

# Mjerenje protokola

---

**Kovačić, Roko**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2020**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Split, Faculty of Maritime Studies / Sveučilište u Splitu, Pomorski fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:164:173021>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-23**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository - Faculty of Maritime Studies - Split -  
Repository - Faculty of Maritime Studies Split for  
permanent storage and preservation of digital  
resources of the institution](#)



UNIVERSITY OF SPLIT



**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**POMORSKI FAKULTET U SPLITU**

**Roko Kovačić**

**MJERENJE PROTOKA**

**ZAVRŠNI RAD**

**SPLIT, 2019.**

**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**POMORSKI FAKULTET U SPLITU**

**STUDIJ: BRODOSTROJARSTVO**

**MJERENJE PROTOKA**

**ZAVRŠNIRAD**

**MENTOR:**  
**doc. dr. sc. Tina Perić**

**STUDENT:**  
**Roko Kovačić**  
**MB:0023109917**

**SPLIT, 2019.**

## SAŽETAK

U ovom završnom radu, opisane su metode mjerenja i uređaji koji se koriste pri mjerenju protoka tekućina i plinova u procesnoj industriji. Poznavajući principe rada pojedinih uređaja za mjerenje razina lakše je odabrati odgovarajući način mjerenja za pojedinu primjenu. U ovom radu opisane su najčešće korištene metode za mjerenje protoka koje su podijeljene na četiri osnovne vrste ovisno o načelu na kojem mjerni uređaj vrši mjerenje. To su mehanički, tlačni, elektronički i maseni protokomjeri. Svaka metoda ima svoje prednosti i mane pa je potrebno odabrati koju metodu treba primijeniti u određenom slučaju.

**Ključne riječi:** *mjerenje protoka, metode mjerenja, mehanički, maseni, elektronički i tlačni protokomjeri.*

## ABSTRACT

In this paper, the measurement methods and devices used to measure the flow of liquids and gases in the process industry are described. Knowing the operating principles of individual level measuring devices makes it easier to select the appropriate measurement method for each application. This paper describes most of the methods for flow measurement and is divided into four basic types depending on the principle on which the measuring device performs measurements, and therefore we have mechanical, pressure, electronic and mass flowmeters. Each method has its advantages and disadvantages, so it is necessary to think carefully about which method should be applied in a particular case.

**Keywords:** *flow measurement, methods of measurement, mechanical, mass, electronic and pressure flowmeters.*

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD</b> .....	<b>1</b>
<b>2. POVIJEST MJERENJA PROTOKA</b> .....	<b>2</b>
<b>3. OPĆENITO O PROTOKU</b> .....	<b>4</b>
3.1. VOLUMNI PROTOK .....	4
3.2. MASENI PROTOK .....	5
<b>4. MJERENJE PROTOKA</b> .....	<b>6</b>
4.1. MJERENJE U PROCESNOJ INDUSTRIJI.....	6
4.2. MJERENJE NEELEKTRIČNIH VELIČINA.....	7
4.2.1. Otporni mjerni pretvornici .....	9
4.2.2. Induktivni mjerni pretvornici.....	10
4.2.3. Kondzatorski mjerni pretvornici.....	10
4.2.4. Indukcijski mjerni pretvornici .....	11
4.2.5. Piezoelektrični mjerni pretvornici .....	11
4.2.6. Elektrodinamički mjerni pretvornici.....	12
4.3. MJERENJE PROTOKA.....	13
<b>5. MJERNI INSTRUMENTI I PRINCIP RADA</b> .....	<b>15</b>
5.1. MEHANIČKI PROTOKOMJERI.....	15
5.1.1. Rotametar .....	15
5.1.2. Turbinski mjerač protoka.....	16
5.1.3. Potisni mjerač protoka .....	18
5.2. TLAČNI PROTOKOMJERI.....	18
5.2.1. Dallove i Venturijeve cijevi .....	20
5.2.2. Mjerna prigušnica i hidrometar .....	20
5.2.3. Pitotova cijev .....	22
5.3. ELEKTRONIČKI PROTOKOMJERI .....	23
5.3.1. Elektromagnetski protokomjer .....	23
5.3.2. Vortex protokomjer .....	25
5.3.3. Ultrazvučni protokomjer .....	26
5.4. MASENI PROTOKOMJERI .....	27
5.4.1. Coriolisov protokomjer .....	27
5.4.2. Termodinamički protokomjer .....	28

<b>6. PRIMJENA MJERENJA PROTOKA NA BRODU .....</b>	<b>30</b>
<b>6.1. MJERENJE POTROŠNJE GORIVA .....</b>	<b>30</b>
<b>6.2. MJERENJE KOLIČINE ZRAKA .....</b>	<b>31</b>
<b>6.3. MJERENJE PROTOKA U CJEVOVODIMA .....</b>	<b>31</b>
<b>7. ZAKLJUČAK .....</b>	<b>33</b>
<b>8. LITERATURA .....</b>	<b>34</b>
<b>POPIS SLIKA .....</b>	<b>35</b>
<b>POPIS KRATICA .....</b>	<b>36</b>

## 1. UVOD

U današnje vrijeme gospodarstvo se ne može zamisliti bez mjerenja. Mjerenje je postalo nezaobilazan dio svakodnevnice jer predstavlja jedan od temelja industrijskog upravljanja kvalitetom proizvoda ili usluge te kod suvremenih industrija troškovi mjerenja iznose od 10 % do 15 % troškova proizvodnje. U ovom završnom radu opisano je mjerenje neelektrične veličine, protoka [1].

