

МЕРЕЊЕ ПРОТОКА ВОДЕ НА ВЕЛИКИМ ЦЕВОВОДИМА

FLOW MEASUREMENT ON LARGE DIAMETER PIPES

ДУШАН ПРОДАНОВИЋ, ДРАГУТИН ПАВЛОВИЋ*

Мерење протока у системима под притиском је вечна тема која произвођаче тера на стално нова усавршавања постојећих метода и развој нових. У овом раду се приказују теоријске основе рада ултразвучних мерила протока која раде на принципу Transit Time и који се у последње време често користе за мерења на цевоводима великих пречника. Након теоријског приказа, указује се на добре али и слабе тачке тих система, које произвођачи обично не наглашавају. У раду се критикује садашња пракса уградње таквих мерила без претходне њихове провере као и без могућности накнадних, контролних провера. На примеру резултата мерења обављених у току ове године, показује се да постоји сумња у декларисану тачност уграђених ултразвучних мерила и да је неопходно развити методологију њихових прегледа.

Кључне речи: мерење протока, ултразвучна мерила протока, тачност мерења протока

Flow measurement in pressurized systems is everlasting topic that drives the manufacturers into new developments. The theoretical background of Ultra Sound method, based on Transit Time is given in this paper. That type of device has become the common in Waterworks, specially for large diameter pipes. The good, but also the weak points of used system, normally not mentioned by manufacturers, are discussed. The common practice of installation of such devices without any check of accuracy, same as installation on sites where there is no possibilities for later inspection is criticized in this paper. The results of conducted check measurements of several newly installed flow meters indicates that declared flow accuracy was not achieved, and that methodology for their regular inspection has to be developed.

Key words: flow measurement, ultra sound flow meters, accuracy of flow metering

1. Увод

Стари систем пословања већине Водовода је био да се цена воде формира тако да трошкови рада буду покривени од средстава која се прикупе од потрошача на основу фактурисаних количина. Такав систем није водио бригу о стварним пословним показатељима рада Водовода, а пре свега о губицима воде у систему. У већини Водовода је било довољно расположиве воде, тако да је потрошња могла бити задовољена без обзира на губитке. Брига о мерењу протока се сводила само на бригу око излаза из система, око водомера, код самих потрошача. Улаз у систем је у већини случајева био непознат и одређиван је паушално.

* Др Душан Продановић, доцент, Мр Драгутин Павловић, асистент, Институт за хидротехнику, Грађевински факултет Универзитета у Београду, Булевар краља Александра 73, Београд.

Међутим, са повећањем цене пумпања и прераде воде, као и уз промену политике плаћања такси за коришћење воде по којој ће се наплаћивати узета вода из природе а не фактурисана вода потрошачима, као и уз постепено ограничење расположиве воде која се може јефтино захватити, почиње да се намеће потреба за прецизнијим праћењем количина воде и у сфери захвата и дистрибуције. А као резултат тих мерења, почиње и борба са губицима. Смањењем губитака, Водоводи постају савремена предузећа која се брину о билансу робе коју производе, чисте пијаће воде.

Да би се правилно билансирао рад Водовода, морају се знати количине воде која се захвати из изворишта (бунари, реке, каптаже), количине које се дистрибуирају дуж главних дистрибутивних праваца, количине које улазе у поједине зоне потрошача и на крају количине коју потрошачи преузму (водомери). При томе **свака од величина у билансу носи са собом и одређену непоузданост, грешку мерења**. До сада су у овом мерном ланцу једино водомери били обухваћени редовном контролом и прегледом (што је и регулисано законима). Услови за мерење протока воде од захвата до зона потрошње у дистрибутивном систему нису законски прецизирани, као ни услови за редован периодични преглед.

