A XIX-a Conferinţă internaţională – multidisciplinară
„Profesorul Dorin PAVEL – fondatorul hidroenergeticii româneşti”,
CLUJ NAPOCA, 2019

DETERMINAREA DEBITULUI LA CENTRALELE HIDROELECTRICE DE MICĂ CĂDERE DOTATE CU TURBINE KAPLAN

Cristian PURECE, Valeriu PANAITESCU

DETERMINATION OF FLOW RATE AT LOW HEAD HYDRO POWER PLANTS FEATURE WITH KAPLAN TURBINES

In the paper there are presented some methods of determination of the flow rate measurements in low head hydro power plans are also presented with a series of field studies. The most commonly used method for determining the flow in convergent measurement sections is the multipoint velocity measurement with propeller type current meters. For flow rate evaluation integration of the difference between measured velocities and a known velocity distribution is recommended.

One of the newest methods of flow determination in intakes is the acoustic scintillation method, a cross-correlation method. For accurate results the scintillation method must be installed downstream of trash racks.

Another method that can also be adopted to measurements in low head, is method of acoustic transit measurement, but new procedures for determination weighing the individual path velocities have to be applied due to varying shape of the flow cross sections. At the end of the paper a comparative analysis is made between the methods for determining the flow rate in the convergent measuring sections

Keywords: flow rate measurement, Winter-Kennedy method, efficiency, acoustic scintillation, acoustic transit time, velocity – area

Cuvinte cheie: măsuratori debitmetrice, metoda Winter-Kennedy, randament, metoda scintilaţiei acustice, metoda acustică a timpului de tranzit, metoda viteză– arie

1. Introducere

Amenajările hidroenergetice reprezintă construcţii al căror scop constă în modificarea regimului natural al unor cursuri de apă în aşa fel încât să asigure o anumită utilizare în condiţii tehnico-economice optime a resursei de apă respective. Utilizarea optimă a acestei resurse se asigură atât prin proiectare cât şi prin exploatarea raţională (optimă) a instalaţiilor aferente amenajărilor hidroenergetice.

Funcţionarea în orice moment a amenajării şi instalaţiilor hidroenergetice din centralele hidroelectrice este caracterizată prin anumite valori ale parametrilor caracteristici ai acestora, debit Q, cădere H, putere electrică P, randament η etc. Corelaţia dintre valorile acestor parametri în limitele întregului lor domeniu de variaţie, determinate de tipul, construcţia şi dimensiunile amenajării, este definită grafic prin aşa numitele curbe caracteristice ale amenajării sau ale hidroagregatelor ce echipează o centrală hidroelectrică (turbine, pompe etc.).

Curbele caracteristice, zonele sau liniile de funcţionare optime sunt determinate încă din procesul de poiectare. Datorită rezervelor acoperitoare luate în mod obligatoriu în proiect şi datorită influenţei specificului execuţiei, curbele caracteristice reale diferă nu numai faţă de cele proiectate, ci şi de la hidroagregat la hidroagregat, chiar dacă acestea au fost executate de acelaşi executant după acelaşi proiect.

Teoria şi tehnica modernă de măsurători permit determinarea individualităţii fiecărei unităţi în parte, ceea ce creează premisele necesare cunoaşterii şi folosirii atât a rezervelor interne rezultate din acoperirea proiectului faţă de hidroagregatul realizat, cât şi cele reprezentate de diferenţele dintre hidroagregatele aceleiaşi centrale hidroelectrice, orientând exploatarea spre utilizarea diferenţiată optimă a hidroagregatelor. Funcţionarea optimă a unui hidroagregat, a unei centrale, sau o unei cascade de centrale, este echivalentă cu un spor de energie sau cu existenţa unor amenajări (teoretice) ce ar avea o producţie de energie electrică suplimentară de minim 2 %.

Indicatorul primordial care dă o caracteristică generală a modului de funcţionare a hidroagregatelor unei centrale hidroelectrice este randamentul hidroagregatului. Pe baza acestuia se poate estima starea maşinii dând informaţii asupra gradului de uzură pentru diferitele componentele ale maşinii (rotor, aparat director, ejector). Se pot explica cauzele care determină nivelul vibraţiilor şi zgomotului, fiind de asemenea factorul principal care stă la baza elaborării strategiilor optime de exploatare şi un element important în analiza oportunităţii pentru schimbări sau adaptări ale anumitor echipamente.

