

**SUVREMENE METODE MJERENJA FIZIKALNIH
VELIČINA U HIDRAULIČKIM LABORATORIJAMA**

prof. dr. Vladimir Andročec, dipl. inž. *
Građevinski institut
OOUR Fakultet građevinskih
znanosti - Zagreb

Sažetak

Na temelju obilaska većeg broja evropskih laboratorija, publikiranih materijala i vlastitog iskustva autor analizira suvremene metode mjerenja fizikalnih veličina u hidrauličkim laboratorijima. Prikazuju se novi mjerni instrumenti koji su uvedeni ili se danas uvađaju u hidrauličke laboratorije za mjerenje raznih fizikalnih veličina. Definiraju se zahtjevi koje trebaju ispuniti razna osjetila te se posebno navode standardne i opisuju nove tehnike mjerenja protoka, brzine, tlaka, strujanja, razine slobodne površine i sila te predviđa budući razvoj.

1. Uvod

Laboratorijska istraživanja hidrauličkih karakteristika raznih hidrotehničkih sistema ili njihovih dijelova su posljednje vrijeme u stalnom napretku. Posebno se to odnosi na mjerenja fizikalnih veličina na hidrauličkim modelima ili raznih dijelova sistema koji se u laboratoriju ispituju u prirodnoj veličini.

Razlozi za to su u zahtjevima korisnika da mjerenja budu opsežnija, kvalitetnija, upotrebljivija, često da opišu dinamičke karakteristike strujanja, te da se provedu u što kraćim rokovima kako bi objekti za koje se provode istraživanja bili optimalni sa tehničkog i ekonomskog stajališta.

Osnova mjernog procesa u laboratoriju je mjerni sistem koji se sastoji od zbroja:

osjetilo mjerne veličine + zapis mjerne veličine + obrada mjerne veličine

koji u svim svojim dijelovima treba odgovarati gore navedenim zahtjevima. Posljednja dva dijela zbroja su danas toliko napredovala da je već standard u većini laboratorija računarski sistem sa svim pomoćnim dijelovima koji rezultat mogu brzo obraditi i prikazati u bilo kojem grafičkom ili digitalnom obliku pogodnom za dalju upotrebu.

Cilj je ovog rada detaljnije analizirati suvremene trendove u primjeni raznih osjetila mjerne veličine kao prve i najznačajnije karike u procesu mjerenja. Podatke za analizu autor je uzeo iz vlastitog iskustva, obilaska većeg broja evropskih laboratorija i dostupne literature.

Osnove fizikalne veličine u hidrauličkim mjerenjima su protok brzina, tlak, strujanje, razina slobodne površine i sila čijim određivanjem su određene kinematičke i dinamičke karakteristike strujanja u nekom sistemu. U daljem tekstu će se posebno analizirati suvre-

* Rukovodilac centra za hidraulička istraživanja

mena mjerna osjetila za svaku od njih.

Zahtjevi koji se postavljaju na osjetila ili instrument za mjerenje kod mjerenja svake od navedenih fizikalnih veličina su slijedeći:

- točnost u širokom opsegu mjernog područja
- ponovljivost rezultata kod više uzastopnih mjerenja
- linearnost u cijelom području mjerenja
- mogućnost mjerenja u nestacionarnom režimu
- rijetko ili nepotrebno baždarenje
- laki pristup ili montaža na mjesto mjerenja
- što manja poremećenost toka fluida
- mala osjetljivost na temperaturne promjene
- mala osjetljivost na kvalitetu fluida
- ne smije biti erozije ili korozije
- potpuna razvijenost i uhodanost instrumenta
- jednostavno i rijetko servisiranje
- niska cijena

Naravno da je malo instrumenata koji mogu ispuniti sve navedene zahtjeve ali laboratoriji preferiraju one koji ispunjavaju najveći broj njih ili najvažnije.

2. Mjerenje protoka

Protok je najčešće osnovna fizikalna veličina kod laboratorijskih mjerenja. Razvijeno je niz klasičnih metoda mjerenja koje se uglavnom zasnivaju na mehaničkom principu mjerenja, npr. razlike tlaka (u zatvorenim sistemima) kao što su mjerna blenda ili Venturimetar, zatim ugrađeno krilo i slično, te za otvorene sisteme na principu volumetrije ili raznih vrsta preljeva. Svi sistemi su danas već toliko napredovali da se pomoću pretvaranja mjerne veličine u električni signal mogu uklopiti u suvremeni mjerni sistem sa računalom, a uglavnom služe za stacionarna mjerenja.