Посао прегледа мерила протока на захвату воде, као и на дистрибуционим цевоводима, носи низ проблема. Један од највећих проблема је немогућност да се мерило једноставно извади и однесе у неку баждарницу (као што је то могуће са водомерима) јер су то мерила великих пречника, на линијама снабдевања која не смеју остати дуго ван употребе. Такође, због великих пречника мерила, њихова набавна цена као и цена прегледа је велика (мада је јединична цена великог мерила, у динарима по м³ воде која протекне кроз мерило, знатно мања од јединичне цене малих водомера кроз које прође сразмерно мала количина воде).

У последње време се, захваљујући донацијама и кредитима, почело са уградњом већих мерила по Водоводним системима. То су по правилу ултразвучна мерила, која раде на принципу мерења времена путовања звука (Transit Time). Њихова уградња је релативно једноставна, не захтевају уградњу нових FF комада са прирубницама, већ се уграђују директно на постојећу цев, а цена не зависи од пречника цеви. Овај тип мерила може у добрим радним условима да постигне тачност испод 1%.

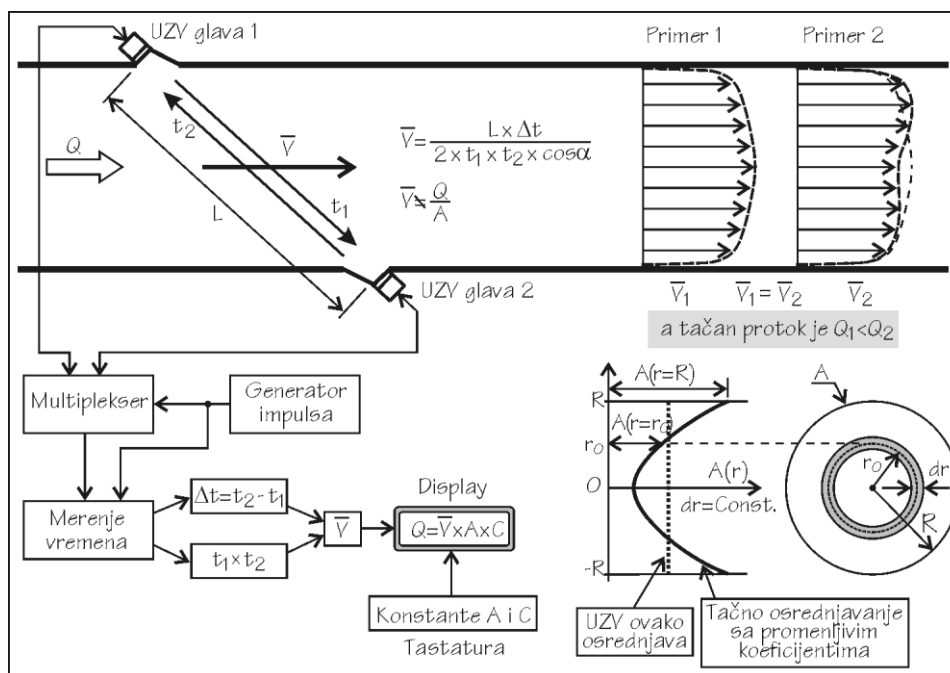
У овом раду ће се прво дати основе методе мерења протока ултразвучном методом Transit Time. Затим ће се нагласити које су скривене опасности у примени овакве методе да би се на крају дао и пример обављених контролних мерења на једном од значајнијих чворова на систему Београдског водовода, на Бановом Брду. Из датог примера ће се видети да постављена мерила често не постижу декларисане параметре, а да при томе корисник и нема баш неких могућности да то докаже. На крају рада се дају препоруке Водоводима да се, приликом набавке овакве опреме, постарају и о начинима будућих прегледа мерила (као што сваки већи Водовод има баждарницу за преглед водомера).

2. Мерење протока у цеви ултразвучном методом Transit Time

За мерења протока у цеви под притиском су развијене разне методе. Најчешће су у употреби турбинска мерила, јер практично сви водомери спадају у ту класу.

