

## PROBLEMI MERENJA PROTOKA U CEVOVODIMA VELIKOG PREČNIKA

Laza Lazarević: SOUR MIN, RO MIN Institut „Edvard Kardelj“

Miodrag Živić: SOUR MIN RO „Jastrebac“

Janoš Nikolić: SOUR MIN „RO „Jastrebac“

### REZIME

U radu je dat pregled mernih postupaka za merenje protoka, koji omogućavaju merenje protoka u cevovima velikog prečnika (do 3 m). Navedeni postupci su detaljnije opisani, objašnjen je njihov merni princip, opisani merni instrumenti i uređaji koji se koriste pri merenju, način izbora mernog preseka, tok merenja, kao i utvrđivanje mernih rezultata.

Zatim je dat tabelarni prikaz opisanih mernih postupaka u kome su sažeto i pregledno izložene najvažnije karakteristike pojedinih mernih postupaka kao što su: opseg i tačnost merenja, uslovi pod kojima se odvija merenje, merno područje i prečnici cevi do kojih se primenjuju pojedini merni postupci.

Na kraju rada je na osnovu dobrih i loših strana pojedinih mernih principa, njihove praktične primenljivosti, cene koštanja i tačnosti merenja, kao i sagledavanja problema koji se javljaju prilikom merenja, izvršen izbor uređaja za merenje protoka vertikalnih aksijalnih pumpi. Usvojen je elektromagnetni merač protoka i dat je crtež ispitnog štanda koji omogućava merenje protoka, vertikalnih aksijalnih pumpi do  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  u novo-projektovanoj „Ispitnoj stanici za ispitivanje hidrauličnih radnih mašina – pumpi“ RO „Jastrebac“ – Niš.

### PROBLEMS OF FLOW MEASURING IN PIPELINES OF GREAT DIAMETAR

#### SUMMARY

In this paper is given the review of measuring procedures for flow measuring, which enable flow measuring in pipelines of great diametar (up to 3 m). The above mentioned procedures are described in detail, as well as their measuring principle, and measuring instruments and devices which are used in measuring, the way of choosing measuring cross section, measuring course, and establishing of measuring results.

Tabular survey is given for the described measuring procedures in which are given, shortly and clearly, the most important characteristics of certain measuring procedures such as: range and accuracy of measuring, conditions for measuring, measuring area and pipe diametar up to which they are used.

At the end of the paper, according to advantages and disadvantages of certain measuring principles, their practical application, cost and measuring accuracy, and taking into account the problems which appear during measuring, is made the choice of devices for measuring the flow in vertical axial pumps. Electromagnetic flow measuring device is adopted and the drawing of testing stand is given, which enables flow measuring in vertical axial pumps up to  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  in newly-designed „Testing station for testing hydraulic working machines – pumps“, RO „Jastrebac“ – Niš.

**KLJUČNE REČI:** merenje protoka, metode, cevovod, veliki prečnik, pumpe (vertikalne aksijalne), ispitni štand.

## U V O D

Zbog naraslog obima a naročito osvajanja proizvodnje vertikalnih pumpnih agregata velikih snaga i protoka do  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  od strane RO „Jastrebac“, kapaciteti postojeće ispitne stanice za ispitivanje pumpi su postali nedovoljni. Zato se pristupilo projektovanju nove ispitne stanice. Ali, pošto gabariti ispitnih štandova u velikoj meri zavise od metode merenja protoka koja će biti primenjena, nužno je prvo upoznati različite metode za merenje protoka u cevovodima velikog prečnika pa nakon toga izabrati najbolju.

## METODE MERENJA PROTOKA

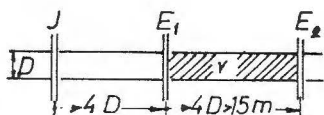
Protok tečnosti kroz pumpu, odnosno cevovod može se odrediti merenjem:

1. Crpljenje količine tečnosti u određenom intervalu vremena:
  - Alenovim sonim postupkom i
  - potapajućim meračem;
2. pritiska koji stvara prigušni element:
  - Venturi mlaznicom i
  - Dalovom cevi;
3. brzine u pojedinim tačkama mernog preseka:
  - hidrometrijskim krilom i
  - Pitovim cevima;
4. stepena razblaženja ubrizganog rastvora soli,
5. indukovano električnog napona proizvedenog strujanjem tečnosti kroz magnetno polje:
  - elektromagnetnom LOG—sondom i
  - elektromagnetnim meračem protoka;
6. Doplerovog efekta nastalog kretanjem ultrazvučnog talasa u struji fluida:
  - ultrazvučnim meračem sa fazometarskim pretvaračima i
  - ultrazvučnim meračem sa promenom frekvencije.

## MERENJE PROTOKA ALENOVIM SONIM POSTUPKOM

Primenjuje se u cevovodima prečnika od 250 do 3000 mm [1] ako je tečnost male provodnosti ili ako joj se sme dodati rastvor soli.

Merni princip se zasniva na tome što se na određenom mestu u cevovod (J) preko ventila ubacuju i male količine sonog rastvora i meri vreme potrebno da soni oblak prođe dužinu između dveju ravni ( $E_1$  i  $E_2$ ) sa ugrađenim elektrodama. Ravan ušpricavanja, kao i ravni u kojima se nalaze elektrode postavljaju se na pravoj deonici cevovoda.



Slika 1. Položaj ravni u cevovodu.

J — ravan u kojoj se vrši ušpricavanje sonog rastvora.

$E_1, E_2$  — ravni u kojima se postavljaju elektrode,

D — unutrašnji prečnik cevi.

Rastojanja između ravni prikazana su na sl. 1. Uslov za dobro merenje je da i pri najvećem protoku najmanje vreme prolaska sonog oblaka od ravni  $E_1$  do ravni  $E_2$  iznosi 10 s. Ova brzina zavisi od odnosa gustina sonog rastvora i vode i prečnika cevovoda, a dobija se iz izraza:

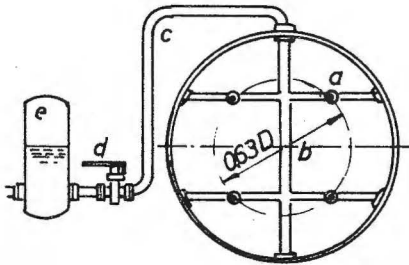
$$v_{\min} = 1,4 \sqrt{D (\rho_s / \rho_w - 1)} \quad [\text{m/s}] \quad (1)$$

$D$  [m] – unutrašnji prečnik cevovoda

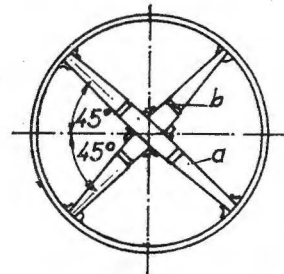
$\rho_s$  – gustina sonog rastvora

$\rho_w$  – gustina vode

Na mestu ravni J postavljaju se opružni povratni ventili za lepezasto ušpricavanje (injektiranje) sonog rastvora u cevovod. Ušpricavanje se vrši pod nadpritiskom od najmanje 2.45 [bar] normalno na pravac strujanja. Broj ventila direktno zavisi od prečnika. Za prečnike između 250 i 3000 mm koriste se 4 ventila koji se ravnomerno raspoređuju na krugu čiji je prečnik  $0,63 D$  kao što pokazuje sl. 2. Vodovi koji spajaju ventile sa rezervoarom moraju se izvesti vrlo pažljivo da bi se izbegla mesta u kojima mogu da se stvore vazdušni čepovi.



Slika 2. Način postavljanja ventila za ušpricavanje  
 a – ventili za ušpricavanje  
 b – razvodni vod  
 c – dovodni vod,  
 d – ventil,  
 e – vetrenik sa samim rastvorom.



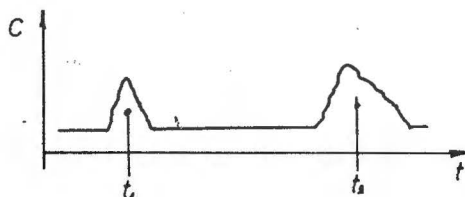
Slika 3. Postavljanje elektroda u ravnima  $E_1$  i  $E_2$

a – elektrode,  
 b – izolovani nosači

U presecima  $E_1$  i  $E_2$  se na mernim krstovima pričvršćuju elektrode od trakastog čelika dužine od  $D/12$  u osi cevi do  $D/100$  od zida cevi (sl. 3). Pri ovakvom rasporedu je provodljivost odsečka elektroda približno proporcionalna pripadajućoj prstenastoj površini.