Neke od metoda za mjerenje protoka fluida veoma su stare te su još stari Egipćani i Rimljani iskustvenim metodama mjerili protok vode. Egipćani su pomoću mjernih brana mjerili protok vode u kanalima za navodnjavanje dok su Rimljani za vrijeme Cezara mjerili potrošnju vode jednom vrstom blende. U 18. stoljeću švicarski matematičar Johann Bernoulli postavio je teorijske osnove na kojima se bazira nekoliko suvremenih metoda mjerenja protoka fluida [2].

Potreba za usavršavanjem starih i pronalaženjem novih metoda mjerenja rasla je zbog same ekonomske i tehnološke važnosti mjerenja protoka. S napretkom tehnologije došlo je do razvijanja velikog broja postupaka i uređaja. Može se reći da trenutno na svjetskom tržištu postoji preko 100 tipova mjernih uređaja, a novi se svakodnevno pojavljuju.

Prvi dio rada vezan je za opis pojma protoka kao fizikalne veličine koja se mjeri u svrhu približavanja pojma i osnovnih zakonitosti vezanih uz protok. Zatim je dan povijesni pregled razvoja mjernih uređaja i mjernih metoda s kojima se protok mjerio kroz prošlost.

Drugi dio vezan je sa postupak mjerenja protoka gdje je kao uvod dan sažetak važnosti mjerenja i uporabe mjerenja neelektričnih veličina. Na ovaj dio nastavlja se opis i princip rada uređaja koji se koriste u ovom području. U završnom dijelu opisana je primjena mjerenja protoka na brodu i u brodskim sustavima.

## 2. POVIJEST MJERENJA PROTOKA

Povijest mjerenja protoka počinje tijekom drevne civilizacije u Egiptu, gdje su ljudi koristili čudna načela za procjenu toka rijeke Nil. Procjena toka je pokazivala hoće li berba biti povoljna ili nepovoljna.

Razvoj mjerenja nastavlja se u Kini, oko 256. godine prije Krista, kada je država Qin primijenila sustav navodnjavanja Dujiangyan kao način za kontrolu poplava i osiguravanje očuvanja vode. Ovaj sustav navodnjavanja se koristi i u današnje vrijeme te trenutno navodnjava više od 5.300 kvadratnih kilometara zemlje na tom području.

U 18. stoljeću moderni mjerači protoka bilježe pojačani razvoj. Švicarski izumitelj Daniel je 1738. implementirao diferencijalni tlak kako bi prosudio protok vode. Kasnije, 1791. talijanski istraživač G. B. Venturi proveo je studije na Venturi cijevi za mjerenje protoka. Njegovi rezultati objavljeni su kasnije te godine.

Mnogo kasnije, 1886. godine, Hershel u SAD-u osmislio je Venturi uređaj za učinkovito mjerenje protoka vode u otvorenim kanalima koji je Parshall kasnije promijenio u letvu Venturi za mjerenje protoka.

Njemački inženjer Karl Kueppers zaslužan je za razvoj prvog stvarnog mjerača protoka promjenjive površine. Dizajniran i lansiran 1908. godine, uređaj je iste godine i patentiran u Njemačkoj. Početna funkcija odnosila se na mjerenje protoka vode.

Felix Meyer među prvima je prepoznao značaj Kueppersova rada i implementirao postupak nuđenja brojila na prodaju. 1909. godine nastala je tvrtka *Duetsche Rotawerke* u Aachenu u Njemačkoj. Nije trebalo dugo da novi uređaj privuče pažnju u Europi, Velikoj Britaniji i drugim područjima.

U prvim desetljećima 20. stoljeća Kueppers je nastavio usavršavati osnovni dizajn. Konkretno, poboljšao je oblik plovaka koji se koristio u staklenoj cijevi, tako da su rezultati ispitivanja protoka vode bili precizniji. Tijekom tog razdoblja, Kueppersov proizvod postao je poznat kao rotameter.



Od 1911. do 1912. Mađar Tollbar izmislio je novu teoriju nazvanu Tollbar vrtlog. Do 1930-ih godina ultrazvučni mjerači protoka koristili su se za mjerenje brzine protoka tekućeg zraka, ali nisu postigli dobre rezultate.

1955. godine Maxon je stvorio zvučnu cikličku metodu kako bi precizno izmjerio protok u zrakoplovnom gorivu. Zbog ograničenja tehnologije i ekonomičnosti do i tijekom 1950-ih, u svim industrijama uglavnom se koriste rotacijski protokomjeri i pilot cijev.

Šezdesete su godine stvorile instrumente koji su naginjali minijaturizaciji i preciznosti. Godina 1968. bila je prva prekretnica razvoja vrtložnih mjerača protoka. Japanska tvrtka *Yokogawa* glavna je zadužna za uspjeh stavljanja ovog proizvoda na tržište. Srž koncepta ovog proizvoda bila je njegova pouzdanost.

Tijekom 1970-ih, *Yokogawa* je odgovorila na veliku potražnju procesne industrije za pouzdanim mjeračima protoka različite vrste i 1983. zaključila strateško spajanje s japanskom tvrtkom *Hokushin Electric Works*, proizvođačem mjerača protoka. Kombinirajući njihove snage u mjeračima koje rade na principu vrtloga i magnetske indukcije stiglo se do kvalitetnih i modernih mjerača protoka.

U devedesetima je porasla potražnja za vodomjerima. Procijenjeno je da je samo u 1989. godini postavljeno 15 milijuna protočnih brojila. Konkretno, ultrazvučni mjerači protoka imali su najveći razvoj od svih uređaja.

### 3. OPĆENITO O PROTOKU

Protok (oznaka  $Q$  ili  $q$ ) fizikalna je veličina koja opisuje količinu nekoga fluida (tekućina ili plin) što protječe promatranim presjekom (npr. cijevi, riječnoga korita, srčane arterije) u vremenskom intervalu [4]. Mjerenje protoka provodi se na uzorku, okomito na njegovu ravninu, uz definiranu razliku potencijala koji kontroliraju tečenje.