Код мерила већег пречника, до скоро су најзаступљенија била електромагнетна мерила. Њихова цена директно зависи од пречника, јер захтевају одређен прав комад цеви на коме се у фабрици праве намотаји и уграђују мерне електроде. Према садашњим произвођачким ценама, за мерила изнад пречника 350 до 400 мм, ова метода није рентабилна.

Ултразвучне методе мерења протока у системима под притиском су познате и коришћене у нашим водоводима већ више од 20-так година¹. У те методе спадају, у уводу већ поменута Transit Time метода (која ће бити детаљније објашњена), доплерова метода која је веома популарна код преносних мерила ниже тачности, Sing Around метода за цеви мањег пречника, и најновије две методе које омогућавају истовремено мерење брзина у више тачака: Ассoustic Dopler Velocimetry (напредан доплеров принцип са сондама које морају бити у контакту са флуидом) и ултразвучни корелаторски метод. Од свих побројаних метода, најробуснија и најтачнија је Transit Time метода, која се по правилу користи на већим мерним системима.



Слика 1. Принцип рада ултразвучног мерила Transit Time (леви део слике) са примером када мерило ради тачно (1) и када греши (2) у обрачуну протока (десни горњи део слике) и разлогом мерне непоузданости (десни доњи део слике)

На слици 1. са леве стране, је приказан основни принцип рада ултразвучног мерила Transit Time. Две ултразвучне главе су монтиране под углом α у односу на ток воде. Наизменично, прва глава емитује кратак ултразвучни импулс а друга га

¹ Прво ултразвучно мерило је купио Београдски Водовод и Канализација од фирме Ritmajer, Швајцарска.

прима, при чему електроника мери време путовања звука t_1 . У другом циклусу, друга глава емитује импулс, а прва га прима, при чему је време путовања импулса сада t_2 . Због сабирања вектора брзина у првом случају, и одузимања у другом, измерена времена су t_1 и t_2 , односно, разлика тих времена Δt :

$$t_1 = \frac{L}{c + \bar{V} \cos \alpha} \quad t_2 = \frac{L}{c - \bar{V} \cos \alpha} \quad \Delta t = t_1 - t_2 = \frac{2 \times L \times \bar{V} \cos \alpha}{c^2 - \bar{V}^2 \cos^2 \alpha}$$

У датим изразима, c је брзина простирања ултразвука у води, која зависи од температуре воде и густине. Брзина \bar{V} у изразима **није средња профилска брзина** која се дефинише као Q/A већ је **просек брзина дуж пута ултразвука**.

Пошто је брзина \bar{V} знатно мања од брзине простирања ултразвука c , члан $\bar{V}^2 \cos^2 \alpha$ се може изоставити из претходног израза, па је разлика времена Δt :

$$\Delta t = \frac{2 \times L \times \bar{V} \times \cos \alpha}{c^2}$$

Ако се мери Δt , из претходног израза је могуће одредити брзину \bar{V} а на основу ње израчунати проток. Међутим, резултат мерења знатно зависи од брзине ултразвука у води, што је величина која није константна нити позната у напред. Ако се поред разлике времена, електроником измери и производ времена t_1 и t_2 , $t_1 \times t_2$ добија се:

$$t_1 \times t_2 = \frac{L}{c + \bar{V} \cos \alpha} \times \frac{L}{c - \bar{V} \cos \alpha} = \frac{L^2}{c^2 - \bar{V}^2 \cos^2 \alpha}$$

Уз занемарење члана $\bar{V}^2 \cos^2 \alpha$, претходни израз се своди на:

$$t_1 \times t_2 = \frac{L^2}{c^2}$$

Ако се из добијеног израза извуче квадрат брзине пропагације ултразвука

$$c^2 = \frac{L^2}{t_1 \times t_2}$$

и замени у израз за Δt :

$$\Delta t = \frac{2L\bar{V} \cos \alpha}{\frac{L^2}{t_1 \times t_2}} \Rightarrow \frac{\Delta t}{t_1 \times t_2} = \frac{2 \times \bar{V} \times \cos \alpha}{L}$$