Dintre parametrii unei amenajări hidroenergetice, sau ai unui hidroagregat, parametrul a cărui măsurare pune problemele cele mai dificile este debitul. Măsurarea acestui parametru necesită o metodologie de măsurare complexă.

La noi în ţară măsurarea debitului turbinat se face în conformitate cu standardul de măsurători internaţional CEI 60041 [1] respectiv cel naţional SR EN 60041 [2], respectând condiţiile de realizare a măsurătorilor prevăzute în ISO 3354 [3]. Periodicitatea de efectuare a acestor măsurători este reglementată de prescripţia energetică PE 301 [4]. Pe plan internaţional în ultima perioadă tot mai multe măsurători de debite turbinate sunt efectuate în conformitate cu prevederile standardului internaţional CEI 62006 [5] şi a standardului american ASME PTC 18 [6]. Cu toate acestea standardul de măsurători CEI 41 rămâne un standard de referinţă în domeniul măsurătorilor de parametri reali de funcţionare ai hidroagregatelor şi pompelor din amenajările hidroenergetice.

2. Scopul determinării debitului turbinat

Motivele şi necesităţile pentru efectuarea probelor, determinărilor debitmetrice la centralele hidroelectrice de mică cădere sunt multiple. Câteva dintre aceste motive posibile sunt: ● Testarea eficienţei energetice de funcţionare a hidroagregatelor din centralele hidroelectrice, cuprinzând testele de acceptare a maşinilor noi sau retehnologizate, evaluarea stării reale a hidroagregatelor în faza de planificare a proiectelor de retehnologizate sau optimizarea a camelor combinatorice; ● Calibrarea prizelor de presiune diferenţială cu metoda Winter-Kennedy sau a altor dispozitive de măsură a presiunii diferenţiale utilizare în realizarea unor instalaţii debitmetrice permanente; ● Managementul eficient al apei în sistemele fluviale, calibrarea caracteristicilor de ieşire; ● Reglarea nivelului râurilor în contextul navigaţiei sau al turismului

Cu toate acestea, astfel de teste/măsurători sunt rareori efectuate la centralele hidroelectrice de mică cădere. Multe dintre aceste centrale hidroelectrice, care funcționează de zeci de ani, nu au fost niciodată verificate, testate cu ajutorul unor metode de determinare a debitului absolut. Adesea efortul de a efectua astfel de determinari in situ este considerat a fi prea mare. Unul dintre motivele pentru care nu se efectuează determinări de debite absolute este faptul că o corelaţie optimă a camelor combinatorice la turbinele Kaplan cu dublu reglaj poate fi efectuată fără cunoaşterea debitului absolut. Contractele de noi

proiecte hidroenergetice sau proiecte de retehnologizare a echipamentelor şi instalaţiilor din centralele hidroelectrice se bazează, în cea mai mare parte, pe teste pe model a turbinelor hidraulice sau pe hidroagregate mai mici, sau chiar pe simularea numerică a debitului.

Cu toate că principalele metode utilizate pentru determinările debitmetrice in situ sunt descrise în standardele de măsurători, atunci când se planifică astfel de probe in situ, adesea se întâlnesc numeroase probleme la aceste centrale hidroelectrice de mică cădere, deoarece, printre altele, debitul de intrare nu este uniform, admisia este prea scurtă, sau nu pot fi utilizate nişele batardourilor amonte pentru a putea fi instalate grinde hidrometrice de amplasare a moriştilor hidrometrice. Măsurătorile efectuate în aval de hidroagregat, la ieşirea din conul de aspiraţie al turbinei, nu sunt fezabile datorită turbulenţelor mari, distribuţiilor neuniforme ale vitezei, şi chiar refluxului local. Bulele de aer din debitul de ieşire fac imposibile orice tip de măsurări acustice de determinarea a debitului.

3. Metode de determinare a debitului turbinat

Se prezintă câteva metode de determinarea a debitului ce pot fi utilizate în cazul centralelor hidroelectrice de mică cădere.

a) ***Metoda arie-viteză, cunoscută şi sub numele de metoda moriştilor hidrometrice.*** Acest tip de metodă de determinare a debitului este explicat printr-o campanie de măsurători in situ efectuată recent la centrala hidroelectrică de mică cădere (CHE) Zăneşti de pe râul Bistriţa din România [7]. Moriştile hidrometrice au fost montate pe o grindă hidrometrică mobilă şi amplasate în nișa batardourilor, după grătarul amonte centralei şi ajustate în direcția principală a curgerii apei.