#### 3.1. VOLUMNI PROTOK

U fizici i inženjerstvu, posebno u dinamici i hidrometriji fluida volumni protok (brzina protoka fluida ili brzina volumena) je volumen fluida koji prolazi po jedinici vremena; obično predstavljen simbolom  $Q$  (ponekad  $\dot{V}$ ). Jedinica SI sustava je  $\text{m}^3/\text{s}$  (kubični metar u sekundi). Druga jedinica koja se koristi je sccm (standardni kubični centimetar u minuti) [4].

Volumni protok se određuje kao:

$$Q = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (1)$$

gdje je:

$Q$  – volumni protok [ $\text{m}^3/\text{s}$ ],

$\Delta V$  – promjena obujma fluida [ $\text{m}^3$ ], koji teče kroz neki presjek (npr. cijevi),

$\Delta t$  – vrijeme trajanja toka fluida koji protječe kroz neki presjek [s].

Brzina fluida u cijevi mijenja se položajem i vremenom. Bitno se razlikuje laminarno od turbulentnog protjecanja.

Laminarno protjecanje je mirno, jednolično strujanje fluida (kapljevina i plinova) u paralelnim slojevima s malim miješanjem među njima, bez turbulencija. To je prirodan tok strujnica kod protjecanja zraka. Pojavljuje se kada fluid (voda ili zrak) teče paralelnim slojevima, bez poremećaja između slojeva. U dinamici fluida, laminarni tok je režim toka karakteriziran visokim momentom difuzije i niskim momentom konvekcije [4].

Turbulentno protjecanje je nepravilno vrtložno gibanje koje se pojavljuje u tekućinama i plinovima kad protječu pored čvrstih predmeta ili kad im brzina strujanja

prijeđe određenu granicu. Za turbulentno strujanje karakteristično je da pored srednje brzine cijelog strujanja, svaka čestica tekućine ili plina ima još i dodatnu brzinu koja može biti djelomično u smjeru glavnog strujanja, djelomično oprečna na smjer strujanja i to je osnovna razlika između turbulentnog od laminarnog strujanja, u kojem nema dodatnih brzina. Pod određenim uvjetima uz turbulenciju pojavljuje se i kavitacija [4].

### 3.2. MASENI PROTOK

Maseni protok ( $q$  ili  $\dot{m}$ ) je masa fluida koja prolazi neku točku u jedinici vremena [kg/s]. Maseni protok se može odrediti kao:

$$q = \frac{m}{\Delta t} = \frac{V \cdot \rho}{\Delta t} = \frac{A \cdot \Delta s \cdot \rho}{\Delta t} = A \cdot v \cdot \rho \quad (2)$$

budući da je:

$$Q = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{A \cdot \Delta s}{\Delta t} = A \cdot v \quad (3)$$

Može se zaključiti kako je poveznica između volumnog i masenog protoka gustoća:

$$q = \rho \cdot Q \quad (4)$$

gdje je:

$\rho$  – gustoća fluida [kg/m<sup>3</sup>],

$v$  – brzina fluida u cijevi [m/s],

$A$  – presjek cijevi [m<sup>2</sup>],

$Q$  – volumni protok [m<sup>3</sup>/s],

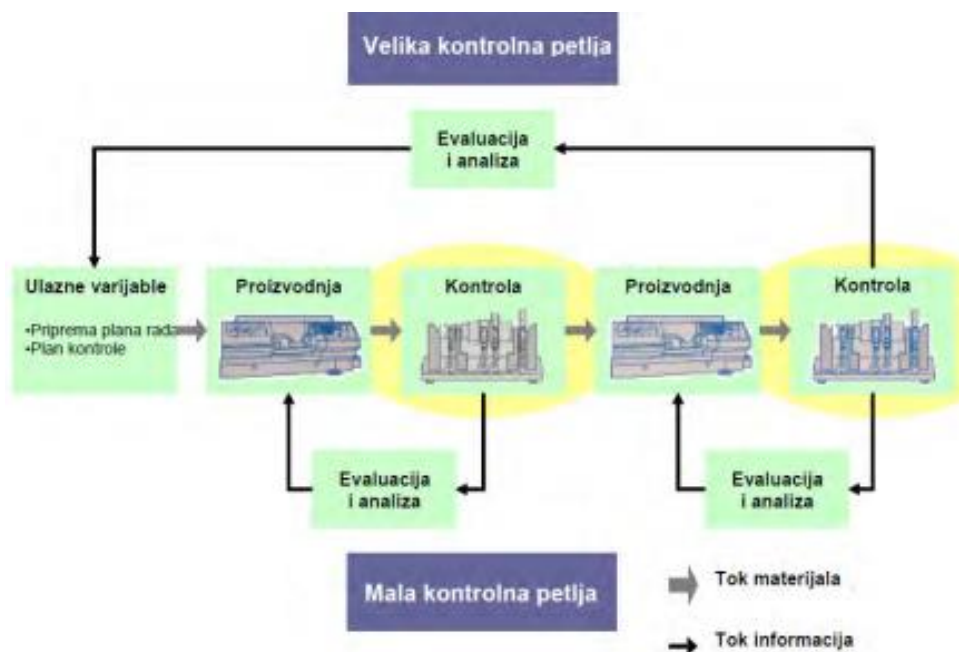
## 4. MJERENJE PROTOKA

### 4.1. MJERENJE U PROCESNOJ INDUSTRIJI

Mjerenja u proizvodnji i automatiziranim procesima doživjela su napredak jer su se promijenili kriteriji koje moraju zadovoljavati proizvodi odnosno krajnji rezultati. Stalno sužavanje tolerancija diktiralo je i sasvim nove konstrukcije mjernih i kontrolnih uređaja i instrumenata te način njihove primjene.