може се одредити брзина \bar{V} тако да више не фигурише брзина ултразвука c :

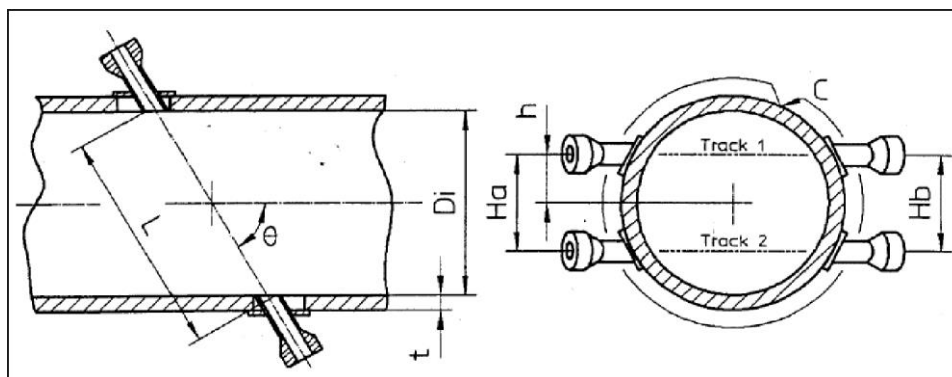
$$\bar{V} = \frac{L \times \Delta t}{2 \times t_1 \times t_2 \times \cos \alpha}$$

Добијени израз показује да је измерена брзина \bar{V} зависна од геометрије (дужина L и угао α) и мерених времена t_1 и t_2 . Како су дужина, угао и време основне јединице, следи да ултразвучни систем мерења брзине \bar{V} спада у **апсолутна мерила**, мерила која **није потребно калибрисати**. Ово је истовремено и најјачи аргумент свих произвођача опреме, којим убеђују корисника (Водоводе) да мерило након уградње одмах проради тачно, без провера и нападних контрола. Чак се инсистира на потпуном затрпавању мерила, гарантујући да ће оно увек добро радити.

3. Да ли су апсолутна мерила Transit Time "апсолутно тачна"

Тврдња из претходног поглавља, да су ултразвучна Transit Time мерила апсолутна мерила, је тачна само ако се она користе за мерење брзине \bar{V} , **средње брзине дуж путање ултразвука**. На жалост, **та брзина није од неке велике користи Водоводима. Мерило треба да показује тренутни проток!** Да би се израчунао проток, међутим, потребно је измерену брзину \bar{V} кориговати са неким фактором C , и онда помножити са протицајним пресеком A . Фактор C , међутим, **зависи од струјне слике у цеви и није апсолутна величина**.

У доњем десном углу слике 1. је приказан попречни пресек кроз цев, са кружним прстеновима на полупречнику r , исте дебљине dr . На дијаграму поред пресека приказана је промена површине кружних прстенова (за константан dr) у функцији удаљења од центра цеви. Површине прстенова ближих зиду цеви су веће, па је самим тим и допринос брзине воде на проток, у зони ближе зиду, већи. Кад би ултразвучна Transit Time метода могла да примени различите тежинске коефицијенте на брзине дуж пута L (веће коефицијенте ближе зиду а мање у средини цеви), добила би се идеална метода за мерење протока. Тада би вредност коефицијента C била 1.00. На жалост, то није тако, већ се користи константна вредност (испредикада линија на дијаграму на слици 1.).



Слика 2. Ултразвучно мерило са два пара глава, чиме се смањује утицај неравномерности профила брзина на обрачун протока (слика из каталога SONOFLOW – SonoKit, произвођача Danfoss)

У горњем десном углу слике 1. су приказана два случаја, са различитим профилима брзина у цеви. У оба случаја ће мерило показивати исти проток, јер је измерена брзина \bar{V} иста. У првом случају, где профил брзина одговара идеалном профили, измерени проток ће бити тачан, док ће у другом показивати мањи проток од стварног, јер није у стању да коректно обрачуна већи утицај брзине уза зид цеви!