Međutim ona imaju i niz nedostataka koji se pokušavaju izbjeći razvojem novih instrumenata na raznim principima od kojih se neki ovdje navadaju.

2.1. Magnetsko - induktivno mjerilo protoka

Princip ovog savremenog beskontaktnog mjerila protoka zasniva se na Faraday-ovom zakonu indukcije koji kaže da se stvara napon u vodiču ako se on giba okomito na magnetsko polje. Fluid koji teče kroz cijev mjerila je vodič duljine L (promjer D) a magneti pričvršćeni na cijev proizvode magnetsko polje te je inducirani napon U_e koji je proizvela elektromagnetska indukcija B proporcionalan srednjoj brzini toka v :

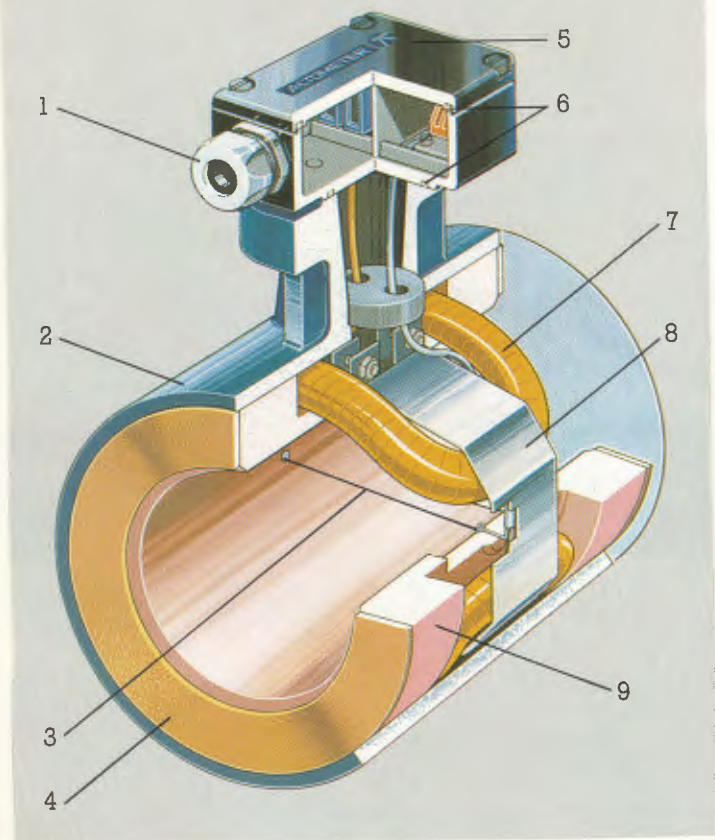
$$U_e = B \cdot L \cdot v$$

odakle se protok jednostavno dobiva množenjem brzine v sa površinom poprečnog presjeka.

Točnost iznosi 0,2 - 1,5 % ovisno o apsolutnoj vrijednosti mjerne veličine.

Sl. br. 1.

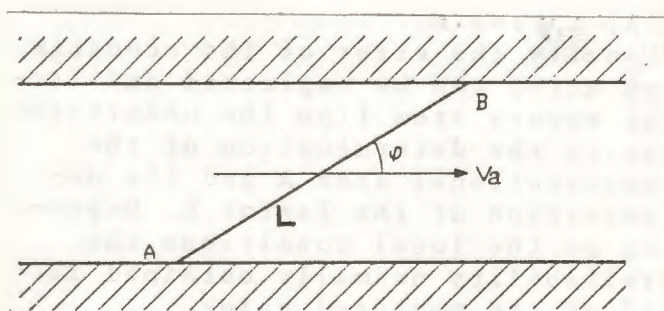
Magnetsko - induktivno
mjerilo protoka



1. Izlaz signala
2. Kućište
3. Mjerne elektrode
4. Prirubna brtva
5. Priključna kutija
6. Brtva
7. Zavojnica
8. Magnetska traka
9. Mjerna sekcija

2.2. Ultrazvučno mjerilo protoka

Ovo mjerilo se zasniva na Doppler-ovom efektu koji se javlja kada se zvuk šalje iz točke A u točku B između kojih teče fluid te se vraća natrag kako je prikazano na slici br. 2.



Slika br. 2.