Prilikom postavljanja elektroda naročitu pažnju treba posvetiti izvođenju izolacije, kako između samih elektroda tako i između elektroda i cevi. Iz istog razloga se bojom, koja istovremeno služi i kao izolator, premazuje: unutrašnjost cevovoda najmanje u dužini od po 1 m levo i desno od preseka u kojima leže elektrode, nosači elektroda na zidu cevi, kao i spoljne i čeone površine elektroda koje ne služe za merenje.

Kada su izvršene sve pripreme i kada je postignuto stabilno stanje, može se pristupiti merenju. Najpre se otvara ventil d (sl. 2) i vrši ušpricavanje male količine sonog rastvora u trajanju do 1 s. Odmah zatim se uključuju merni i registrujući instrumenti (ampermetar ili oscilograf) koji u koordinatnom sistemu vreme–provodljivost tečnosti daju krivu provodljivosti. Ako je vreme injektiranja kratko, zaptivanje ventila dobro, odstojanje između ravni sa elektrodama dovoljno, odnosno ako je merenje pravilno izvedeno, rezultat mora biti kao u dijagramu prikazanom na sl. 4.



c – provodljivost tečnosti,  
t – vreme.

Slika 4. Kriva provodljivosti

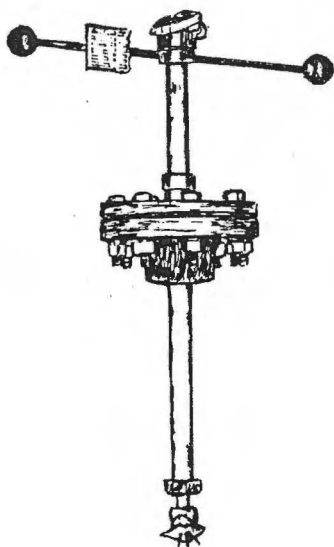
Vreme ( $t_2 - t_1$ ) za koje je oblak sonog rastvora prešao put od ravni  $E_1$  do ravni  $E_2$  određeno je rastojanjem između težišta trouglastih površina krive provodljivosti (sl. 4).

Preostaje jedino da se uz pomoć ranije izmerene zapremine cevovoda između ravni sa elektrodama izračuna protok jednačinom;

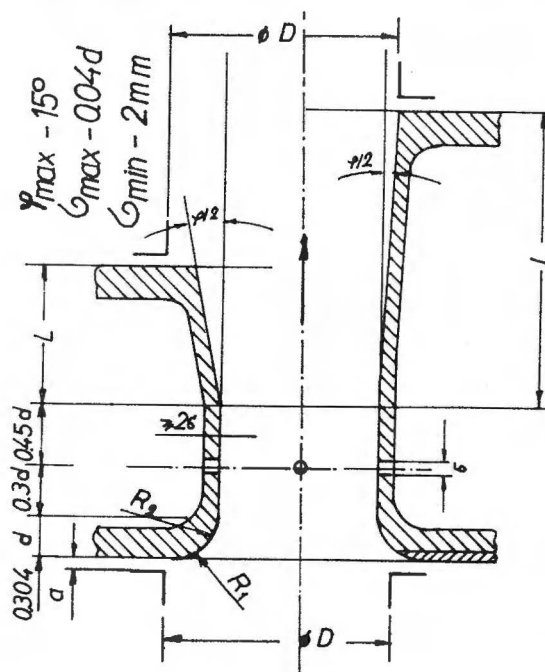
$$Q = V/(t_2 - t_1) \quad (2)$$

#### MERENJE PROTOKA POTAPAJUĆIM MERAČEM

Potapajući merač protoka je uređaj za merenje protoka tečnosti u cevovodima prečnika od 100 do 2000 mm [2]. Merni princip se sastoji u tome da tečnost prilikom strujanja okreće rotor (prečnika 50 mm) rotorskog sklopa koji se nalazi na vrhu sonde. Rotor je izrađen od feromagnetnog , a njegov nosač i sonda



Slika 5. Potapajući merač protoka



Slika 6. Standardna Venturi mlaznica kratke i duge konstrukcije

od nemagnetnog materijala. Pri prolasku svake lopatice rotora ispred pola stalnog magneta, generiše se u namotaju davača signala. Frekvencija generisanog signala je direktno proporcionalna brzina obrtaja rotora, odnosno brzini strujanja tečnosti.

Dubina potapanja sonde zavisi od usvojene metode merenja brzine (merenja brzine u osi cevi ili na 1/3 D od zida cevi). Može da pokazuje trenutni protok ili ukupno proteklu količinu tečnosti direktno na pokaznom instrumentu.

#### MERENJE PROTOKA VENTURI MLAZNICOM

Venturi cev je jedna od najranijih metoda merenja protoka, koja je počela da se primenjuje još krajem devetnaestog stoleća. To je dugačka prigušnica čiji se otvor ravnomerno proširuje do punog prečnika cevovoda. U poslednje vreme se sve više primenjuje Venturi mlaznica. Venturi mlaznicom se naziva vrsta prigušnice čiji ulazni deo po obliku odgovara standardnoj mlaznici, a izlazni deo je konusnog oblika. U zavisnosti od dužine konusa (koji služi za smanjenje nepovratnog pada pritiska) razlikujemo kratke i duge Venturi mlaznice (sl. 6) [3].

Princip merenja protoka ovom metodom zasniva se na padu pritiska prilikom promene brzine strujanja fluida koja je izazvana sužavanjem poprečnog preseka cevovoda. Protok se izračunava pomoću jednačine:

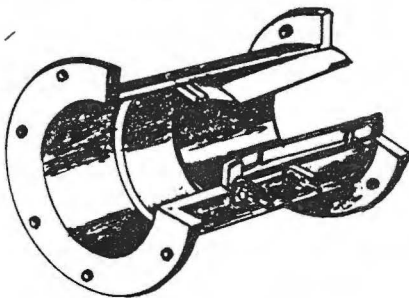
$$Q = 0,01252 \alpha \epsilon m D^2 (\Delta p / \rho)^{1/2} \quad (3)$$

gde je:  $\alpha$  – koeficijent protoka,  
 $\epsilon$  – koeficijent širenja merenog fluida,  
 $m = A_0/A_1 = d^2/D^2$  – modul prigušnice,  
 $Q$  [m<sup>3</sup>/h] – zapreminski protok,  
 $D$  [mm] – unutrašnji prečnik cevovoda,  
 $d$  [mm] – prečnik otvora prigušnice,  
 $\Delta p = p_1 - p_2$  [kp/m<sup>2</sup>] – pad pritiska na prigušnici,  
 $p_1$  – apsolutni pritisak neposredno ispred mlaznice,  
 $p_2$  – apsolutni pritisak neposredno iza mlaznice,  
 $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] – gustina merenog fluida.

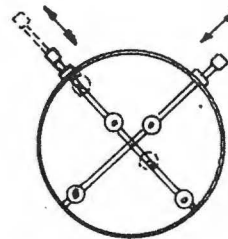
Nepovratni pad pritiska u cevovodu izazvan korišćenjem ovog mernog uteđaja iznosi 10–14%. Venturi mlaznice prečnika od 200–1400 mm su standardizovane. Potrebne prave deonice cevi zavise od uzroka koji izaziva poremećaj strujanja a najmanje se kreću od 8 do 15 D ispred mernog mesta. Iza Venturi cevi nije potreban ravni deo cevovoda [4].

#### MERENJE PROTOKA DALOVOM CEVI

Dalova cev je u stvari Venturi cev u specijalnom izvođenju. Njena glavna odlika je manji nepovratni pad pritiska, od 2,5–6% izmerene razlike pritisaka. Može da se izrađuje i kao kratka Dalova cev, ali je uopšte uzev manja od Venturi cevi. Dužine je oko 2D a izrađuje se za prečnike od 450–3000 mm [5]. Minimalne dužine ravnog dela cevovoda ispred Dalove cevi moraju biti nešto duže nego kod Venturi cevi, a iza te cevi nije potreban pravi deo dužine cevi.