Из изложеног принципа рада мерила, следи да је **мерило осетљиво на место уградње** и да се препоручује да испред мерила постоји дугачка права деоница цевовода. Да би се барем мало смањио утицај неравномерности профила брзина на мерење протока, произвођачи уграђују два (слика 2.) или више пари ултразвучних глава. На примеру једног произвођача, на слици 2. види се да ултразвучни траг уопште не мери брзине у средини цеви, јер оне дају најмањи допринос протоку, већ се већа тежина даје брзинама ближе зиду цеви.

4. Закључак о мерилима Transit Time

Из описа рада ултразвучних мерила Transit Time, следи да су то сигурно веома поуздана мерила, знатно јефтинија од других метода мерења протока на цевоводима великог пречника, са могућношћу уградње без већих грађевинских радова. Избором броја мерних глава и квалитетом система за мерење времена (што није једноставан задатак, јер је потребно постићи мерење времена са резолуцијом реда величине 1 ns односно 10^{-9} s), произвођач може у напред да предвиди максималну тачност уређаја.

На жалост, и даље је овај мерни метод зависан од услова уградње (може се накнадно снимити и кориговати) али и струјања у цевоводу. Да би се постигла фабрички предвиђена мерна тачност, потребно је испунити услове о правилном (идеалном) распореду брзина у цевоводу. Како је то практично немогуће обезбедити на већини мерних локација, остаје велико питање како квантификовати стварну мерну тачност.

Стандардна процедура провере неког мерила протока је да се он скине са инсталације и однесе у овлашћену Лабораторију, где се симулирају слични мерни услови и где се мерило упореди са неким тачнијим, радним еталонским мерилом. За велика ултразвучна мерила, која су фиксно монтирана на цевовод, оваква метода провере је немогућа. Једна од могућих метода у том случају је снимање профила брзине кроз цевовод, сондом која мери брзину у тачки – микрокрило, електромагнетна сонда, топли филм, ултразвучна сонда, Pittot-Prandtl-ова сонда, ласер доплер систем или неки други уређај. За постизање веће тачности, могуће је снимити профил брзина у више пресека. Интеграцијом тих снимљених брзина, добија се проток.

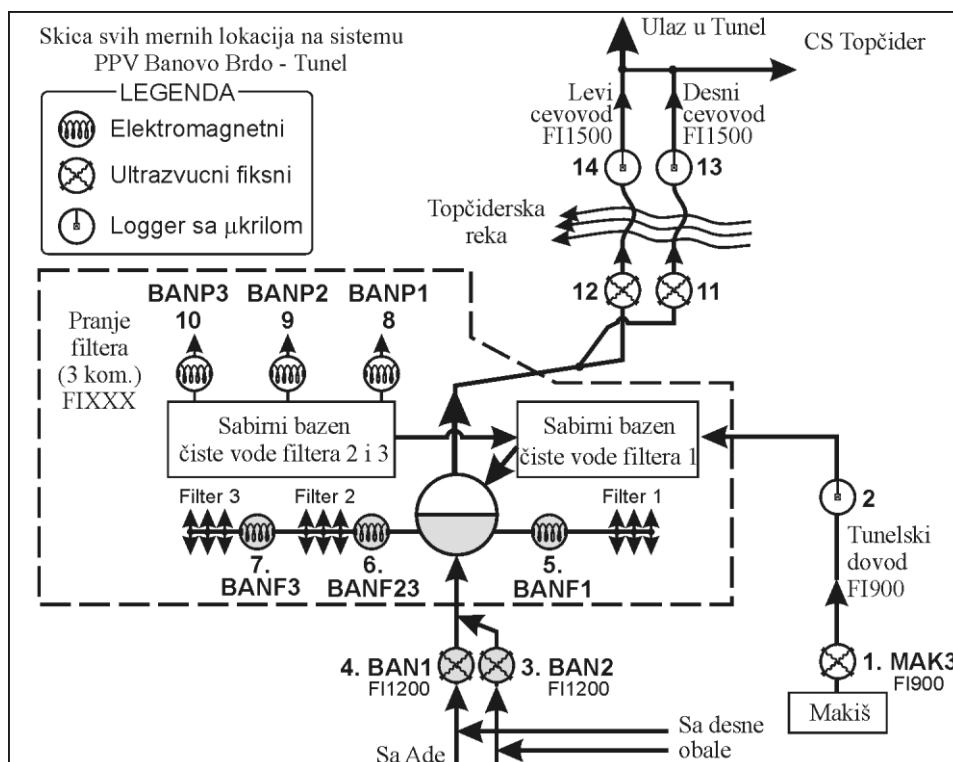
Мишљење аутора овог рада је, да је обавеза и произвођача ултразвучних мерила протока и корисника мерила, да о проблему провере тачности мерила на месту уградње, воде рачуна од самог почетка пројектовања мерног места. Произвођач мерне опреме би морао да **након уградње и пуштања мерила у погон, обезбеди први преглед мерила**, чиме би потврдио да мерило испуњава предвиђену класу тачности. Такође, произвођач треба да пропише услове и начин редовног прегледа, као и процедуре за преглед, водећи рачуна о потребној мерној класи.