Fig.1 Grindă hidrometrică mobilă pentru amplasarea moriştilor hidrometrice

În conformitate cu codul de măsurători CEI 60041 numărul de puncte de măsură ale vitezelor punctuale necesare determinării debitului turbinat în secțiune de măsură de 16,32 m^2, de la CHE Zăneşti a fost cuprins între 61 şi 92. Pentru a respecta această prevedere a codului de măsurători s-au efectuat măsurători pe 10 paliere cu 9 morişti amplasate

pe grindă hidrometrică mobil, rezultând un număr total de 90 puncte de măsură ale vitezelor punctuale. Unghiul mediu de amplasare al moriştilor hidrometrice (β) în secţiunea de măsură a fost de 150. Unghiurile (α) între normala la secţiunea de măsură şi tangenta la liniile de curent ale curgerii pentru cele 10 paliere de măsură au fost: α_1 - 15^0; α_2 - 13^0; α_3 - 11^0; α_4 - 9^0; α_5 - 8^0; α_6 - 8^0; α_7 - 7^0; α_8 - 7^0; α_9 - 6^0; α_{10} - 5^0

Aceste unghiuri au fost reprezentate grafic în figura 2.

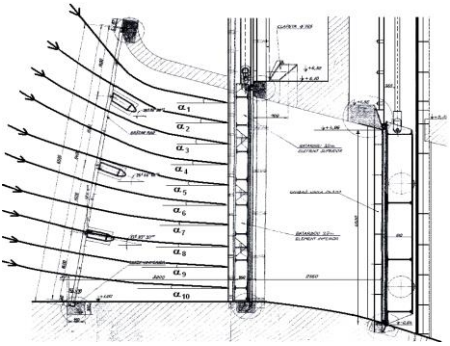

Fig. 2 Secţiune transversală prin CHE Zăneşti şi reprezentarea unghiurilor de măsură pentru celor zece paliere de măsură

Fiecare din cele două turbine din CHE Zăneşti are în componentă două nişe de intrare, acestea au fost măsurate una după alta. Datorită poziţionării grindei hidrometrice pe 10 nivele în fiecare priză, durata de măsurare pentru un regim de funcţionare a durat 1,3 ore. Variaţiile minore ale puterii şi căderii au fost compensate prin ponderarea vitezelor pentru fiecare poziţie a grinzii hidrometrice.

Pentru fiecare regim de măsură, pentru integrarea debitului s-au utilizat un total de 90 de viteze locale în fiecare intrare şi un număr de 180 de viteze locale pentru fiecare turbină. Deoarece secţiunile de măsură au fost rectangulare, integrarea a fost efectuată în conformitate cu ISO 3354 cu o interpolare spline cubică şi cu metoda Simpson [8]. Pentru regimurile de lucru măsurate, debitul turbinat a variat de la 18 m^3/s la 26 m^3/s. În codul de măsurători CEI 60041 metoda moriştilor hidrometrice este singura metodă recomandată pentru determinarea debitului absolut în secţiuni de măsură convergente.

b) ***Metoda scintilaţiei acustice.*** Metoda de scintilaţie acustice nu este încă considerată o metodă absolută în standardele CEI şi ASME. Cu toate acestea, testele comparative recente arată rezultate promiţătoare pentru această metodă. În timpul efectuării testelor cu metoda scintilaţiei acustice, trei emiţătoare aranjate sub formă de triunghi sunt plasate pe o parte a secţiunii de măsură şi trei receptoare, pe de altă parte. Astfel se poate determina o viteză medie şi un unghi de debit mediu al debitului, perpendicular pe căile acustice. Efectuând

măsurători pe nivele multiple, devine posibilă integrarea debitului printr-o secţiune transversală dată.

Principiul acestei metode se bazează pe perturbaţiile produse unui impuls acustic de către structurile turbulente prezente în cadrul curgerii, adăugând o anumită cantitate de dispersie aleatoare ("scintilaţie") la semnalul recepţionat. Deşi distanţele între senzorii de transmisie şi între senzorii de recepţie sunt scurte, structurile turbulente sunt modificate doar într-o măsură mică (ipoteza lui Taylor) totuşi semnalele recepţionate sunt deplasate printr-o întârziere de timp. Această întârziere este determinată prin efectuarea unei corelaţii încrucişate şi reprezintă o măsură a vitezei medii de curgere în secţiunea de măsură.

