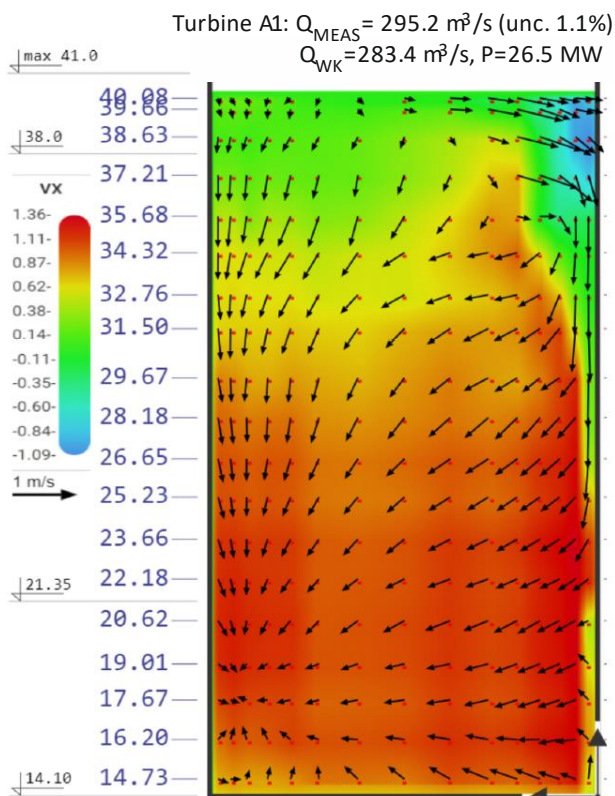
$$(u_{Q,r}) = \sqrt{A \cdot (u_V)^2 + (u_{Q,r})_m^2 + (u_{Q,r})_{pos}^2 + B \cdot V \cdot (u_{Q,r})_{dm}^2} \quad (16)$$

$$(u_{Q,s}) = \sqrt{V \cdot H \cdot (u_{Q,s})_A^2 + (u_{Q,s})_{in}^2 + (u_{Q,s})_{nm}^2} \quad (17)$$

$$(u_Q) = \sqrt{(u_{Q,r})^2 + (u_{Q,s})^2} \quad (18)$$

ANALIZA ODABRANIH MERENJA PROTOKA

Tokom merne kampanje iz 2020., merenja protoka su obavljena na dve turbine A1 i A7. Predložena metoda analize merne nesigurnosti je pokazala da su relativne nesigurnosti merenja protoka inkrementalnim režimom u opsegu od 0,96% do 2,28%, dok su se za kontinualnom režimu, vrednosti kretale u opsegu od 1,47% do 4,62%. Ovde su predstavljena odabrana merenja na A1, jedno inkrementalno i tri kontinualna za sličnu vrednost protoka. Slika 2 prikazuje izmereni raspored brzina, u namenskom softveru, za inkrementalno merenje protoka, dok su u Tabeli 1 dati rezultati merenja zajedno sa vrednostima ključnih komponentata merne nesigurnosti. Generalno, rasipanje između merenja inkrementalnim i kontinualnim režimom su mala čime je potvrđena niska kombinovana merna nesigurnost u izmerenim protocima (1,08% - 1,80%). Sračunate kombinovane nesigurnosti za kontinualna merenja su u proseku 65% više, uglavnom zbog više slučajne nesigurnosti u merenju brzina. Ovo je očekivano, budući da su u ovom režimu nesigurnosti usled sporih oscilacija više izražene zbog kratkog vremena akvizicije T .



Slika 2. Raspored brzina na A1 turbini (inkrementalni režim)

Tabela 1. Merni rezultati i sračunate komponente i kombinovane merne nesigurnosti za A1 turbinu

Izmereni podaci	Inkrementalno merenje	Kontinualna merenja		
		n°1	n°2	n°3
Q [m^3/s]	295,20	296,99	296,80	299,87
Q_{WK} [m^3/s]	283,41	284,87	283,16	280,88
Komponente nesigurnosti	/	/	/	/
Slučajna brzina [%]	$\pm 0,80$	$\pm 1,61$	$\pm 1,22$	$\pm 1,59$
Sistematska brzina [%]	$\pm 0,58$	$\pm 0,77$	$\pm 0,69$	$\pm 0,66$
Slučajna protok [%]	$\pm 1,00$	$\pm 1,79$	$\pm 1,41$	$\pm 1,74$
Sistematska protok [%]	$\pm 0,39$	$\pm 0,48$	$\pm 0,50$	$\pm 0,48$
Kombinovana protok [%]	$\pm 1,08$	$\pm 1,85$	$\pm 1,50$	$\pm 1,80$
Kombinovana protok [m^3/s]	$\pm 3,17$	$\pm 5,51$	$\pm 4,45$	$\pm 5,40$

ZAKLJUČAK

U ovom radu je predložena modifikacija analize nesigurnosti merenja protoka, definisane IEC 60041 i ISO 3354 standardima, kako bi se uračunale specifičnosti rešenja mernog sistema, zasnovanog na primeni EM krila, i primenjenog na HE Đerdap 2. Analizirani su i inkrementalni i kontinualni (direktna integracija) režim merenja i prikazani su odgovarajući rezultati. Usled kraćeg vremena akvizicije u kontinualnom režimu, slučajne nesigurnosti u merenjima brzina su uslovile više nesigurnosti u merenjima protoka, u poređenju sa inkrementalnim režimom. Međutim, duže trajanje merenja u inkrementalnom režimu predstavlja motivaciju za dalja ispitivanja bržeg kontinualnog režima rada, budući da preliminarni rezultati ukazuju na malu disperziju rezultata.

LITERATURA

- [1] Adamkowski A, Janicki W, Krzemianowski Z, Lewandowski, M: "Flow rate measurements in hydropower plants using the pressure-time method—Experiences and improvements". *Flow Measurement and Instrumentation*, 68, 101584, 2019
- [2] IEC 60041: International standard: field acceptance tests to determine the hydraulic performance of hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines. (European Equivalent: EN 60041) 1999.
- [3] Performance Test Code 18: Hydraulic Turbines and Pump-Turbines. ASME: New York, NY, USA, 2002.
- [4] Almquist CW, Taylor JW, Walsh JT: "Kootenay Canal Flow Rate Measurement Comparison Test Using Intake Methods". in *HydroVision*, Sacramento, CA, July, pp.19-22, 2011.
- [5] ISO 3354: Measurement of clean water flow in closed conduits — Velocity-area method using current-meters in full conduits and under regular flow conditions, 2008.

- [6] Prodanović D, Ivetić D, Milivojević N, Vojt P, „Flow measurement methodology for low head and short intake bulb turbines - Iron Gate 2 case“, in *IGHM2022 proceedings*, Grenoble, France, 2022.
- [7] Muciaccia F, Ormando F, Vaccarone S, Grego G, „Flow measurements with current meters at the inlet: reliability of the results and evaluation of the uncertainty.“, in *IGHM2018 proceedings*, Beijing, China, 2018.
- [8] GUM: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, JCGM, 2008.
- [9] ISO 5168: Measurement of fluid flow — Procedures for the evaluation of uncertainties, 2005