5. Пример провере биланса вода на чворишту Баново Брдо

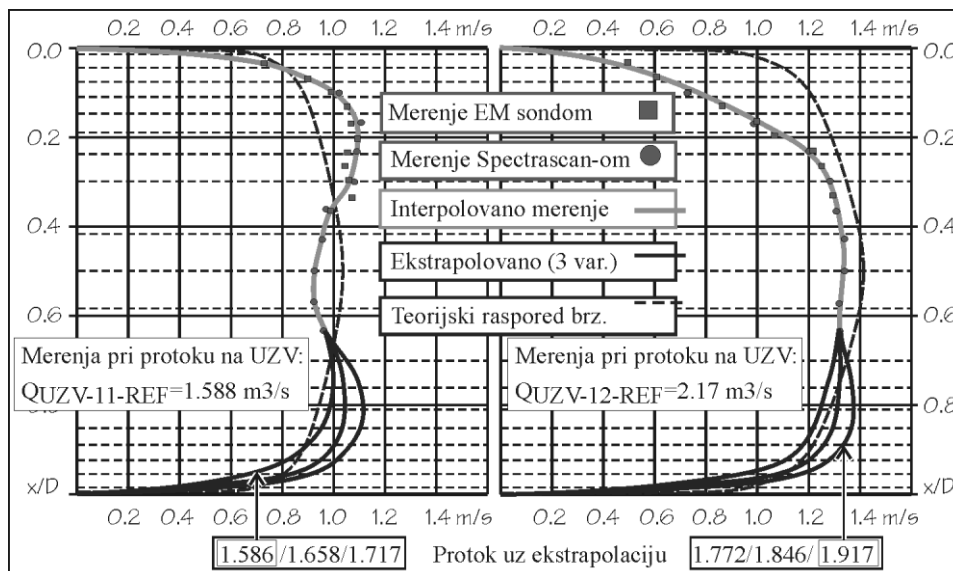
У последњих пар година Београдски Водовод је уградио већи број мерила протока којим покушава да контролише биланс воде. На слици 3. је приказано постројење Баново Брдо, са свим улазима сирове воде (са Аде и са десне обале Саве), чисте воде (са Макиша), сопственом потрошњом за прање филтера, акумулацијом у виду резервоара чисте воде и излазима, два цевовода преко реке Топчидер.

На свим већим правцима су постављена нова ултразвучна мерила са два пара глава, са декларисаном тачношћу од 0.5%. Прве анализе резултата мерења су показале да из постројења излази више воде него што улази! То је био сигнал да је неопходно детаљније проверити рад свих мерила и проценити стварну класу тачности са којима уређаји раде.