Slika 7. Dalova cev



Slika 8. Merni krst sa pokretnim krilima

## MERENJE PROTOKA HIDROMETRIJSKIM KRILOM

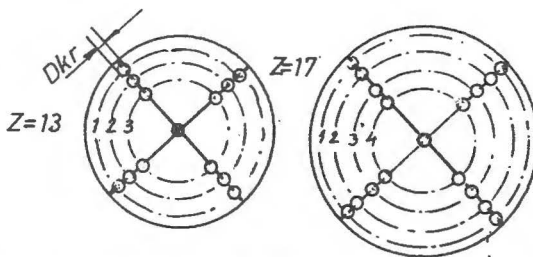
Kroz jedan poprečni presek cevovoda se u određenom broju tačaka uz pomoć ugrađenog baždarenog hidrometrijskog krila meri brzina strujanja tečnosti u tački, na osnovu kojih se konstruiše profil brzine u celom mernom preseku.

Merni presek u kome se postavljaju hidrometrijska krila mora da ima tačno određenu protočnu površinu. Između mernog preseka i pumpe mora da se obezbedi prava deonica cevovoda dužine  $20D$  u kojoj ne sme da se nalazi ništa što može da uzrokuje vrtložno strujanje. Zato je za obezbeđenje ravnomernog bezvrtložnog strujanja u mernom preseku, poželjna ugradnja laminatora.

Potrebna prava deonica iza mernog preseka iznosi  $5D$ , a najmanja srednja brzina  $0,4$  m/s. Upotrebom krila sa zavojnim lopaticama, koje se primenjuju zbog neosetljivosti na nečistoću u tečnosti, mogu se meriti brzine do  $6$  m/s. U slučaju da strujanje prema mernom preseku nije pravo već zakošeno, moraju se primeniti komponentne lopatice. One se primenjuju do brzine od  $2,5$  m/s. Najmanji prečnik cevi kroz koju se može meriti protok pomoću hidrometrijskog krila jeste  $800$  mm, jer se zbog nepovoljnog rasporeda brzina u blizini zida greška merenja kod manjih prečnika povećava. To je ujedno i razlog zbog koga se u blizini zida cevovoda mogu primeniti i krila manjeg prečnika od  $100$  mm, mada je to najmanji preporučeni prečnik krila.

Hidrometrijska krila se najčešće pričvršćuju na čvrsto ugrađenom, po mogućstvu krutom mernom krstu. Za cevovode unutrašnjeg prečnika od  $800$  do  $1500$  mm, umesto većeg broja fiksnih mogu se upotrebiti dva para pokretnih krila postavljenih na kliznim polugama. Poluge su postavljene na mernom krstu od pljosnatih čeličnih profila (sl. 8). Na ovaj način se pomeranjem krila može izmeriti brzina strujanja u bilo kojoj tački od ose do unutrašnjeg zida cevovoda.

Kod cevovoda sa unutrašnjim prečnikom većim od  $1200$  mm krila se fiksiraju na četvorokrakom mernom krstu. Raspored postavljanja mernih krila na mernom krstu, odnosno njihovo rastojanje od ose cevi, kao i njihov broj za prečnike do  $3200$  mm dati su na sl. 9.



$r_{1,2,3,4}$  — poluprečnik kruga na kome su fiksirana krila,  
 $z$  — ukupni broj krila

Slika 9. Raspored postavljanja fiksnih krila na mernom mestu.

$D$ [mm]	$Z$	$r_1$	$r_2/r_1$	$r_3/r_1$	$r_4/r_1$
1200 - 2400	13	$0.5D - 0.75Dkr$	0.816	0.577	/
2200 - 3200	17		0.866	0.707	0.500

Očigledno je da su krila raspoređena po obodu mernog preseka tako da u što većoj meri pokrivaju oblast većih promena brzina.

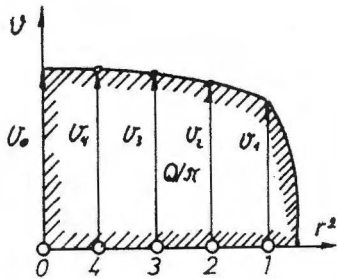
Samom merenju pristupamo tek po dostignutoj stabilizaciji stanja, i to uključivanjem registracionog uređaja i hronometra u najmanjem trajanju od  $2$  min. Ovaj postupak ponavljamo za svaku pogonsku tačku po dva puta.

Zatim se na osnovu određenog broja obrtaja krila iz krive baždarenja nađe srednja brzina koja se poklapa sa osom krila fluida za posmatranu tačku mernog preseka.

Iz četiri vrednosti brzina koje su snimljene na krilima jednog podeonog kruga, odredi se srednja aritmetička vrednost. Ove srednje aritmetičke vrednosti brzina na podeonim krugovima zajedno sa brzinom u osi cevi daju krivu  $v(r)$ .

Površine koje kriva  $v r (r)$  zatvara sa osom  $r^2$  se planimetrišu (sl. 10), množenjem planimetrisane površine sa  $\pi$  dobijamo izmerenu (traženu) vrednost protoka.

$$Q = \pi \int_0^{D/2} v d(r^2) \quad (4)$$

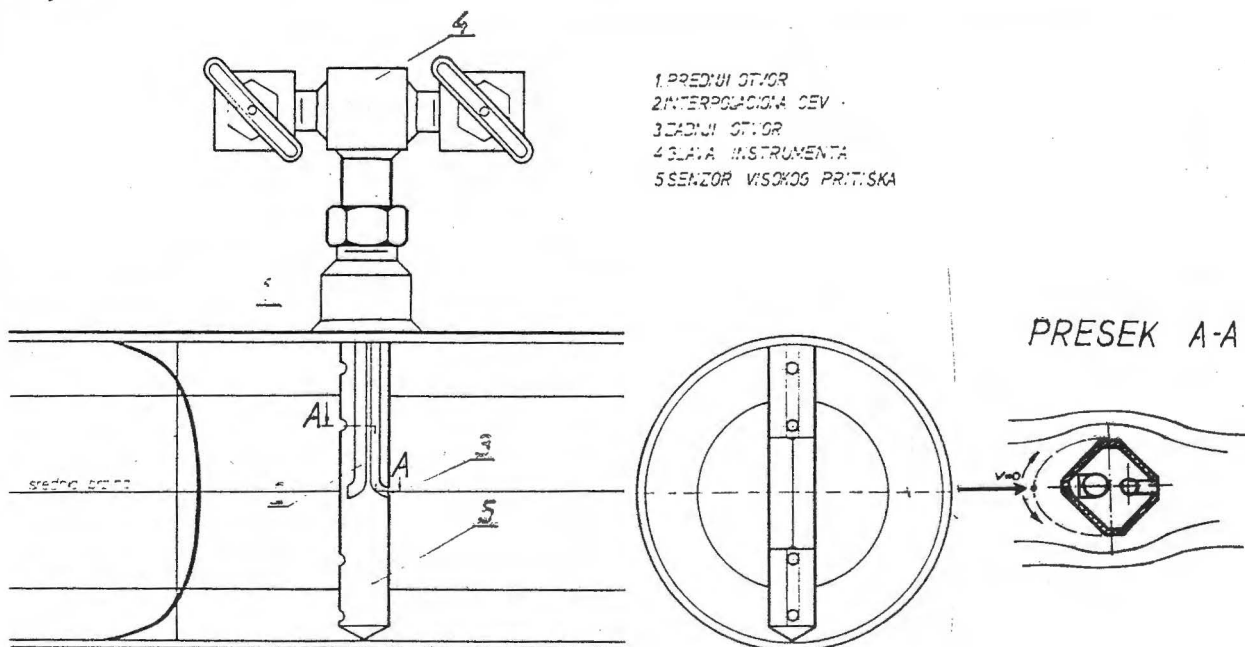


Slika 10. Kriva rasporeda brzina

### MERENJE PROTOKA PITOOVIM CEVIMA

Metod nosi naziv po istoimenom francuskom naučniku koji je na ovaj način još pre dva veka merio brzinu reke Sene. Zasniva se na porastu dinamičkog pritiska. Naime pri uronjavanju nekog tela u struju fluida, po teoriji o graničnom sloju, neposredno ispred tela se formira granični sloj u kome nema strujanja. Brzina tečnosti je počevši od zaustavne tačke pa do površine tela jednaka nuli.

Shodno Bernulijevoj jednačini, pošto je brzina fluida pala na nulu, vrednost postojećeg statičkog pritiska će porasti za  $\Delta p$ . To je tzv. dinamički pritisak, nastao pretvaranjem kinetičke energije strujanja u potencijalnu.



Slika 11. Metod merenja protoka cevčicom tipa „Annubar“

Ako u cevovod normalno na smer strujanja uronimo šuplju cevčicu, odnosno senzor visokog pritiska sa 4 otvora (1) onda će u njenoj unutrašnjosti vladati pritisak jednak zbiru statičkog i dinamičkog pritiska.