Recent, Societatea Americană a Inginerilor Mecanici (ASME) şi Centrul pentru Progresul Energiei prin Inovare Tehnologică (CEATI) au sponsorizat teste comparative pentru efectuarea de măsurători debitmetrice la centralele hidroelectrice cu prize de admisie scurte [9]. Aceste teste au fost efectuate de BC Hydro la centrala hidroelectrică Kootenay Canal, centrală cu patru hidroagregate. Deşi centrala nu este o centrală tipică de mică cădere, secţiunea de admisie are designul unei secţiuni de admisie convergente caracteristică centralelor de mică cădere. Pentru această campanie de măsurare a fost creat un cadru mobil pentru a putea fi amplasat în nişele batardourilor amonte. În acest cadru s-au montat senzorii acustici pentru metoda de scintilaţie, precum și o bară mobilă verticală cu 14 morişti hidrometrice, aşa cum este arătat în figura 3. Este important de menţionat că nişele batardourilor amonte şi cadrul mobil au fost în aval de grătarul amonte al centralei. Turbulenţele de mici dimensiuni provocate de barele grătarului amonte sunt esenţiale pentru a avea o calitate bună a semnalului necesar metodei scintilaţiei.

Fig. 3 Cadrul mobil pentru metoda scintilaţiei şi metoda moriştilor hidrometrice

Măsurătorile au fost efectuate ca aşa-numitele ″blind tests″, ceea ce înseamnă că rezultatele debitmetrice obţinute nu au fost discutate între participanţii la testare în timpul efectuării testelor.

În cadrul acestor teste rezultatele obţinute cu metoda scintilaţiei au fost foarte bune fiind destul de apropiate de valorile de referinţă. În cadrul acestor teste rezultatele obţinute cu metoda scintilaţiei au fost foarte bune fiind destul de apropiate de valorile de referinţă.

c) Metoda acustică a timpului de tranzit. Standardele CEI şi ASME descriu în detaliu procedurile necesare pentru aplicarea metodei acustice a timpului de tranzit cu mai multe căi (ATT). Cu toate acestea, aplicaţia metodei este limitată la secţiuni circulare şi dreptunghiulare în conducte drepte. În centralele de mică cădere, de obicei, nu există secţiuni drepte, adesea sunt întâlnite secţiuni convergente. În principiu, instalarea senzorilor acustici în secţiuni convergente este posibilă, însă nu este disponibilă o metodă standard pentru evaluarea debitului. O abordare teoretică a măsurătorilor efectuate cu metoda acustică în centrale cu secţiuni variabile este descrisă în [10].

Pentru aplicarea metodei acustice a timpului de tranzit la centrala hidroelectrică Wettingen de la râul Limmat din Elveţia [11], singura locaţie posibilă de amplasare a senzorilor acustice a fost în secţiunea convergentă, chiar în amonte de vana fluture de admisie (figura 4). Principala provocare a constat în faptul că forma secţiunii transversale s-a schimbat de la rectilinie la circulară de-a lungul căilor acustice.

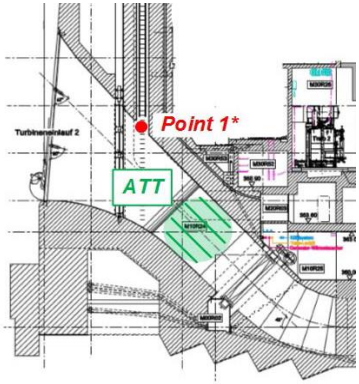

Fig. 4 Aplicarea metodei acustice a timpului de tranzit în secţiuni convergente

În centrala hidroelectrică Wettingen toate cele trei hidroagregate au fost dotate cu instalaţii de măsură cu senzori acustici, iar corelaţia camei combinatorice poate fi optimizată pentru fiecare turbină Kaplan. Instalaţiile debitmetrice cu senzori acustici permanente vor permite, de asemenea, determinarea cantitativă a creşterii eficienţei odată cu înlocuirea vechilor turbine cu altele noi în cazul unui proiect de retehnologizare. Unul dintre avantajele metodei acustice asupra metodei moriştilor hidrometrice este faptul că o astfel de instalaţie debitmetrică cu senzori acustici poate fi utilizată permanent, iar operatorul centralei este capabil să monitorizeze continuu performanţele hidroagregatelor din centrală. Timpul de testare pentru a determinarea corelaţia optimă a camelor combinatorice este mult mai scurt în comparaţie cu măsurătorile realizare cu morişti hidrometrice. În mod

tipic, durata pentru obţinerea datelor pentru un punct de operare durează doar aproximativ 5 minute.