Zbog svega toga potrebno je znati planirati, konstruirati, koristiti te upravljati mjernim instrumentima, etalonima, pristrojima itd. Moraju se poznavati metode, fizički principi rada, eventualne greške, njihova veličina i način kako se mogu izbjeći. Sve veći broj uređaja i mjernih instrumenata kao neophodan dio ima software-a koji predstavljaju važan dio suvremenih mjernih uređaja [2].

Slika 1 prikazuje povezanost ulaznih parametara u proizvodni proces, proizvodnje, ispitivanja i kontrole u procesu proizvodnje i analize dobivenih rezultata unutar automatskog procesa.



Slika 1. Veza proizvodnje, kontrole, automatizacije, proizvoda i metrologije [3]

## 4.2. MJERENJE NEELEKTRIČNIH VELIČINA

U svakodnevnom životu ljudi se svakodnevno susreću s neelektričnim veličinama te su one predmet mjerenja i proučavanja. Upravo mjerenje tih veličina, posebice temperature, tlaka, protoka, razine tekućine, vlažnosti i toplinske energije, čini većinu mjerenja koja je prisutna u tehnici i industriji.

Pretvorba neelektričnih u električne veličine vrlo je važna jer se na taj način mogu jednom metodom ili jednom vrstom instrumenta mjeriti različite fizikalne veličine, prikazati i izmjeriti vrlo male promjene mjerene neelektrične veličine, mjeriti i bilježiti vrlo brze promjene neelektrične veličine te vršiti mjerenja na daljinu. Ova metoda ima brojne prednosti poput visoke osjetljivosti i točnosti sustava, jednostavnog memoriranja, očitavanja i pamćenja podataka, jednostavnog održavanja, registriranja i nadzora informacija.

Objasnit ćemo kako se i na koje načine mogu dobiti rezultati određenih mjerenja u industriji, gospodarstvima i slično te koja su prigodnija za određene slučajeve. Tema je jako korisna za studente koji se bave računanjem i koji rade u sličnim postrojenjima jer poznavanjem određenih uređaja i postupaka olakšava sami čin mjerenja te ga čini pouzdanijim i puno točniji.

Prikupljanje podataka nam služi da se dobiju sve osnovne informacije o objektu mjerenja te da se mjerni signal pretvori u električni signal. Tri su glavne funkcije podsustava za prikupljanje podataka [10]:

- transformacija,
- prilagodba i
- analogno-digitalno (A/D) pretvaranje.

U obradu podataka spada i odabir ili neki drugi način korištenja mjerenim podacima propisanim načinom. Taj zadatak uglavnom obavlja mikroprocesor ili računalo. Zadnji korak je distribucija podataka s kojom dostavljamo obrađene podatke ciljnom objektu.

Mjerni postupak se izvodi pomoću mjernih uređaja ili instrumenata. Svaki mjerni instrument se u pravilu sastoji od:

- mjernog osjetila,
- mjernog pretvornika i
- pokazivala.

Osjetilo je element koji neposredno osjeća promjene u procesu i na svom izlazu daje odziv koji je analogan ulaznoj fizikalnoj veličini. Pokazivalo je tehnički element koji na neki način pokazuje vrijednost mjerene veličine. Pretvornik je tehnički element koji izlaznu veličinu osjetila pretvara u analognu fizikalnu veličinu prikladnu za prijenos ili dovod na pokazivalo. Pretvaranje neelektričnih veličina u električne ostvaruje se pomoću pretvornika: aktivnog i pasivnog.

Aktivnim pretvornicima u principu nije potreban izvor pomoćne mjerne struje te se ovdje odvija pretvorba toplinske, svjetlosne, mehaničke ili kemijske energije u električnu. Pasivnim pretvornicima je za proces mjerenja nužan pomoćni izvor mjerne struje te mjerena neelektrična veličina izaziva neposrednu ili posrednu izmjenu prikladnog kapaciteta, otpora, induktiviteta ili međuinduktiviteta.

Djelovanje pretvornika se zasniva na velikom broju fizikalnih pojava pa se isto mjerenje može često riješiti na više načina kao što je vidljivo u tablici 1 gdje je prikazan odnos među pretvornicima. Potrebno je odabrati rješenje koje omogućuje najjednostavniju i najpouzdaniju konstrukciju [5].

**Tablica 1. Pregled pretvornika [5]**

Mjerne veličine	Aktivni pretvornici	Pasivni pretvornici
Pomak	Pomoćni generator (npr. Impulsa)	Otporni, induktivni, kapacitativni, fotootporni, kontaktni pretvornik
Brzina, brzina vrtnje	Indukcijski pretvornik	Otporni, induktivni, kapacitativni pretvornik
Ubrzanje, kutno ubrzanje	Piezoelektrični, indukcijski pretvornik	Otporni, induktivni, kapacitativni pretvornik
Sila, tlak	Piezoelektrični pretvornik	Otporni, induktivni, kapacitativni

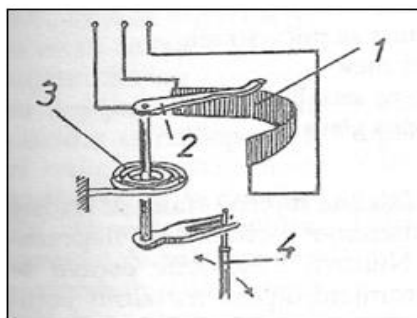
		pretvornik
Temperatura	Termoelement	Otporni pretvornik
Kemijske	Galvanski pretvornik	Otporni pretvornik
Optičke	Fotoelemen	Fotootporni element

Postoje mnogobrojne izvedbe koje se koriste za mjerenja raznovrsnih neelektričnih veličina te će u idućem dijelu rada neke od njih biti pobliže prikazane.