Otvori su raspoređeni na bazi kompjuterskog proračuna baziranog na Čebiševom zbiru srednjih vrednosti brzina protoka tečnosti kroz svaku od četiri jednake prstenaste površine poprečnog preseka cevovoda (sl. 11), [6].

U unutrašnjosti senzora visokog pritiska 5 nalazi se interpolaciona cev 2 koja prenosi srednji totalni pritisak do glave instrumenta.

Zadnji otvor 3, smešten nizvodno, pokazuje manji, odnosno statički pritisak koji vlada u cevovodu i prenosi ga do glave instrumenta.

Glava instrumenta 4 vrši poređenje totalnog i statičkog pritiska, detektuje nastalu diferencijalnu razliku pritiska, odnosno dinamički pritisak i prenosi ga do pretvarača.

Brzina strujanja tečnosti je:

$$v = k \sqrt{2g \Delta p / \rho} \quad (5)$$

Odnosno:

$$Q = vA = kA \sqrt{2g \Delta p / \rho}$$

Protok se na osnovu [7] izračunava iz jednačine:

$$Q = C' \sqrt{\Delta p} \quad (6)$$

$$C' = C_f K D^2 C_{Re} C_M \cdot C_t \cdot C_g \cdot \sqrt{\frac{1}{\gamma}}$$

gde je:

Q	– protok		
C'	– protočna konstanta	$C_M$	– faktor vrste manometra
$C_f$	– konverzioni faktor	$C_t$	– faktor toplotnog širenja
K	– protočni koeficijent	$C_g$	– faktor lokalne promene gravitacije
D	– unutrašnji prečnik cevi (mm)	$\gamma$	– specifična težina tečnosti
$C_{Re}$	– faktor Reynoldsovog broja	$\Delta p$	– diferencijalni pritisak (kPa)

Ovaj metod može da se koristi u cevovodima od 300 do 3000 mm pa i više, sa klasom tačnosti  $\pm 1\%$ . Prouzrokuje vrlo male nepovratne gubitke pritiska ( $1\text{--}3\%$ ), vrlo je proste konstrukcije, a zbog postojanja graničnog sloja mala je mogućnost začepljenja.

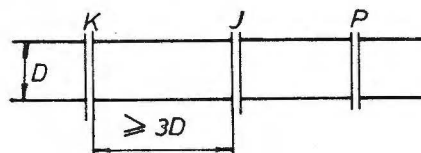
#### MERENJE PROTOKA POSTUPKOM RAZBLAŽENJA UBRIZGANOG RASTVORA SOLI

Ovaj merni postupak se primenjuje onda kada se tečnosti čiji se protok meri može dodati soni rastvor. Za ovu vrstu merenja treba upotrebljavati materije koje se lako rastvaraju u vodi, koje se lako analiziraju i kvalitativno i kvantitativno i koje nisu skupe. Pored kuhinjske soli (NaCl) upotrebljavaju se još i: kalcijumhlorid ( $\text{CaCl}_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$ ), kaustična soda (NaOH) i natrijumhidrokarbonat ( $\text{NaHCO}_3$ ). So od koje se pravi soni rastvor ne sme biti otrovna, mora biti hemijski postojana i ne sme je biti u tečnosti, osim u neznatnim količinama (tragovima). Tačno merenje koncentracije soli treba da bude moguće do razređenja od  $10^{-6}$ .

k – kontrolni presek

J – presek u kome se vrši ušpricavanje sone koncentracije

P – prijemni presek



Slika 12. Međusobni položaj preseka u cevovodu

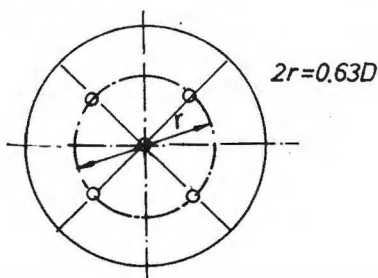


Postupak se sastoji u tome što se tačno određena količina ( $q$ ) nekog sonog rastvora, određene koncentracije ( $C_1$ ), ubacuje neprekidno u cevovod u preseku ušpricavanja (J) sl. 12. Na dovoljnom odstojanju od preseka ušpricavanja (koje treba da omogući dobro mešanje ubačenog sonog rastvora sa crpljenom tečnošću) nalazi se prijemni presek (P) u kome se određuje koncentracija  $C_2$  soli u tečnosti.

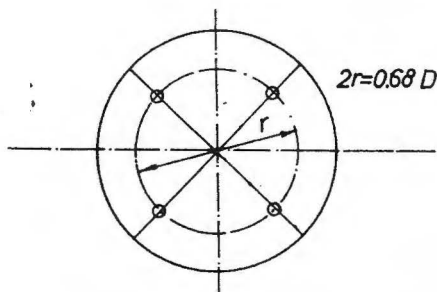
Istovremeno se u kontrolnom preseku (k) vrši određivanje (uzimanje probe za određivanje koncentracije) prirodne koncentracije ( $C_0$ ) soli u tečnosti.

Na osnovu uzetih proba, koje se uzimaju neprekidno na najmanje 5 mesta u trajanju od najmanje 5 min, određuje se srednja aritmetička sredina (vrednost) i nanosi na dijagram vreme—koncentracija. Kriva koncentracije ( $C_2$ ) po isteku jednog pogonskog perioda, najčešće postaje horizontalna, znači  $C_2 \rightarrow \text{const}$ .

Ušpricne mlaznice (sl. 13) i prijemna mesta (sl. 14) su tako raspoređeni na krstu da se nalaze u težištu jednako velikog dela površine poprečnog preseka.



Slika 13. Položaj ušpricnih mlaznica



Slika 14. Položaj prijemnih otvora

Protok se izračunava jednačinom:

$$Q = q \frac{C_1 - C_0}{C_2 - C_0} \quad (7)$$

#### MERENJE PROTOKA ELEKTROMAGNETNOM LOG—SONDOM

Ovaj uređaj za merenje protoka ima prostu i pouzdanu konstrukciju. Postavlja se na stalno potopljenim cevovima, na mestima sa težim radnim uslovima i manjim zahtevima u pogledu tačnosti merenja.

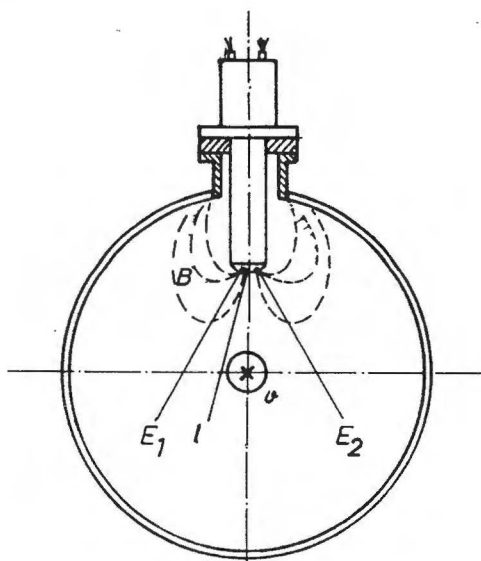
Na cevovod se postavlja sa gornje strane, kroz posebni uvodnik, na pravom delu cevovoda najmanje dužine  $15D$  (isred mernog mesta  $10D$ , a iza  $5D$ ).

Cilindrični deo sonde, sa vrhom u obliku kalote na kome se nalaze elektrode  $E_1$  i  $E_2$  (sl. 15), uranja se u tečnost. Uranjanjem u tečnost element struje tečnosti ostvaruje kontakt između elektroda koje se nalaze na međusobnom rastojanju  $l$ . Istovremeno se normalno na rastojanje  $l$  stvara homogeno naizmenično elektromagnetno polje jačine magnetne indukcije  $B$ .

LOG — sonda se u tečnosti koja laminarno stoji orijentiše tako da strujnice budu istovremeno normalne na rastojanje između elektroda ( $l$ ) i na linije sile magnetnog polja. Tada se po Faradejevom zakonu elektromagnetne indukcije na krajevima provodnika dužine  $l$  (odnosno elektrodama) indukuje elektromotorna sila koja je proporcionalna sa jačinom polja, brzinom ( $v$ ) i dužinom ( $l$ ).