4. Comparaţie între metodele de determinare a debitului la centralele hidroelectrice de mică cădere

O comparaţie interesantă între metodele de determinare a debitului turbinat în funcţie de starea de dezvoltare actuală a metodei şi costul estimativ de aplicare al metodei a fost realizat de către cercetătorii suedezi de la Swedish Hydropower Centre (Svenskt Vattenkraftcentrum, SVC), în tabelul 1 (Metode de determinare a debitului turbinat la o centrală hidroelectrică). În acest tabel sunt prezentate metodele de măsură utilizate, starea de dezvoltate actuală a metodei utilizate şi costurile aferente de aplicare a metodei.

Tabelul 1

Metoda	Tip	Stadiul de dezvol-tare *1	Stadiul de dezvol-tare *2	Estimarea nefunc-ţionare *3 în zile	Estimare cost (mii coroane suedeze)	Estimare cost (mii euro)	Estimare cost (mii lei)
Winter-Kennedy	relativă*4	2	2	1/2	200	23,364	103,8
Gibson	absolută	4	1	1/2	200	23,364	103,8
Timpului de tranzit	absolută	5	3	3	1000	116,822	519
sintilatiei	absolută	3	2	3	1000	116,822	519
Doppler	absolută	2	1	3	1000	116,822	519
Moriştilor hidrometrice	absolută	5	5	0	<1000	116,822	519
Dilutiei	absolută	2	1	0	200	23,364	103,8
Volumetrică	absolută	1	1	1	200	23,364	103,8
Test pe model	absolută /model*5	5	5	0	5000	584,112	2 595

Scala: 1 - foarte slab, 2 - slab, 3 - mediu, 4 - bun, 5 - foarte bun

*1 Stadiul de dezvoltare independent de cădere

*2 Stadiul de dezvoltare pentru centrale de mică cădere

*3 Estimarea timpului de producţie pierdut cu instalare grătare senzori şi măsurarea dimensiunilor specifice

*4 Presupunând că prizele de presiune sunt bune

*5 Măsurătoarea absolută pe model şi apoi scalată pe prototip

Măsurătorile efectuate pentru testarea metodei acustice a timpului de tranzit în centrala hidroelectrică Kootenay Canal au arătat o bună precizie a acestei metode ± 1%. Utilizarea acestei metode în realitate pentru secţiuni de măsură reprezentate de aducţiuni scurte cu secţiune variabilă, caracteristice centralelor hidroelectrice de joasă cădere, necesită un număr

mare de căi acustice de măsură pentru a putea obţine o incertitudine bună a valorii debitului măsurat. Acest lucru duce la un preţ ridicat al acestei metode de măsură a debitului. Din tabelul 1 se poate observa preţul prohibitiv (preţul senzorilor de măsură, al cablurilor necesare pentru conexiuni şi al softului aferent) în momentul de faţă, pentru a putea aplica metoda acustică a timpului de tranzit în măsurarea debitului la o centrală hidroelectrică.

Un alt dezavantaj al acestei metode îl reprezintă necesitatea golirii camerei de încărcare pentru a putea monta senzorii acustici de măsură, operaţie ce implică nefuncţionarea centralei timp de câteva zile (conform tabelului 1, 3 zile). Tot din tabelul 1 se poate observa că metoda moriştilor hidrometrice este o metodă al cărei grad de dezvoltare/cunoaştere poate fi cuantificat ca fiind o valoare maximă, comparabilă doar cu cea a metodei studiului pe model, dar al cărei preţ este însă de câteva ori mai mare.

În comparaţie cu alte metode de măsură a debitului, metoda moriştilor hidrometrice este cea care oferă cea mai completă imagine a spectrului curgerii în secţiunea de măsură prin trasarea profilului real al vitezelor. Celelalte metode de măsură ale debitului au multe condiţii greu de acceptat, cum ar fi un grad ridicat de incertitudine şi mai ales configuraţia secţiunii de măsură (aducţiuni reprezentate de conducte scurte şi debit mare de apă). Acest gen de observaţii privind alegerea metodei de măsură a debitului la centralele hidroelectrice au fost făcute de către cercetătorii de la Ontario Power Generation şi New York Power Autority la conferinţa internaţională: International Group on Hydraulic Efficiency Measurement.