Princip rada ultrazvučnog
mjerila protoka

Za brzinu fluida $V_a = 0$, vrijeme $t_{AB} = t_{BA} = \frac{L}{C}$ gdje je C brzina zvuka
Međutim kod $V_a \neq 0$:

$$t_{AB} = \frac{L}{C_{AB} - V_a \cos \varphi} \quad , \quad t_{BA} = \frac{L}{C_{BA} - V_a \cos \varphi}$$

iz čega dobivamo brzinu V_a :

22.

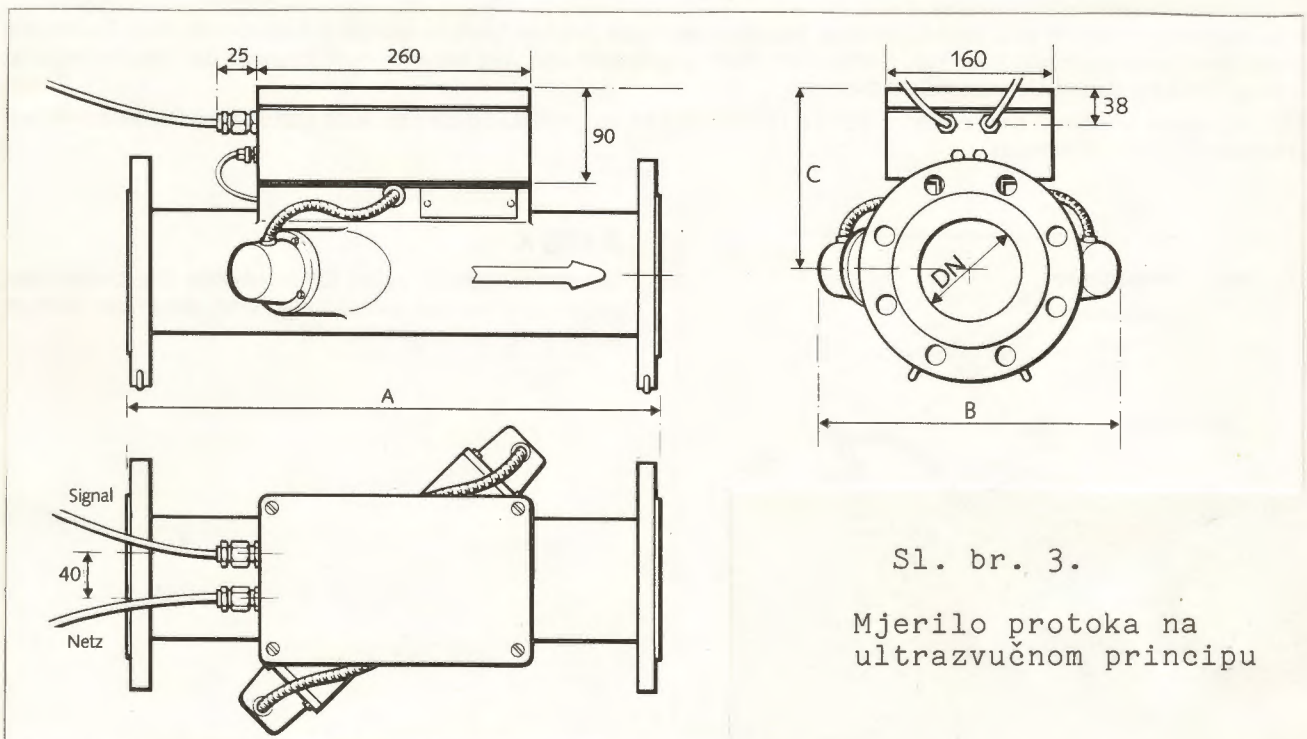
$$v_a = \frac{L}{2 \cos \psi} \left(\frac{1}{t_{AB}} - \frac{1}{t_{BA}} \right)$$

i protok Q:

$$Q = \frac{L}{2 \cos \psi} \left(\frac{1}{t_{AB}} - \frac{1}{t_{BA}} \right) \cdot k \cdot A$$

gdje je A površina poprečnog presjeka a k konstanta dobivena baždarenjem kod proizvađača.

Točnost ovakvog mjerila je 1 - 2 % a karakteristike su jednostavnost, nepotrebno servisiranje i baždarenje te laka ugradivost bez poremećaja toka. Izgled mjerila prikazan je na sl. br. 3.