#### 4.2.1. Otporni mjerni pretvornici

Najpoznatiji predstavnik pasivnih mjernih pretvornika su otporni mjerni pretvornici, od kojih su najznačajniji otporni pretvornik s kliznikom, otporni pretvornik s prstenastom cijevi i živom te otporni termometri.

Kod otpornih pretvarača za mjerenje mjerena veličina izaziva pomak klizača čime se dakle mijenja i otpornost u strujnom krugu otpornog pretvarača (slika 2). Sama promjena tog otpora mjeri se metodama za mjerenje otpora.



Slika 2. Otporni pretvornika s kliznikom [5]

Osnovni dijelovi prikazani na slici redom su: 1-žičani namot; 2-klizač; 3-povratna opruga; 4-poluga za pomak.

Za mjerenje pravocrtnih pomaka i zakreta koriste se izvedbe sa prstenastom staklenom cijevi unutar koje se nalazi tanka platinska žica otpora  $10\Omega$ . Prstenasta cijev je do polovine ispunjena živom iznad koje se nalazi vodik. Presjek žice je velik tako da je dio platinske žice praktički kratko spojen, pa zakretanje prstena oko centra  $O$  mijenja otpor između točaka priključaka (A-C) i (C-B). Ova izvedba je dobro zaštićena od prljavštine, ima pouzdan kontakt, ali je osjetljiva na naglo pomicanje [11].

Za mjerenje temperature koriste se otporni termometri kod kojih mjerena temperatura mijenja otpor žičanog ili poluvodičkog otpornika. Za mjerenje temperatura od: (-220°C do +750 °C) koriste se žičani otporni termoelementi izrađeni od platinske ili žice od nikla.

#### **4.2.2. Induktivni mjerni pretvornici**

Ova grupa elektromagnetnih senzora radi na principu promjene magnetnog otpora te spada u pasivne pretvornike. Promjena magnetnog otpora može se ostvariti promjenom:

- ukupne dužine zavojnice,
- zračnog prostora,
- permeabilnosti materijala jezgra,
- međusobnim djelovanjem dva ili više elemenata,
- promjenom međusobnog položaja jezgri,
- promjenom položaja dvije zavojnice.

Najčešće se koriste senzori kod kojih se promjena magnetnog otpora ostvaruje promjenom veličine zračnog prostora ili promjenom magnetne permeabilnosti tj. propustljivosti željezne jezgre  $\mu$ .

#### **4.2.3. Kondenzatorski mjerni pretvornici**

Rad im se zasniva na promjeni kapaciteta pod utjecajem mjerene veličine te su također u grupi pasivnih pretvornika. Promjena kapaciteta može nastati zbog promjene razmaka elektroda ili zbog promjene njihovih djelujućih površina. Ovakve se izvedbe koriste za mjerenje pomaka, sile, brzine i ubrzanja.

Postoje izvedbe u kojima promjenu kapaciteta izaziva promjena dielektričnosti, koja nastaje zamjenom dielektrika ili promjenom svojstava dielektrika pod utjecajem vanjskih uzroka (temperature, vlage, itd.). Na osnovu poznate dielektričnosti može se mjeriti debljina neke tvari, nivo tekućine, može se odrediti količina primjese ako se njena dielektričnost znatno razlikuje od dielektričnosti osnovne komponente [5].



#### 4.2.4. Indukcijski mjerni pretvornici

Najpoznatiji predstavnici skupine aktivnih mjernih pretvornika su indukcijski, termoelektrični, piezoelektrični te elektrodinamički mjerni pretvornici.

Indukcijski mjerni pretvornici svoj rad baziraju se na osnovi elektromagnetske indukcije pri čemu se događa pretvorba mehaničke energije u električnu. U svitku ovakvih pretvornika se inducira napon koji je razmjernan brzini promjene magnetskoga toka  $\Phi$  kojega obuhvaća  $N$  zavoja svitka.

Ovakvi se pretvornici mogu upotrebljavati i kao vibrometri. Vibrometri služe za mjerenje relativnih vibracija i za mjerenje amplituda vibracija i akceleracija. Ovisno o slučaju vibrometri se obično učvršćuju na mirnu podlogu, ali ukoliko to nije moguće onda su prikladniji vibrometri za mjerenje apsolutnih vibracija koje se učvršćuju na sami mjereni objekt. Danas su u upotrebi laserski vibrometri, slika 3, kojima nije potrebno omogućiti kontakt s površinom koja vibrira jer se zasniva na Dopplerovom efektu.



Slika 3. Laserski vibrometer [11]

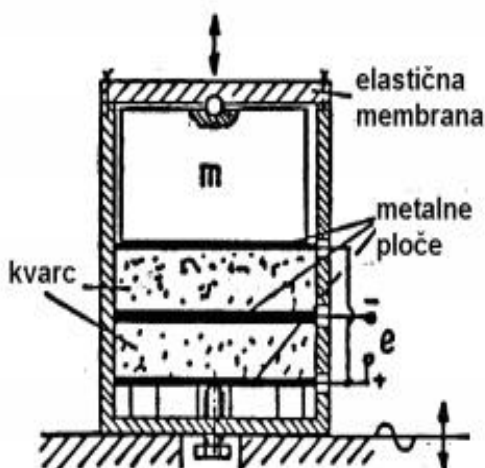
Interferometar koristi dva objektiva kojima dijeli svjetlo na dva dijela. Prva referentna zraka ide direktno u detektor dok se druga mjerena zraka usmjerava u mjereni objekt gdje se svjetlo raspršuje zbog pomične površine. Ovisno o brzini i pomicanju, povratno raspršeno svjetlo je promijenjeno u frekvenciji i fazi. Signali se analiziraju te se dobiva traženi rezultat [13].