5. Concluzii

■ Măsurătorile de debite turbinate în centralele hidroelectrice de mică cădere sunt posibile, iar eforturile implicate sunt, în majoritatea cazurilor, justificabile din punct de vedere economic. Metoda aleasă trebuie adaptată la obiectivele individuale ale campaniei de măsurători şi la situaţia locală întâlnită în fiecare centrală.

În funcţie de metoda aleasă, precizia măsurării debitului va fi de unu sau două procente, în condiţiile corespund cerinţelor menţionate în standarde. Dacă se planifică teste comparative sau se va optimiza corelaţia camei combinatorice, pot fi luate în considerare şi măsurătorile index (metoda Winter-Kennedy), dacă valoarea absolută a debitului nu este neapărat necesară.

■ Metoda de scintilaţie acustică este o metodă nouă şi promiţătoare, cu avantajul important că debitul perpendicular pe secţiunea transversală poate fi măsurat (de exemplu, în nişele batardourilor), neinvaziv, cu un cadru care poate fi mutat cu uşurinţă dintr-o nişă în altă nişă în cazul centralelor hidroelectrice de mică cădere cu mai multor hidroagregate.

■ În urma comparaţiilor efectuate în cadrul lucrării (luând în considerare încercările depuse până în prezent de diverse echipe de cercetători pentru dezvoltarea altor metode de determinare a debitului) s-a constatat că deşi în ultima perioadă s-au dezvoltat noi metode de măsură a

debitului (de exemplu metodele acustice) metoda moriştilor hidrometrice rămâne o metodă de bază în măsurarea debitului la centralele hidroelectrice, de multe ori ea fiind folosită ca o metodă etalon de comparaţie pentru alte metode debitmetrice.

BIBLIOGRAFIE

[1] * * * CEI 60041, Field acceptance tests to determine the hydraulic performance of hydraulic turbines, storage pumps and pumps-turbines. Geneva, Switzerland, CEI 3rd edition, 1991

[2] * * * SR EN 60041, Încercări de recepţie efectuate pe maşina reală, pentru determinarea performanţelor hidraulice ale turbinelor, pompelor de acumulare şi turbinelor – pompe. Prima ediție, București 2003

[3] * * * ISO 3354, Measurements of clean water in closed conduits. Velocity-area method using current-meters in full conduits and under regular flow conditions. ISO 3rd edition 2008

[4] * * * PE 301, Regulament de exploatare a instalaţiilor de turbine hidraulice din centralele hidroelectrice, Editura ICEMENERG, Bucureşti 1994

[5] * * * CEI 62006, Hydraulic machines. Acceptance tests of small hydroelectric installations. Geneva, Switzerland, CEI 1st edition, 2010

[6] * * * ASME PTC 18, American National Standard, Hydraulic turbines and pump-turbine performance test codes. American Society of Mechanical Engineers, New York, USA, 2011 (consolidation of ASME PTC 18-1992 and ASME PTC 18.1-1978).

[7] * * * ICEMENERG, Determinarea parametrilor de performanţă la hidroagregatele din che Zăneşti. Contr. nr. 18/2016

[8] C Purece, S. Dumitrescu, I. Cernica, Improvement of measurements for the assessment of operational efficiency of the hydropower plants. Proc. Journal of Hydraulic Engineering (ISH), ISSN 0971-5010, Volume 22, Issue 2, 2016, pp. 142-147

[9] C.W Almquist, Short Converging Intake Comparative Flow Rate Measurement Tests at Kootenay Canal. CEATI Project No. T092700-0358, Centre for Engineering Advancement through Technological In-novation, Montréal, Québec, Canada, 2011

[10] S. Marushchenko, P. Gruber, T. Staubli, Approach for Acoustic Transit Time flow measurement in sections of varying shape: Theoreti-cal fundamentals and implementation in practice. Elsevier,
Flow Measurement and Instrumentation 49, 2016

[11] B. Aakti, T. Staubli, A. Abgottspon, Discharge Measurement in a Short Intake with a Converging Section - a Case Study. Vienna Hydro, 2014, Austria

[12] M. Cervantes, G. Andrée, P. Klason, Flow measurements in low head hydro power plants. Svenskt Vattunkraft Centrum (SVC), Elforsk report 12-61 / 2012

Dr. Ing. Cristian PURECE
INCDE ICEMENERG București; e-mail: cristianicemenerg@yahoo.com
Dr. Ing. Valeriu PANAITESCU, profesor universitar emerit
UPB București, Facultatea de Energetică;
e-mail: valeriu.panaitescu@yahoo.com