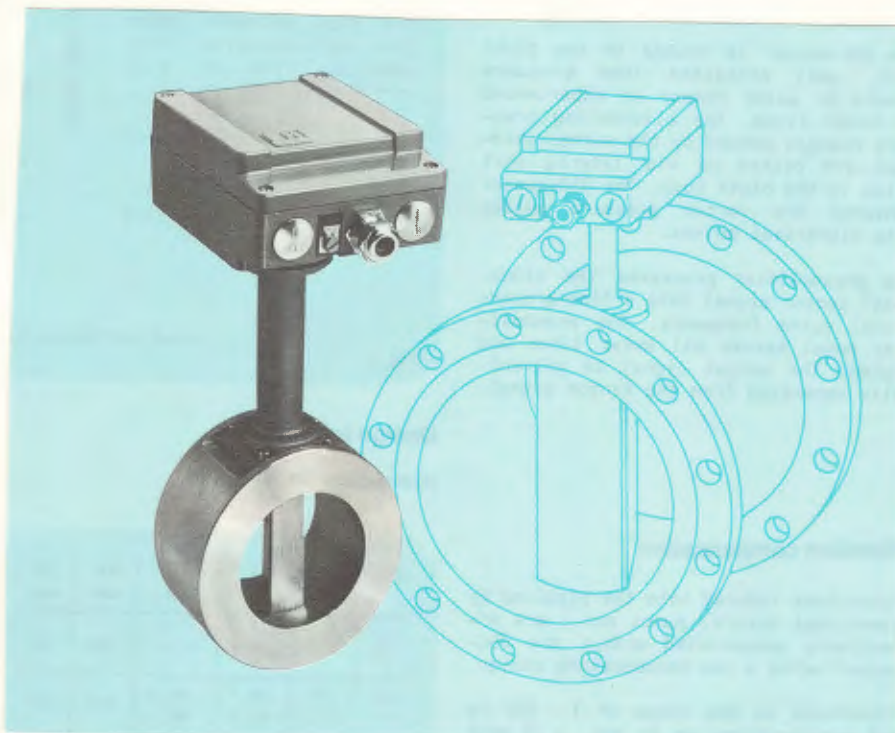
2.3. Mjerilo protoka na principu mjerenja toka vrtloga (V F M)

Mjerilo radi na principu mjerenja broja vrtloga koji se formiraju iza oštrog tijela uronjenog u tok fluida i koji su konstantne vrijednosti kod neke brzine i geometrije mjerila bez obzira na vrstu fluida. Broj vrtloga se mjeri pomoću raznih principa kao što su npr. promjena temperature na ugrađenim termistorima, ultrazvučnih brojila vrtloga, razlika tlaka između dvije strane oštrog tijela ili pak direktnog mjerenja frekvencije vibracija oštrog tijela zbog otkidanja vrtloga.

Danas se često upotrebljava zbog mogućnosti upotrebe raznih vrsta i temperatura fluida, jednostavne ugradnje i nepotrebno baždarenja.

Točnost mjerenja protoka na ovom principu je oko 1 %. Na sl. br.4

prikazan je mjerac protoka pomoću mjerenja vrtloga brojanjem frekvencije vibracije ugrađenog oštrog tijela.



Sl. br. 4.

Mjerac protoka
na principu brojanja vrtloga

2.4. Ostala mjerila protoka koja se danas razvijaju

Osim opisanih mjerila danas je u fazi razvoja ili na početku upotrebe još nekoliko vrsta mjerila protoka.

Tu treba spomenuti mjerilo toka mase koje radi na principu Coriolisovog efekta i koje je u početnoj fazi primjene. Princip rada je u mjerenju sile koja nastaje zbog Coriolisovog efekta u dvije paralelne polukružne cijevi koje međusobno vibriraju i time izazivaju kutnu brzinu čestica fluida. Posljedica je pojava Coriolisove sile čijim mjerenjem se dolazi do masenog protoka u cijevima a time i u sistemu.

Slijedeća metoda mjerenja, koja je nedavno razvijena, je pomoću plivajućeg elementa. Ovaj element se nalazi u divergentnoj vertikalnoj cijevi i mjerenjem njegovog uzdizanja zbog sile toka fluida se dolazi do protoka.

Intenzivno se istražuju i druge tehnike kao što je direktno mjerenje laserom ili termičke metode koje bi se mogle primjeniti u praksi.