#### 4.2.5. Piezoelektrični mjerni pretvornici

Piezoelektrički pretvarači svoj rad temelje na principu nastanka električnog signala djelovanjem tlaka na neki predmet. Piezoelektrični efekt je primijećen dosta rano kod kristala kvarca, ako se on izloži sili na njegovoj površini doći će do razdvajanja električkih

naboja. Kada se pločica kvarca optereti silom u smjeru jedne od električnih osi dolazi do malih deformacija. Pomicanjem atoma na suprotnim plohama dolazi do razdvajanja pozitivnih i negativnih naboja. Količina nastalog naboja je tada proporcionalna primijenjenoj sili. Ovakvi senzori se koriste za mjerenje ubrzanja, plinova, protoka i razine.

U kućištu pretvarača ugrađene su piezoelektrične pločice koje su elastično učvršćene te su prislonjene na seizmičku masu, slika 4. Kad se kućište, koje je vezano za objekt koji vibrira, pomakne u smjeru  $x$ , okomitom na površinu pločica, uslijed inercije seizmičke mase, javlja se sila  $F$  koja izaziva piezoelektrični naboj na pločicama. Sila  $F$  je proporcionalna ubrzanju, kome je proporcionalan i izlazni napon pretvarača. Osjetljivost pretvarača se povećava sa više slojeva pločica [2].



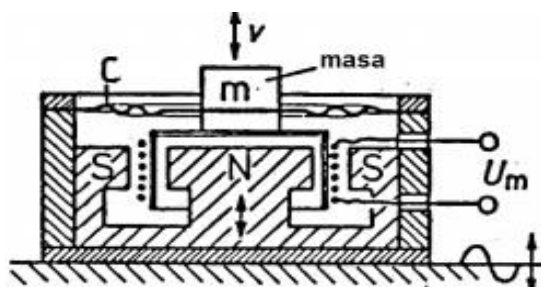
Slika 4. Piezoelektrični pretvarač [2]

#### 4.2.6. Elektrodinamički mjerni pretvornici

Elektrodinamički pretvarači su mali generatori koji proizvode električni napon proporcionalan brzini vrtnje. Obično se pogone plosnatim ili zupčastim remenima te mogu proizvoditi izmjenični ili istosmjerni napon. Izmjenični generatori su izvedeni s rotirajućim permanentnim magnetima i s mirujućim svitcima. Inducirani napon najčešće se ispravlja i zatim privodi pokaznom instrumentu.

Princip rada istosmjernog generatora temelji se na vrtnji polnog kotača s namotanom svitkom u magnetskom polju permanentnog magneta. U polnom kotaču se inducira napon koji je razmjern brzini vrtnje. Ako se krajevi svitka priključe na komutator na izlazu se dobije pulsirajući istosmjerni napon čija je amplituda razmjerna brzini vrtnje.

Pretvarač, slika 5, sastoji se od: permanentnog magneta, pomične zavojnice, seizmičke mase  $m$ , opruge ili elastične membrane za učvršćenje zavojnice ili seizmičke mase i kućišta koje se veže za mjereni objekt [7].



Slika 5. Elektrodinamički pretvarač [7]

#### 4.3. MJERENJE PROTOKA

Mjerenje protoka je važan dio svakog proizvodnog procesa. Protok je jedna od osnovnih fizikalnih veličina koja se mjeri u industrijskim pogonima. Mjerenjem protoka određuju se energetske i materijalne podatke na osnovu kojih se određuje produktivnost procesa proizvodnje. Istovremeno protok je najčešće i osnovna veličina čijom se promjenom upravlja procesom proizvodnje. Mjerenje protoka kapljevina, plinova, višefaznih tekućina i suspenzija je složeno, podložno je brojnim pogreškama, i zato je razvijen je veliki broj različitih mjernih postupka u svrhu točnog i pouzdanog mjerenja.

Mjerenje protoka se skoro uvijek koristi za mjerenje nekoga svojstva fluida. Fluidi čiji se protok mjeri su tekućine, plinovi i mješavine tekućina i krutina. Najlakše je mjeriti tekućine zbog toga što su one nestlačive, dok mjerenje plinova zahtjeva dodatno računanje koristeći tlakove i temperature jer plinovi imaju svojstvo stlačivosti. Brzina tekućine u cijevi mijenja se položajem i vremenom, a bitno se razlikuje laminarno od turbulentnog strujanja. Mješavine tekućina i krutina su tekućine s raspršenim krutim česticama u njima i te mješavine se mogu mijenjati od blata do skoro prozirnih tekućina s velikim česticama krutih tvari u njima.

Metode za mjerenje protoka kapljevina obuhvaćaju mjerne sustave na bazi mjerenja razlike tlakova, mehaničke, elektroničke i masene protokomjere [1].

Osnovno što je potrebno znati kada se govori o protoku fluida je razlika između volumnog i masenog protoka. Razlikujemo dvije vrste mjerenja protoka:

- mjerenje volumnog protoka, gdje obujam fluida prolazi neku točku u jedinici vremena ( $\text{m}^3/\text{s}$ ). Mane volumetrijskog mjerenja protoka je da se može mjeriti samo stacionaran protok.

$$Q = \frac{V}{t} \quad (5)$$

- mjerenje masenog protoka gdje masa fluida prolazi neku točku u jedinici vremena ( $\text{kg}/\text{s}$ ).

$$\dot{m} = Q \cdot \rho \quad (6)$$

Postoji mnogo načina za mjerenje protoka od kojih će neki biti opisani u sljedećim dijelovima ovog rada. Sama metoda mjerenja najčešće se odabire ovisno o okolnostima u kojima se protok mjeri i o ovisnosti o zahtijevanoj točnosti.