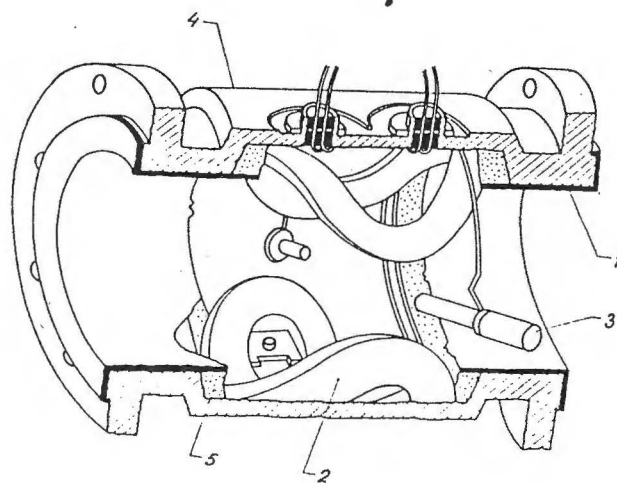
Elektromotorna sila koja se generiše na elektrodama je:

$$E = C \cdot l \cdot v B \quad \text{gde je: } C \text{ — koeficijent sonde} \quad (8)$$



Slika 15. Elektromagnetna LOG-sonda

$E_1, E_2$  — elektrode  
 $l$  — rastojanje između elektroda,  
 $v$  — brzina strujanja tečnosti  
 $B$  — jačina elektromagnetnog polja



Slika 16. Presek elektromagnetnog merača protoka.

1. Izolacija unutrašnjosti cevi,  
 2. Solenoid  
 3. Metalne elektrode,  
 4. Merna cev,  
 5. Masa za fiksiranje namotaja

Koeficijent ( $C$ ) zavisi od oblika i dimenzija sonde, konstantne je vrednosti za svaku sondu i određuje se baždarenjem.

Pomoću izraza (8) izmerena je brzina fluida u jednoj tački polja brzina.

Sada možemo izračunati protok pomoću izraza:

$$Q = mvA \quad (9)$$

gde je:  $m$  — koeficijent razmere,  
 $A$  — površina poprečnog preseka cevovoda

Koeficijent ( $m$ ) se određuje eksperimentalno na osnovu dimenzija određene sonde, njene dubine uronjavanja, prečnika cevovoda i režima strujanja [8].

#### MERENJE PROTOKA ELEKTROMAGNETNIM MERAČEM

I ovaj merač protoka se zasniva na zakonu elektromagnetne indukcije koji je Faradej pronašao još 1831. Ali zbog stanovitih problema u konstrukciji, prva komercijalna industrijska elektromagnetna merila počela su da se proizvode tek šezdesetih godina sl. 16.

Fizički princip merenja prikazan je na sl. 17 [9].

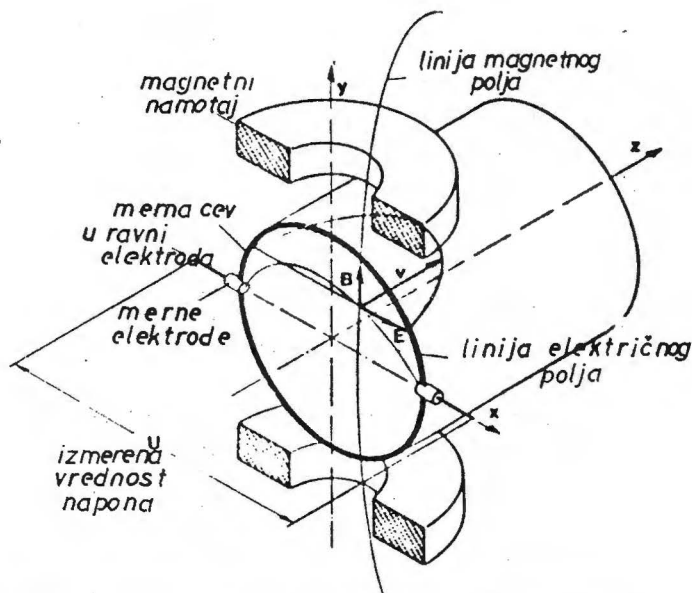
U bilo kojoj tački na električnoj liniji polja, koja povezuje merne elektrode, vektor indukovane lokalne elektromotorne sile je jednak vektorskom proizvodu lokalne brzine strujanja tečnosti i lokalne jačine magnetnog polja.

$$\vec{E} = \vec{v} \times \vec{B} \quad (10)$$

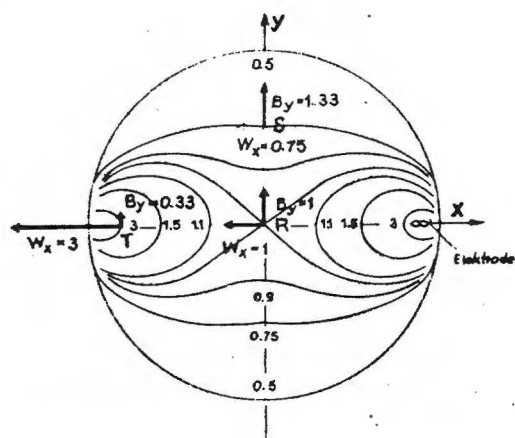
gde je:  $\vec{E}$  – vektor indukovane elektromotorne sile,  
 $\vec{v}$  – vektor brzine strujanja tečnosti,  
 $\vec{B}$  – vektor jačine elektromagnetnog polja

Ako idemo duž bilo koje električne linije polja, od jedne do druge merne elektrode, dobićemo vrednost elektromotorne sile između elektroda (U).

Ova elektromotorna sila treba da bude proporcionalna sa srednjom brzinom i da za svaki protok u klasi tačnosti uređaja daje srednju vrednost brzine.



Slika 17. Fizički princip elektromagnetnog merača protoka



Slika 18. Linije polja  $W_x \cdot B_y = \text{const}$

Nezavisnost profila protoka može da se postigne tako što se jačina magnetnog polja (B) prilagođava za svaku delujuću tačku mernog puta konstantnoj vrednosti. Ta vrednost mora da bude prikazana kao prostorna veličina u svakoj tački prostora prema elektrodama.

Na sl. 18 je prikazana horizontalna komponenta ove konstante vrednosti sa njenim vrednostima za ravan elektroda. Na primer, za mernu tačku R u sredini cevi iznosi  $W_x = 1$ , za tačku S  $W_x = 0,75$  i za tačku T  $W_x = 3$

Ovo polje linija pokazuje da bi čestica koja kroz presek struji istom brzinom mogla da ima različite vrednosti.

Ako bi se dopustilo da ovaj efekat deluje, elektromagnetni merač protoka zavisio bi od protočnog profila. Da bi se to izbeglo magnetno polje treba tako da se oblikuje da se za svaku tačku mernog preseka dobije konstantna vrednost.

Za mernu tačku R, gde je  $W_x = 1$ , jačina magnetnog polja je takođe  $B_y = 1$ , za tačku S je  $W_x = 0,75$ ,  $B_y = 1,33$  a za tačku T gde je  $W_x = 3$ ,  $B_y = 0,33$ .

Vidimo da je proizvod  $W_x \cdot B_y$  za bilo koju tačku mernog preseka konstantan. Znači, sa karakteriziranim magnetnim poljem postiže se kompenzacija linija protoka.

Vrednost elektromotorne sile između elektroda je:

$$U = K B v D$$

gde je: K – konstanta instrumenta  
D – unutrašnji prečnik cevi.

(11)

Iz izraza (11) se vidi da je indukovana elektromotorna sila ( $U$ ) linearno proporcionalna sa brzinom ( $\nu$ ) i da ne zavisi od vrste fluida, specifične težine, pritiska i temperature.

Protok je jednak

kako je

$$Q = \nu D^2 \pi/4$$

$$\nu = \frac{U}{K B D}$$

to konačna jednačina za izračunavanje protoka glasi:

$$Q = \frac{U}{K B} D \frac{\pi}{4} \quad (12)$$

Elektromagnetni merači se izrađuju za protoke od 250–2000 mm. Imaju visoku klasu tačnosti  $\pm 0,5\%$  i sve se više primenjuju, zbog toga što turbulentnost mernog fluida ne utiče značajnije na tačnost merenja. Neophodna prava deonica cevi je 5D ispred i 2D iza merača.

### MERENJE PROTOKA ULTRAZVUČNIM MERAČEM

Ultrazvučni merači protoka su relativno novi uređaji za merenje protoka. Do njihove praktične primene morao je biti rešen veliki broj tehničkih problema, a na njihovom daljem razvoju se uveliko radi.