Za zaključiti je da je razvijeno niz novih mjerila za protok koja su zadovoljila više naprijed navedenih zahtjeva. Međutim mora se reći da s obzirom na točnost mjerenja nije postignut nikakav novi napredak tako da točnost svih poznatih instrumenata iznosi 0,5 - 1 %.

3. Mjerenje brzine

Osnovna odluka kod izbora osjetila za mjerenja brzine je odgovor pitanje: gdje mjeriti, kako i zašto? Izbor o mogućnosti pristupa mjestu mjerenja, stacionarnosti ili nestacionarnosti toka, turbu-

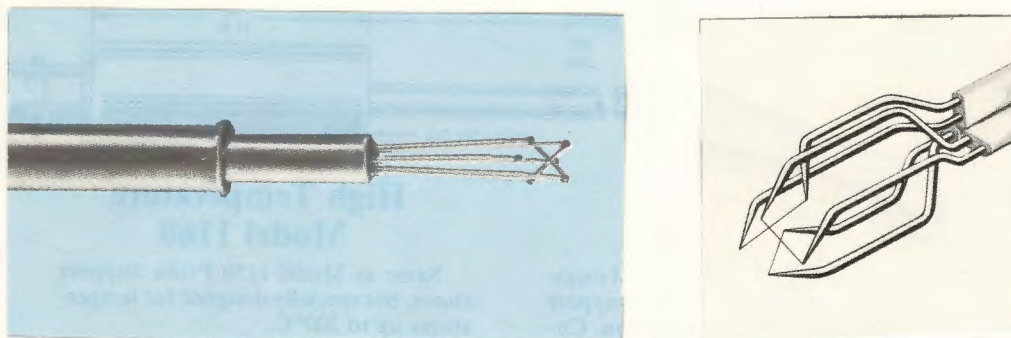
lentnosti toka i potrebi mjerenja određenog broja komponenti brzine.

Klasični sistemi mjerenja su danas pomoću raznih vrsta mikrokri-
la, jedno ili više dimenzionalnih Pitot cijevi čiji nedostaci su da
mjere samo srednje brzine u nekoj točki stupnjem točnosti do 1 % ali
i skupljaju utjecaj brzine u segmentu $\pm 15^\circ$ u pravcu mjerenja. Napre-
dak u mjerenju je termalna anemometrija sa vrućom žicom ili premazom
koja može mjeriti turbulentnost toka ali je osjetljiva na kvalitetu
medija. Ovdje treba posebno spomenuti dvije nove tehnike: termička
trodimenzionalna anemometrija i LDV (Laser Doppler Velocimetry) teh-
niku koja je široko ušla u laboratorijsku upotrebu.

3.1. Trodimenzionalna termička anemometrija

Trodimenzionalna termička anemometrija je razvijena za laborato-
rijske potrebe mjerenja strukture toka, dakle kako komponenti brzine
tako i turbulentnosti svake komponente brzine u nekoj točki toka.
Uglavnom se primjenjuju dva različita sistema. Oba se sastoje od tri
nezavisna osjetila sa vrućom žicom ili vrućim premazom s time da za
visoko turbulentne tokove tri osjetila stoje u međusobno okomitim
ravninama u mjernoj točki.

Drugi sistem je da su sva tri senzora pod kutem od 45° prema gla-
vnom toku u tri međusobne okomite ravnine. Ovaj sistem upotrebljava
se kada je turbulentnost toka manja od 10 %. Na sl. 5. prikazane
su dvije izvedbe osjetila čija točnost je bolja nego npr. Pitot cijevi
i iznosi unutar 1 %.