Uređaje prema metodi mjerenja protoka dijelimo na:

- mehaničke protokomjere,
- tlačne protokomjere,
- elektroničke protokomjere i
- masene protokomjere.

## 5. MJERNI INSTRUMENTI I PRINCIP RADA

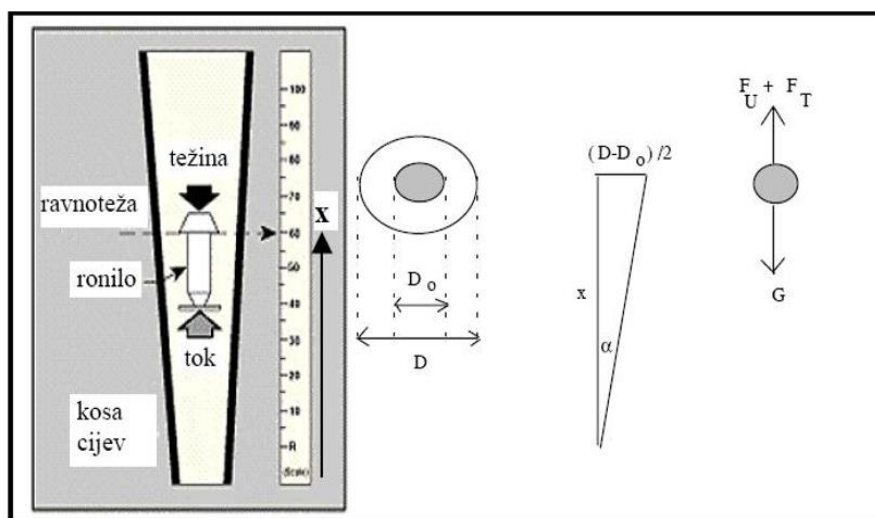
### 5.1. MEHANIČKI PROTOKOMJERI

Mehanički protokomjeri su mehanički mjerači protoka čije se načelo mjerenja protoka zasniva na prijenosu količine gibanja tekućine (kapljevine ili plina) na mehanički uređaj s rotorom. Mogu biti rotametri, mjerne turbine ili ostali rotacijski protokomjeri [4].

#### 5.1.1. Rotametar

Rotametar je jedan od najčešće upotrebljivanih uređaja za mjerenje protoka u industriji. Rotametar odlikuje jednostavnost uređaja, široka primjenljivosti s obzirom na mogućnost mjerenja protoka plinova i kapljevina i vrlo veliki mjerni opseg. Oni imaju konstantan otvor te je ovdje površina suženja promjenljiva. Suženje tvori ronilo uronjeno u tekućini koja protječe kroz prozirnju vertikalnu cijev. Specifična težina ronila veća od specifične težine fluida zauzme položaj koji ovisi o protoku. Za vrlo male protoke ronilo pada na dno dok većem protoku odgovara položaj ronila na većoj visini.

Princip rada rotametra se zasniva na izjednačavanju gravitacijskih sila i sila otpora oblika te je prikazan na slici 6.



Cijev kroz koju protječe fluid ima promjenljivi radijus, najuži presjek na ulazu u cijev te najširi na izlazu. Tekućina protječe kroz prsten između ronila i cijevi. Položaj ronila je ravnotežni položaj koji je definiran težinom ronila ( $G$ ), uzgonom ( $F_U$ ) i silom ( $F_T$ )

kojom tekućina djeluje na ronilo (sila je u suprotnom smjeru od gravitacijske sile). Protok je definiran položajem ronila ( $x$ ) koji se očita na skali uz cijev. Rotametar treba uvijek baždariiti za odabranu tekućinu, kapljevinu ili plin i uz standardne uvjete. Ako se promjeni temperatura ili tlak tekućine mijenjaju se gustoća i viskozitet i time se bitno mijenja karakteristika [4].

U ravnotežnom položaju ronila vrijedi jednakost:

$$F_U + F_T = G \quad (7)$$

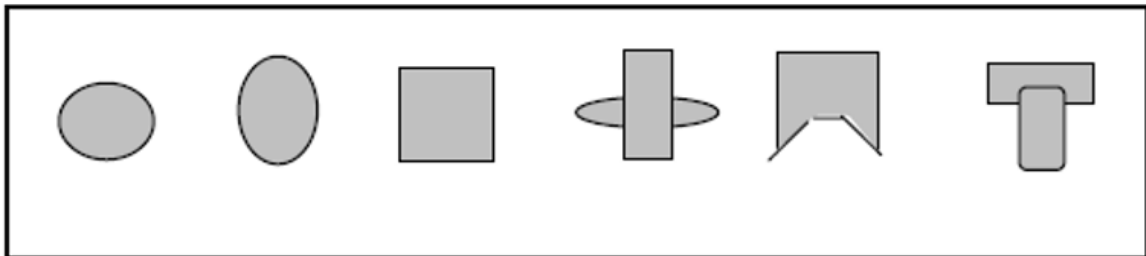
gdje je:

$F_U$  – sila uzgona[N],

$F_T$  – sila trenja[N],

$G$  – težina[Nm<sup>2</sup>].

Ronila se izrađuju od materijala kao što je staklo, metal i plastika te su u različitim oblicima kao na slici 7. Izborom materijala mijenja se gustoća ronila, a mijenjanje oblika utječe na faktor trenja tako da se podešavanjem ova dva parametara podešava mjerni opseg od vrlo malih protoka do velikih protoka.