Princip rada ultrazvučnog merača protoka počiva na tome što je pri prostiranju ultrazvučnih oscilacija (talasa) u pokretnoj sredini brzina ultrazvuka u relativno nepokretnom sistemu koordinata (zid cevovoda) jednaka vektorskom zbiru brzine ultrazvuka u relativnoj sredini i brzine same sredine u odnosu na cevovod. To je takozvani Doplerov efekat.

Princip rada ultrazvučnih merača može biti zasnovan na merenju vremenskog intervala ( $\Delta t$ ), razlike faza ( $\Delta \varphi$ ) među ultrazvučnim oscilacijama usmerenim u pravcu strujanja i u suprotnom smeru a takođe i na merenju razlike frekvencije ( $\Delta f$ ) ultrazvučnih oscilacija (talasa) usmerenih istovremeno u smeru strujanja i u suprotnom smeru. Pored toga, postoje merači protoka zasnovani na otklonu zvučnog talasa (zraka) izazvanog strujanjem tečnosti. Opšta klasifikaciona tablica uzajamno mogućeg postavljanja piezoelektričnih elemenata prikazana je na sl. 19.

1. Jednokanalna,
2. Dvokanalna,
3. (5) Jednokanalna (dvokanalna) s nagibom ultrazvučnog talasa prema struji fluida
- 4 (6.) Jednokanalna (dvokanalna) s nagibom ultrazvučnog talasa prema struji fluida i s prelamanjem

merena vrednost	Tipovi šema mogućih postavljanja piezoelemenata					
	1	2	3	4	5	6
$\Delta t$						
$\Delta \varphi$						
$\Delta f$	—		—	—		

Slika 19. Moguće šeme.

### ULTRAZVUČNI MERAČI PROTOKA S FAZOMETRIJSKIM PRETVARAČIMA

Na sl. 19. je prikazana jednokanalna šema ovog merača sa dva piezoelektrična elementa, postavljena u cevovodu u kome se kreće tečnost čiji se protok meri. Piezoelektrični elementi naizmenično rade kao izvori i prijemnici ultrazvučnih oscilovanja, koja prolaze kroz tečnost. Generator stvara sinusoidalni napon ultrazvučne frekvencije (100–300 kHz) koji preinačuje u pravougaoni.

Tenutna vrednost napona, na izvornom piezoelektričnom elementu je:

$$u_1 = U_{1m} \sin \omega t$$

gde je:  $U_{1m}$  — amplitudni napon.

Napon na prijemnom piezoelementu posle prolaza ultrazvučnih oscilacija kroz pokretnu sredinu, je:

$$u_2 = U_{2m} \sin W (t - \tau)$$

gde je:  $U_{2m}$  — amplitudni napon na prijemnom piezoelementu,

$\tau$  — vreme rasprostiranja ultrazvučnih oscilacija na rastojanju  $L$  između piezoelemenata

Razlika faza između izvorne oscilacije i oscilacije usmerene u smeru strujanja tečnosti i koja je prešla rastojanje ( $L$ ) je:

$$\Delta \varphi_1 = \omega \frac{L}{c+v} ; \tau_1 = \frac{L}{c+v} \quad ; \quad (13)$$

gde su:  $v$  — brzina strujanja tečnosti,

$c$  — brzina prostiranja ultrazvuka u tečnosti.

Razlika faza pri kretanju talasa u suprotnom smeru od smeru kretanja fluida je:

$$\Delta \varphi_2 = \omega \frac{L}{c-v} \quad \tau_2 = \frac{L}{c-v} \quad (14)$$

Razlika pomeranja faza između dva talasa proporcionalna je brzini kretanja tečnosti.

$$\Delta \varphi_1 - \Delta \varphi_2 = \omega \tau_1 - \omega \tau_2 = \omega L \left( \frac{1}{c+v} - \frac{1}{c-v} \right)$$

Pošto je  $\frac{1}{c+v} \approx \frac{1}{c} - \frac{v}{c^2}$ , uz pretpostavku da je  $v^2/c^2 \approx 0$ , dobija se:

$$\Delta \varphi_1 - \Delta \varphi_2 = \omega L \left[ \left( \frac{1}{c} - \frac{v}{c^2} \right) - \left( \frac{1}{c} + \frac{v}{c^2} \right) \right] = \omega L \left( -\frac{2cv}{c^2} \right) = \Rightarrow \Delta \varphi = \left| 2\omega \frac{vL}{c^2} \right| \quad (15)$$

Pri ovakvom odnosu veličina pomeranje faza odgovarajućih signala zavisi ne samo od izmerene brzine strujanja fluida već i od brzine zvuka u datoj sredini.

Da bi izbegli (isključili) uticaj brzine zvuka, u posebnom bloku se oduzimanjem ostvaruju veličine, obrnuto proporcionalne faznim pomeranjima. Pri tome se koriste sledeća preobrazovanja.

Na izlazu fazometarskog bloka naizmenično dobijamo napon

$$E_1 = \frac{k}{c+v} ; E_2 = \frac{k}{c-v}$$

gde je  $k$  — koeficijent proporcionalnosti

Struje  $I_1$  i  $I_2$  u kanalima fazometarskog bloka će odgovarati jednačinama:

$$I_1 = \frac{k_1}{E_1} = \frac{k_1(c+v)}{k} \quad I_2 = \frac{k_1}{E_2} = \frac{k_1(c-v)}{k}$$

Razlika vrednosti struja je proporcionalna brzina strujanja pa je:

$$\Delta I = I_1 - I_2 = \frac{2k_1 v}{k} = Kv \quad (16)$$

gde su  $k_1$  i  $K$  – koeficijenti proporcionalnosti.

Kao što jednačina (16) pokazuje na veličinu izmerene vrednosti ne utiče brzina prostiranja ultrazvuka u datoj sredini.

### ULTRAZVUČNI MERAČ PROTOKA S PROMENOM FREKVENCIJE

Skica merača protoka ovog tipa sa četiri piezoelektrična elementa prikazana je na sl. 20 [10]. Piezoelement ( $P_1$ ) proizvodi usmerene ultrazvučne talase frekvencije 10 MHz, koje prima prijemni piezoelement ( $P_2$ ). Vreme rasprostiranja talasa kroz nepokretnu sredinu na rastojanju  $L$  iznosi

$$\tau = \frac{L}{c}$$

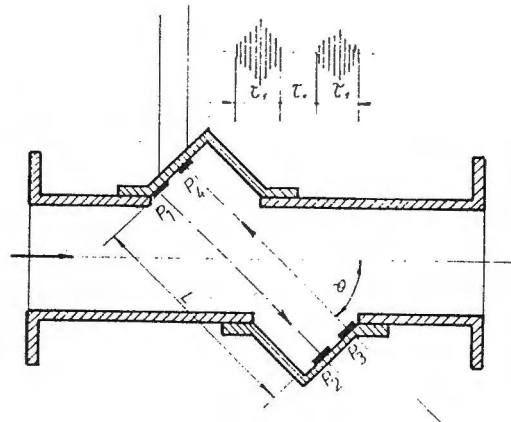
gde je:  $c$  – brzina rasprostiranja ultrazvuka u datoj sredini

$P_1, P_3$  – piezoelektrični izvori ultrazvuka

$P_2, P_4$  – piezoelektrični prijemnici

$\Theta$  – ugao nagiba ultrazvučnog talasa prema osi cevi

Slika 20. Skica merača protoka s impulsnom modulacijom ultrazvučnih oscilacija



Pri kretanju tečnosti kroz cevovod brzina strujanja u smeru kretanja ultrazvučnih oscilacija će biti jednaka:

$$\vec{c}_1 = \vec{c} + \vec{v} \Rightarrow c_1 = c + v \cos \Theta$$

Odgovarajuće vreme prolaska talasa između piezoelemenata  $P_1$  i  $P_2$  u smeru kretanja tečnosti i piezoelemenata  $P_3$  i  $P_4$  u smeru suprotnom od smera kretanja tečnosti biće:

$$\tau_1 = \frac{L}{c + v \cos \Theta} ; \tau_2 = \frac{L}{c - v \cos \Theta} \quad (17)$$

Period ponavljanja pravougaonih impulsa, usmerenih uz i niz strujanje jednak je

$$T_1 = 2\tau_1 = \frac{2L}{c + v \cos \Theta} \quad i \quad T_2 = 2\tau_2 = \frac{2L}{c - v \cos \Theta} \quad (18)$$

a njihova frekvencija

$$f_1 = \frac{C + \nu \cos \Theta}{2L}; \quad f_2 = \frac{C - \nu \cos \Theta}{2L} \quad (19)$$

Razlika frekvencija  $f_1$  i  $f_2$  će biti jednaka:

$$\Delta f = f_1 - f_2 = \frac{\nu \cos \Theta}{L} \quad (20)$$

Pošto su veličine  $\Theta$  i  $L$  konstantne za određenu konstrukciju, to je

$$\Delta f = K\nu \quad (21)$$

tj. signal linearno zavisi od brzine strujanja.