Slika br. 5. Dvije izvedbe osjetila za
trodimenzionalnu termičku anemometriju

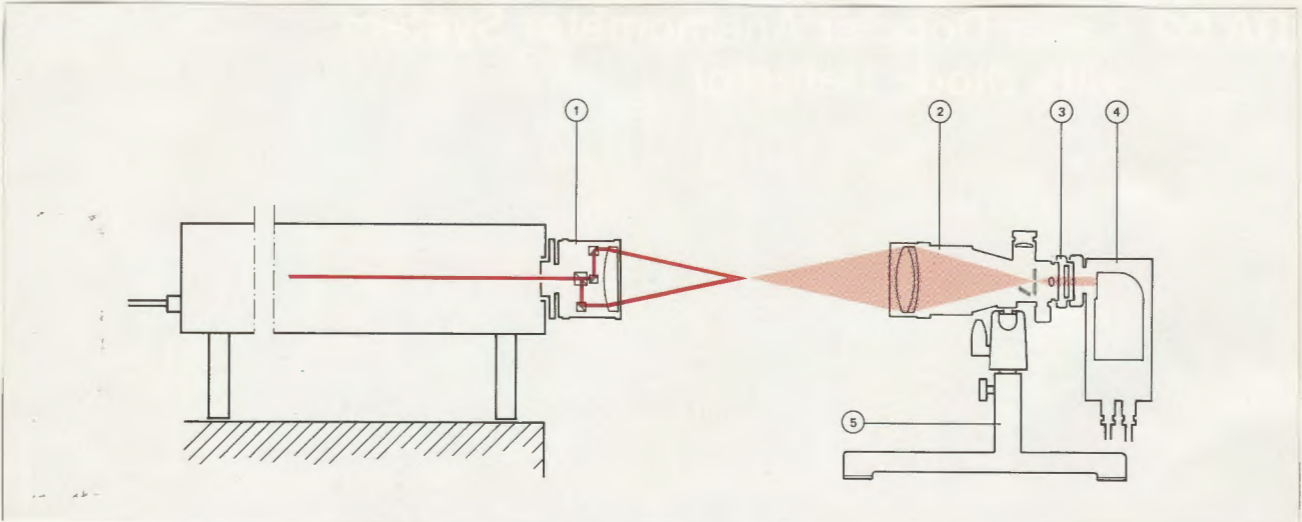
3.2. Lasersko mjerenje brzine (LDV)

Suvremeni i jedini način bezkontaktnog mjerenja brzine i njene
strukture u točki je LDV tehnika. Zahtjev je da postoji optički pri-
stup mjestu mjerenja koji se u laboratoriju može uvijek osigurati
načinom izvedbe modela. Baždarenje nije potrebno a moguće je mjeriti
ovisno o vrsti uređaja, jednu, dvije ili tri komponente brzine neo-
visno da li se radi o vodi ili zraku. S obzirom na ove karakteristi-
ke široko se danas primjenjuje u laboratorijskoj praksi. Jedini nedo-
statak je visoka cijena uređaja.

Osnovni princip je interferencija monokromatskih zraka svje-
tla, proizvedenih u određenom tipu lasera, u točki mjerenja brzine
fluida. Kod toga se koristi već spomenuti Doppler-ov efekt.
U teoriji i praksi je već dobro razvijena tehnika raznih vrsta lasera

ovisno o potrebi mjerenja.

Na slici br. 5 prikazani su osnovni dijelovi uređaja koji mjeri brzinu u točki sjecišta zraka okomito na ravninu slike.



Sl. br. 5. Shema L D V sistema

- 1- Optika dijeli zraku iz lasera na dva dijela
- 2- Optika fotopojčala ili diodni defektor
- 3- Interferentni filter
- 4- Pojačalo
- 5- Pomučno postolje

Može se kazati da zbog svoje visoke točnosti i primjenljivosti LDV uređaju predstoji daljnji razvoj i široka mogućnost upotrebe u mjernoj tehnici. Zbog svoje praktički 100% točnosti često služi za baždarenje drugih uređaja a u detaljnim istraživanjima toka je metoda izbora. Posebno što je u najnovije vrijeme primjenjen pronos zraka svjetla kroz optička staklena vlakna pa ga je moguće upotrijebiti na bilo kojem mjestu.

4. Mjerenje tlaka

Laboratorijska mjerenja tlaka se uobičajeno provode pomoću više vrsta manometara raznih principa mjerenja i širokih mogućnosti nabave na tržištu ili raznih samostalnih izvedbi. Međutim današnji zahtjevi su mjerenje kod nestacionarnih procesa, često visokih frekvencija pulzacije tlaka. Stoga se sve više upotrebljavaju dinamički tlakomjeri na principu mjerne membrane.

Tanka čelična ili plastična membrana malog promjera ima sa unutrašnje strane naliježljene bilo kapacitivne ili otporne mjerne trake ili piezoelektričke kristale te svojom deformacijom stvara promjenu električkog signala. Time je omogućeno mjerenje tlaka u širokim granicama, veliki je opseg mjernih frekvencija a moguće je mjeriti bilo apsolutni bilo diferencijalni tlak. Osjetila opisane vrste proizvode se kod raznih proizvođača u širokom opsegu kvalitete i cijene. Zajedničko im je mala dimenzija, lako baždarenje, linearnost, ponovljivost rezultata i mogućnost priključenja na električna računala radi statističke obrade rezultata.