Прва мерења која су обавили стручњаци БВК-а, помоћу сонде за мерење брзине са микрокрилом, је потврдило сумњу да излазна мерила (број 11 и 12 на слици 3) показују веће протоке од стварних. Накнадно су обављена поновна мерења, помоћу сонди са микрокрилом и помоћу електромагнетне сонде, где су добијени распореди брзина на локацији 13 и 14 (низводно од прелаза цевовода преко Топчидерске реке), као на слици 4 (сива дебела линија, у горњој зони цевовода). У току мерења је вођено рачуна о неусталености протока коришћењем једне референтне сонде.



Слика 3. Скица чворишта Баново Брдо са свим мерним местима

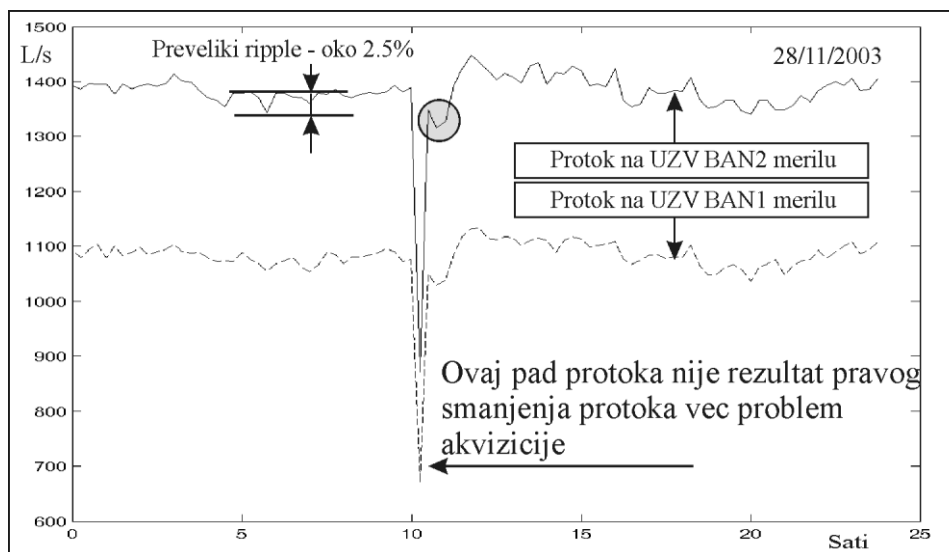


Слика 4. Снимање профила брзина у цевоводу преко Топчидерске реке и упоређење са идеалним профилем према протоку мереном УЗВ мерилима

Због прелаза цевовода преко реке, који је изведен у форми благог лука, знало се да измерени профил брзина на местима 13 и 14 неће бити идеалан, што се и види на слици 4. Међутим, ако се претпостави да је испред прелаза преко реке, на месту где су уграђени фиксни ултразвучни уређаји (локације 11 и 12) распоред брзина једнак идеалном, што се очекује за коректан рад ултразвучних мерила, тада би у мерним профилима 13 и 14 профила брзина требао да буде деформисан на сличан начин. Како то није случај, закључује се да ни на месту ултразвучних мерила, није постојао развијен профил брзина.

Постојећа мерна опрема није омогућавала да се сниме распоред брзина по целом пресеку, тако да је за потребе одређивања протока извршена екстраполација профила, према искуству аутора. Направљене су по три могуће линије екстраполација, са израчунатим протоцима. У случају профила 13. усвајањем највероватније линије са мањим протоком, добија се добро поклапање са фиксним мерилем 11, док у профилима 14 су одступања значајна: ни један начин екстраполације не може да "направи" проток једнак измереном на фиксном мерилу 12. Јасно је да је мерна неодређеност коришћене методе, где није снимљен цео профил, јако велика, али добијени резултати дефинитивно указује на погрешан рад уграђених мерила. При томе, произвођач мерила није предвидео никакву могућност да потврди или оповргне добијене резултате.