Uticaj promene fizičkih parametara sredine na rezultate merenja je isključen.

Sada je lako izračunati protok po obrascu:

$$Q = K\nu A \quad (22)$$

gde je:

$K$  – konstanta merača.

Ultrazvučni merači protoka nalaze sve veću primenu u raznim oblastima. Izrađuju se u raznim varijantama za prečnike cevi od 32 do 3000 mm [11] sa stepenom tačnosti  $\pm 1\%$ .

Na osnovu svega do sada iznetog napravljena je tabela 1 u kojoj su na pregledan način prikazane najvažnije osobine opisanih mernih postupaka.

## IZBOR METODE MERENJA PROTOKA

Posle duže, sveobuhvatne i svestrane analize, koja nije data zbog ograničenog prostora, mogućnosti primene opisanih mernih metoda, kao i određenih kriterijuma za usvajanje, izvršen je izbor metode merenja protoka na ispitnom štandu za ispitivanje vertikalnih aksijalnih pumpi.

Kriterijumi za izbor

### 1. Fizičke performanse pri merenju.

Traži se ista tačnost u što većem rasponu, zahteva se linearnost merne skale, dobra ponovljivost merenja i histereza.

### 2. Visoka pouzdanost

S obzirom na neperiodičnost ispitivanja koja se vrše u nejednakim vremenskim intervalima, u zavisnosti od učestanosti proizvodnje velikih pumpnih jedinica, merni uređaj treba i posle dužeg nekorišćenja bez posebnog podešavanja i proveravanja da da merne rezultate sa visokim stepenom prouzdanosti.

### 3. Mogućnost analize podataka

Pošto se u toku ispitivanja pumpnog agregata stalno menja veći broj parametara, to sistem merenja mora da obezbedi što direktniji pristup centralnom kompjuteru koji će da izvrši analizu i dobijene vrednosti preko perifernih organa prosledi do ispitivača.

## 4. Cena

Cena je naročito u današnje vreme zaista vrlo bitna stavka, ali pošto se radi o ispitnom štandu za ispitivanje vertikalnih pumpi čija snaga se meri megavatima, to ona može da utiče tek po zadovoljenju prethodnih kriterijuma.

## 5. Instaliranje, korišćenje i održavanje

Treba da bude što je moguće prostije, jednostavnije i jeftinije.

Na kraju, posle izvršene analize i ispoštovanih kriterijuma usvojen je:

## METOD MERENJA PROTOKA ELEKTROMAGNETNIM MERAČEM

## ZAKLJUČAK

Svako merenje, pa i merenje protoka, dovodi do nepogodnosti jednog istog mernog uređaja za merenje malih i velikih količina. Ako se zahteva da se mere i najveći i najmanji protoci, a odnos između njih je veliki, dolazi do izvesnih teškoća oko podešavanja mernog uređaja.

Pošto se u slučaju ispitnog štanda za ispitivanje vertikalnih aksijalnih pumpi radi o velikoj količini, nužno je bilo podeliti ukupni protok na veći broj manjih protoka. To je uz već usvojeni princip merenja protoka elektromagnetnim meračem, sa kalibracijom u stvarnim uslovi<sup>m</sup>a, [12] odredilo izgled i gabarite mernog štanda koji je prikazan na sl. 21 i sl. 22

## LITERATURA:

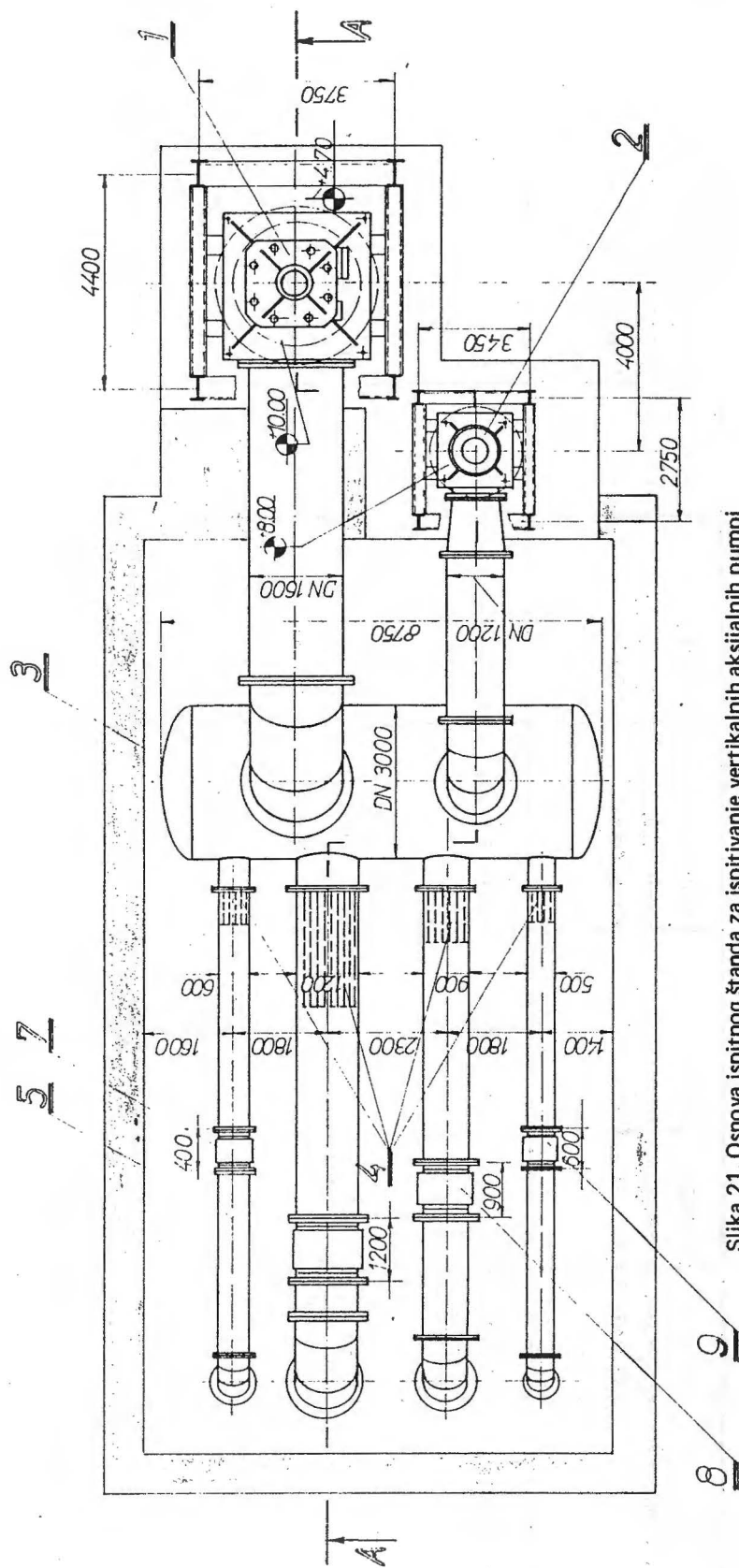
- [1] DIN 1944: (1968) Abnahmeversuche an Kreiselpumpen.
- [2] RO „ENERGOINVEST“: Prospektni materijal, 4113401016.
- [3] DIN 1952: (1982) Durchflußmessung mit Blenden, Düsen und Venturirohren in voll durchstromten Rohren mit Kreisquerschnitt, Berlin.
- [4] F. Čorlukić: Mjerenje protoka fluida, „Tehnička knjiga“, Zagreb, ATM, Zagreb (1975).
- [5] Kent Industrial Measurements: Prospektni materijal, Stonehouse (1983).
- [6] Dieterich Standard Corporation: Prospektni materijal, DS-1000 (5/79) Section B, Boulder, Colorado.
- [7] Dieterich Standard Corporation: Annubar flow handbok, DS-7300m (1/79), Boulder, Colorado.
- [8] Institut „Mihailo Pupin“: Elektromagnetna LOG-sonda, prospektni materijal, Beograd (1982).
- [9] Wilfried Kiene: Der magnetisch – induktive Durchflußmesser mit automatischen Nullpunkt und geringeren Energieverbrauch, Verlag GmbH, Munchen (1976).
- [10] Tehničkaskaja kibernetika, Ustrojstva i elementi SAR i SAV, knjiga 1, Izmeriteljnije ustroistva, preobrazujuščije elementi i ustrojstva. Mašinostroenije, Moskva (1973).
- [11] KROHNE: Produktions-programm 10 000 LD, Duisburg 1 (1983).
- [12] Č. Maksimović, Lj. Miljković, D. Đačić, M. Krtenić: Merenje protoka tečnosti elektromagnetnim meračem sa nehomogenim magnetnim poljem u nestandardnim uslovima.