Danas svi laboratoriji uglavnom raspolažu sa opisanim osjetilima tlaka te se očekuje daljnji njihov razvoj u pogledu dimenzija i trajnosti a najnovija imaju u sebi ugrađena i elektronička pojačala.

5. Mjerenje strujanja

Kod niza eksperimenata veoma je važno određivanje strujne slike kako bi se uočila mjesto nepovoljnog strujanja odnosno visoke turbulencije. Uobičajeno se široko upotrebljavaju razne metode vizualizacije strujanja pomoću boje, pomičnih niti, plivajućih dijelića ili mikro-dijelića raznih aditiva. Upotrebom holografije, foto sistema ili već danas TV-sistema sa svim mogućnostima tehničkih trikova vizualizacija ima veliku vrijednost kod određivanja strujne slike. Danas se čine pokušaji sa digitalizacijom slike pomoću računara i time određivanja komponenti brzine nekog snimljenog procesa strujanja kako bi se dobilo strujno polje. Dotjerivanjem ove tehnike dobiti će se nova kvaliteta u proučavanju strujnog polja.

6. Razina slobodne površine

Problem instrumenata za mjerenje razine slobodne površine treba podijeliti u dva dijela: Mjerenja kod stacionarnog stanja i dinamička mjerenja nestacionarnog nivoa kao što je npr. kod propagacije vodnog vala, kod vodnog skoka te npr kod mjerenja površinskih gravitacionih valova.

Prvi problem se danas praktički svagdje rješava nekom kontaktnom metodom od najjednostavnije pomoću kalibrirane mehaničke igle do automatiziranih mjerača nivoa koji mogu biti direktno povezani sa procesnom jedinicom.

Ovdje se praktički laboratoriji često snalaze izradom vlastitih uređaja ili ponekad kupuju od specijaliziranih firmi koje raspolažu sa širokim izborom.

Međutim kod dinamičkih pojava se javlja problem nestacionarnog mjernog procesa gdje je osnovni zadatak odrediti potreban broj očitavanja kako bi digitalni procesor mogao sa željenom tačnošću odrediti promjenu vodnog lica. Kako je najveći broj instrumenata analognog tipa problem se svodi na način obrade signala i raspoloživu memoriju procesora te potrebno vrijeme obrade.

Uglavnom se razlikuju dva tipa osjetila: kontaktna i bezkontaktna. U ova prva spadaju osjetila na bazi promjene otpora ili kapaciteta vodiča koji je smješten u predviđenom području promjene vodnog lica, ili pak na bazi promjene tlaka na dinamičkom tlakomjeru usvojenom na mjestu mjerenja.

Danas se u većini laboratorija preferiraju kapacitivna osjetila zbog svoje linearnosti, visoke tačnosti (1 - 2 %) i neosjetljivosti na lošu kvalitetu fluida.

Nova generacija mjerila su ona bezkontaktna. Kao primjer ističu se ona na bazi ultrazvuka i LDV tehnike čiji primjeri su ranije opisani. Prednost im je da su neosjetljivi na kvalitetu fluida, visoke su tačnosti i rezolucije a istovremeno mogu u željenoj točki površine mjeriti i brzinu gibanja fluida. Međutim kada treba istovremeno mjeriti nestacionarno vodno lice u nizu točaka ovakav sistem postaje preskup te su metoda izbora jeftina kontaktna mjerila.

7. Mjerenje sila

Na kraju ovog pregleda suvremenih mjerila u hidrauličkim laboratorijima treba nešto više reći o silama kao dinamičkoj karakteristici strujanja. Naime i stacionarni i nestacionarni procesi opstrujavanja, prostrujavanja ili udara fluida na krute granice izazivaju pojavu hidrauličkih opterećenja. Ova opterećenja imaju u principu svoj

kvazistatički i dinamički dio. Prvi od njih se mjeri još od osnivanja hidrauličkih laboratorija no dinamički dio postaje u novije vrijeme sve važniji. Naime spoznaja da je dinamička komponenta sile sa svojom frekvencijom i amplitudom veoma važan faktor kod pravilnog i razumnog dimenzioniranja raznih hidrotehničkih dijelova objekta kao što su zatvarači, preljevi, slapišta, elementi za disipaciju energije ili dijelovi tlačnih sistema, dovela je do razvoja suvremenih mjernih metoda bilo da se radi o medelskim istraživanjima ili mjerenja na dijelovima sistema.