У оквиру направљене студије, проверена су и остала мерила протока. Показано је да, поред великог одступања у показивању укупног протока, већи број мерила има и велика тренутна одступања, флукуације показивања протока.



Слика 5. Велике флукуације тренутног протока указују на нестабилно струјно поље (поље брзина) у мерном профилу и проблем мерила да тачно одреди проток

На слици 5. су приказана показивања са дотока сирове воде са бунара на Ади и са бунара дуж десне обале Саве. Проток на том систему треба да буде константан, у периодима када ради исти број бунара. Међутим, облик дијаграма показује да, и поред великог осредњавања, постоје велике осцилације у показивању протока, што може да укаже на лоше одабрано мерно место, а што опет указује на могуће велике грешке у раду уређаја. У току израде студије, на жалост, није било могуће обавити снимање поља брзина на овим цевоводима, тако да није проверена претпоставка о тачности мерила. Такође, нису снимљена ни тренутна показивања протока на постављеним мерилима, како би се видело да ли су њихове флукуације и веће од приказаних на слици 5 (које су 15-то минутно осредњене).

6. Закључак

Напредак мерне технике је евидентан и треба га топло поздравити. Многе величине које је до јуче било тешко и скупо мерити, данас се са савременим уређајима лакше прате. Са додатком уређаја за континуално меморисање величина, као и слање путем стандардне мреже мобилних телефона, добијају се веома корисни и употребљиви системи.

Међутим, корисници не смеју бити заслепљени свим тим електронским чудима као ни шареним брошурама произвођача који обећавају да ће једноставно решити све проблеме. Основни постулати Хидраулике и Механике флуида показују да још увек није направљено мерило протока на великим цевоводима, које ће бити апсолутно мерило. Такође, основна трговачка логика говори да ако произвођач тврди да је мерило класе 0.5%, то он мора и доказати када се мерило пусти у погон. Ако се водомери редовно проверавају, па чак и када се купе нови и

од стране произвођача прегелдани, зашто то не би важило и за велике уређаје. У фази пројектовања мерног места треба размишљати о контроли уређаја и од произвођача треба тражити да реши тај проблем. Такође, треба инсистирати на примопредаја уређаја при којој треба доказати продату класу мерила.

Коришћена мерна опрема у приказаној студији билансирања воде на чвору Баново Брдо није омогућавала квалитетну контролну рада ултразвучних мерила, али је указала на проблеме и могућности за њихово превазилажење. Неопходно би било поновити мерења са савременијим сондама за мерење брзине (постоје сада сонде које могу у једном тренутку да сниме цео распоред брзина дуж једног правца), са вишом тачношћу и уз коришћење више мерних профила по једном мерном месту.

Литература

[1] Danfoss: *SONOKIT Product Manual for two track model*

[2] Максимовић Ч.: *Мерења у хидротехници*. Грађевински факултет Универзитета у Београду, Београд, 1993.

[3] Miller, R.W.: *Flow Measurement Engineering Handbook*, McGraw-Hill Book Company, 1983.

[4] Продановић Д. *Скрипте са предмета Мерења у хидротехници*. Доступне на http://hikom.grf.bg.ac.yu/web_stranice/KatZaHidr/Predmeti/Merenja/Glavna.htm

[5] Продановић, Д.: *Билансирање количина воде на систему сирове и чисте воде Баново Брдо – Тунел*. Студија рађена за потребе Београдског Водовода и Канализације, 2004.

[6] Радојковић М., Д. Обрадовић и Ч. Максимовић: *Рачунари у комуналној хидротехници – анализа, пројектовање, мређе и управљање*. Грађевинска књига, Београд, 1989.

[7] Станковић Д.: *Физичко техничка мерења – Сензори*. Универзитет у Београду, Београд, 1997.