UREĐAJ ZA MERENJE PROTOKA	MERNO PODRUČJE BRZINE ( [m/s] )	TAČNOST MERENJA [%]	OBLAST PRIMENE OD – DO [mm]	PODRUČJE MERENJA PROTOKA [m <sup>3</sup> /h]	POTREBNA PRAVA DEONICA CEVOVODA ISPRED/IZA	OPSEG MERENJA	NEPOVRAT- NI PAD PRITISKA [%]	NAPOMENA
ELEKTROMAGNETNI	0,5–10 optimalna 2–3	< ±0,5	350 – 3000	0,01 – 100 000	5D/2D	1:20	nema	meri u oba smera prednost tečnosti min 5μs/cm odstraniti uticaj magnet- nih polja
POTAPAJUĆI	0,8–8	± 2	100 – 2000	1 – 10 000	(10–15)D/	1:10	zanemarljiv	
LOG–SONDA	0,5–8	± 1	500 – 2000	350 – 90 000	10D/5D	1:16	zanemarljiv	meri u oba smera potrebno osnosimetrično polje brzina
HIDROMETRIJSKO KRILO	0,4–6	± 1,2 ± 1	800 – 1500 >1500–3200	700 – 180 000	20D/5D	1:15	zanemarljiv	potrebno bezvrtložno strujanje
DALOVA CEV		± 1	450 – 3000		(10–20)D/ne treba		2,5–8	
VENTURI CEV		± 1,5	200–1400		(8–15)D/ne treba		10–14	potreban osnosimetrični raspored brzina, bez vrtloženja
ALENOV SONI POSTUPAK	vidi jedn. br. (1)	± 1,5 ± 1,2 ± 1,0	250–800 800–1600 > 1600		> 4D/> 15 m		zanemarljiv	vreme prolaska sonog oblaka od E <sub>1</sub> do E <sub>2</sub> min 10 s
POSTUPAK RAZBLAŽENJA RASTVORA SOLI		± 2 ± 1,5	500 – 1500 ≥ 1500		zavisí od postojeće turbulencije u cevovodu		zanemarljiv	u mernim presecima obez- bediti pravilno i onemo- gučiti nepovratno strujanje
PITOVA CEV		± 1	20 – 2750		2D / 2D	3,5–1	1–3	
ULTRAZVUČNI	1–10	± 1	32 – 3000	3–250 000	20D / 2D	1:10	nema	

Tabela 1. Pregled opisanih mernih postupaka.

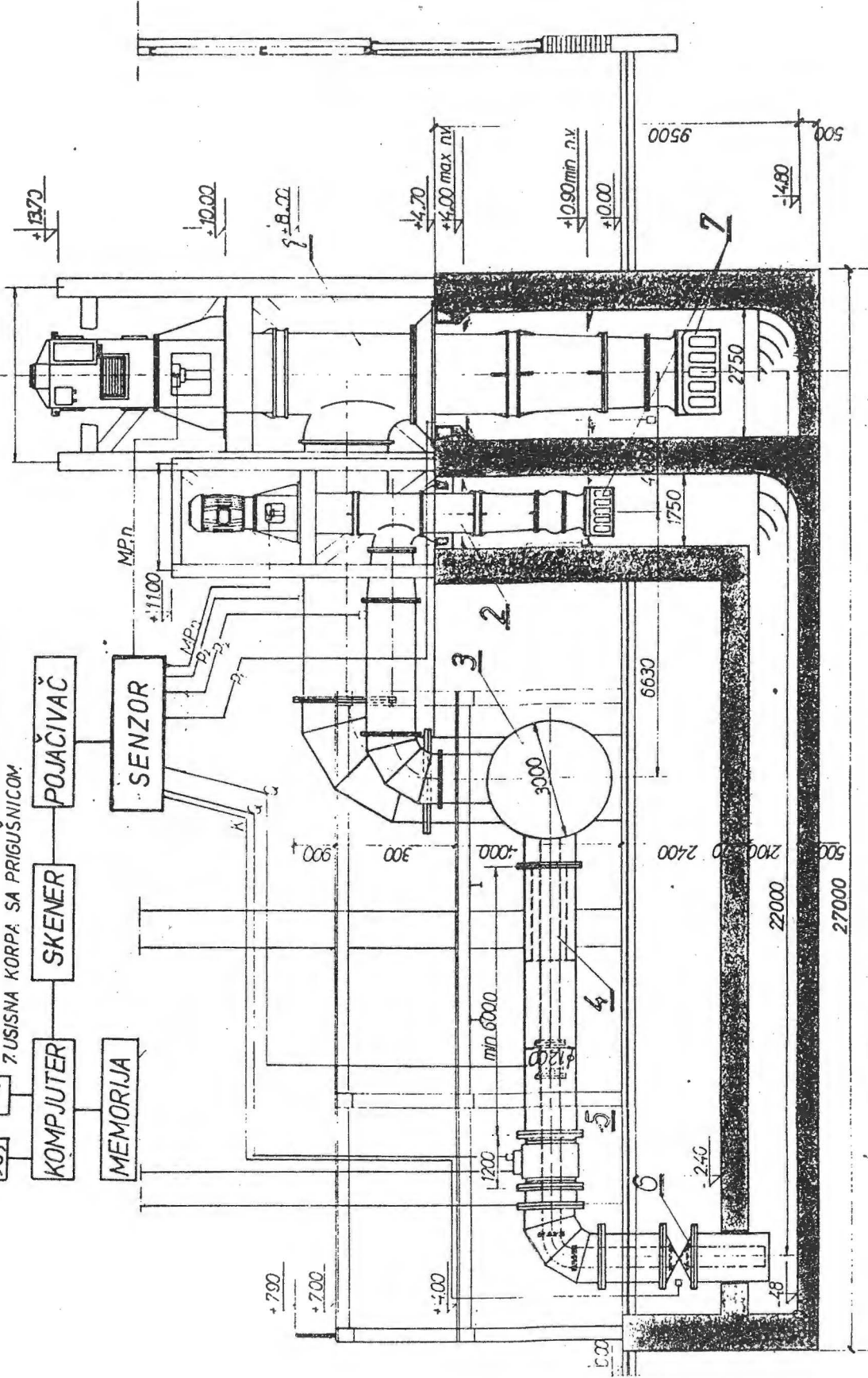
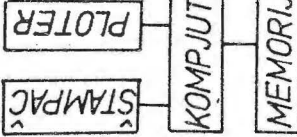
1. PUMPA 70 P P 140 SA ELEKTROMOTOROM
2. PUMPA 35 VZ 70 SA ELEKTROMOTOROM
3. REZERVOAR V = 60 m<sup>3</sup>
4. LAMINATOR
5. ELEKTROMAGNETNI MERAČ PROTOKA NO 1200 N.P.16
7. ELEKTROMAGNETNI MERAČ PROTOKA NO 600 I.P.16
8. ELEKTROMAGNETNI MERAČ PROTOKA NO 900 N.P.16
9. ELEKTROMAGNETNI MERAČ PROTOKA NO 500 N.P.16



Slika 21. Osnova ispitnog štanda za ispitivanje vertikalnih aksijalnih pumpi

- MP.n - senzor obrtnog momenta, snage i broja obrtaja
- P<sub>1</sub> - senzor pritiska na usisu
- P<sub>2</sub> - senzor pritiska na usisu
- Q - senzor protoka
- K - senzor položaja LZ

- 1. PUMPA 70PP140 SA ELEKTROMOTOROM
- 2. PUMPA 35VZ 70 SA ELEKTROMOTOROM
- 3. REZERVOAR V = 60 m<sup>3</sup>
- 4. LAMINATOR
- 5. ELEKTROMAGNETNI MERAČ PROTOKA NO1200NP16
- 6. ELEKTIRASTI ZATVARAČ NO1200NP16 NA E.M.P.
- 7. USISNA KORPA SA PRIGUŠNICOM.



Slika 22. Ispitni štand za ispitivanje vertikalnih aksijalnih pumpi — Presek A-A.