Determiniranje dinamičkih opterećenja pomoću mjerenja može se podijeliti na dvije metode:

- direktno mjerenje sila i njenih karakteristika preko pomaka, naprezanja ili deformacija u baždarenom mjerilu
- indirektno ili integralno preko mjerenja dinamičkih tlakova

Prvi način je jednostavniji ali nam daje samo vrijednost veličine, smjera, frekvencija i amplituda ukupne sile na sistem.

Drugi način je složeniji jer zahtjeva mjerenje dinamičkih karakteristika tlakova u nizu točaka te se zatim sumiranjem po cijeloj površini sistema dobiva rezultat. Međutim ova metoda daje i lokalna opterećenja koja su ponekad za dimenzioniranje važnija od ukupne sile.

Direktno mjerenje dinamičkih sila provodi se pomoću jedno, dva, tri ili više komponentnih dinamometara.

Suvremeni dinamometri su uglavnom na principu elektrooptičkih traka (tenzometra) spojenih u most. Prednost mjernih traka je u njihovoj jednostavnoj upotrebi, linearnosti, praktičnoj neosjetljivosti na temperaturne promjene i relativno niskoj cijeni. Električni signal proizveden promjenom naprezanja u traci se direktno upotrebljava za obradu u mjernom sistemu koji uobičajeno sadrži računalo te spektralni analizator kako bi se dobio spektar opterećenja a time i važna karakteristika rezonantnih frekvencija.

Alternativne izvedbe mogu biti da se mjesto otpornih mjernih traka upotrebi poluvodičko ili kvarcno osjetilo.

Indirektna metoda preko mjerenja tlakova provodi se pomoću dinamičkih tlakomjera koji su ranije opisani. Ukupni rezultat ovisi o broju upotrebljenih tlakomjera na jedinicu površine. Iskustva pokazuju da se i sa relativno malim brojem osjetila smještenih na pravilno izabranim mjestima može postići rezultat koji se s obzirom na direktnu metodu razlikuje u nekoličko postotaka, ali u prednosti je kao što je već rečeno zbog mogućnosti predskazivanja lokalnih opterećenja.

Višekomponentne dinamometre proizvodi niz svjetskih proizvođača mjerne opreme, aki je veoma čest slučaj da ih razvijeniji laboratoriji koji imaju odgovarajuće radionice, zbog često specifičnih zahtjeva mjerenja, sami proizvode.

8. Zaključak

Na kraju ovog kratkog pregleda može se zaključiti da su u posljednje vrijeme, zbog razvoja tehnologije, mjerne metode u velikom napretku, pa se u upotrebi nalazi niz raznih vrsta osjetila, koje upotrebljavaju nove principe mjerenja. Laboratoriji ih često upotrebljavaju jer ih je veoma lako povezati sa sistemima za obradu signala a ispunjavaju veliki broj zahtjeva nabrojanih u tekstu.

Međutim za zaključiti je da se nisu bitno poboljšale granice točnosti mjerenja zbog samog osjetila ali i zbog sistema u koji su

uključena. Ipak pouzdanost i nove kvalitete mjerenja daju prednost modernim tehnikama posebno u području dinamičkih mjerenja hidrauličkih fizikalnih veličina. Izuzetak tu čini LDV tehnika koju treba smatrati veoma pouzdanom i perspektivnom u budućnosti.

Posebno je veliki razvoj vidljiv u području specijaliziranih osjetila s obzirom na uvjete rada, veličine mjerenih vrijednosti i vrste fluida gdje danas postoji široki izbor.

Međutim treba reći da su to često veoma skupi uređaji kako zbog širokog područja bavljenja treba u laboratoriju oprezno odvagnuti da li nešto kupiti za rijetka i specijalna mjerenja ili se može sa jeftinijim načinom mjerenja doći do kvalitetno istog rezultata uz možda veći utrošak vremena.

Literatura:

(1) Discharge and Velocity Measurement, Short Course, August 1987, Zürich

(2) Publikacije i prospekti firmi:

Spectra - Physics, Vega, Dantec, Flowtec AG, Bestobell Hobrey AG, Krohne, TSI Incorporated, Hottinger, Höntzsch Instruments, Kistler, Fischer Porter, Hydraulics Research, Coherent, Schilthnecht Messtechnik, Seba, Honeywell i dr.