**Slika 7. Različiti oblici ronila [12]**

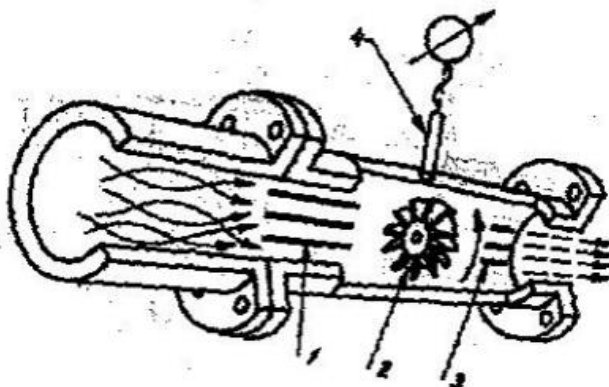
### 5.1.2. Turbinski mjerač protoka

Turbinski mjerač protoka se sastoji se od male turbine čija je brzina okretanja turbine proporcionalna s brzinom protoka fluida. Krila turbine izrađena su od feromagnetnog metala i prolaskom kraj magnetskog detektora induciraju magnetski tok. Magnetski detektor djeluje kao pretvornik promjenljivog magnetskog toka. Magnetski tok se dalje pomoću Schmitovog prekidača i pretvornika frekvencije pretvara u izlazni napon. Izlazni napon je u skladu s brzinom protoka fluida. Proporcionalan omjer između brzine strujanja fluida i kutne brzine rotora osnova je mjerenja protoka pomoću turbinskih

mjerača. Pri tome u idealnom slučaju mjerni rotor ne bi smio trošiti kinetičku energiju fluida.

Točnost mjerne turbine iznosi oko  $\pm 0.5\%$ . Pri dosta malom protoku javljaju se problemi s trenjem na rotoru, pa je određen najmanji protok koji se može učinkovito mjeriti. Mjerne turbine su preskupe, te su podložni oštećenjima više nego ostali protokomjeri. Zbog složenosti hidrodinamičkih učinaka mjerni uređaj treba posebno umjeriti za svaku tekućinu pri određenoj temperaturi i tlaku. Nedostatak mjerne metode je i pad tlaka koji nastaje na turbini, te nemogućnost mjerenja protoka višefaznih tekućina (suspenzija krutine ili plina).

Na slici 8 prikazan je poprečni presjek tipičnog suvremenog turbinskog mjerača protoka. Fluid ulazi u turbinski mjerac protoka kroz prohodni nosač (1) ležaja mjernog rotora (2). Taj nosač je konstruiran tako da usmjerava strujanje fluida prije nego što dođe na mjerni rotor. Na taj način su smanjeni nepoželjni utjecaji turbulentnog kretanja fluida. Lopatice rotora su izrađene od feromagnetskog materijala, a kućište mjerila je od nemagnetskog materijala. Za određivanje brzine vrtnje rotora služi induktivni generator impulsa (4) učvršćen u kućište [6].



**Slika 8. Poprečni presjek suvremenog turbinskog mjerača protoka [6]**

Glavne prednosti turbinskih mjerača protoka:

- velika točnost,
- linearnost i ponovljivost,
- mogućnost digitalnog i analognog izlaza,
- raspon mjernog područja do 150:1,
- trajno zadržavanje baždarenih vrijednosti,

- u nekim izvedbama mogućnost zamjene oštećenog rotora rezervnim baždarenim rotorom,
- relativna neosjetljivost na nečistoću fluida,
- male dimenzije za dati kapacitet i
- lako pogonsko održavanje te malen pad tlaka.

### **5.1.3. Potisni mjerac protoka**

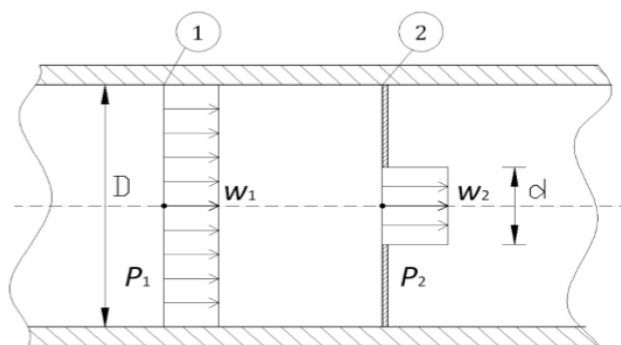
Potisni pretvornici protoka rade isto kao pumpe na principu pozitivnog istisnog volumena. U njihovom radu one zahvaćaju sa ulaznog dijela određeni volumen kapljevine i ispuštaju ga na izlaznom dijelu, potiskujući ga na gibanje. Pritom se broji ukupna količina takvih radnih ciklusa i dobije se povratni mjerni signal. Takav se pretvornik naziva i mjerna ili volumetrijska pumpa.

Stapni potisni pretvornik protoka pomicanjem stapa u jednom smjeru uvlači tekućinu iz ulaznog cjevovoda u stapni valjak, a zatim pri promjeni smjera gibanja stapa ju potiskuje u izlazni cjevovod. Pritom se uvijek prenosi volumen određen promjerom stapnog valjka i hodom stapa (hod stapa se može mijenjati). Ukupni prenijeti volumen određuje se brojanjem stapnih ciklusa [15].

## **5.2. TLAČNI PROTOKOMJERI**

Kada se u cijevi kroz koju protječe neka tekućina na određenom mjestu nalazi suženje, različiti tlak se javlja u dijelu suženja cijevi, a taj tlak ovisi o volumnom protoku tekućine. U praksi se prigušivanje javlja kod svih uređaja za regulaciju protoka (ventili, zasuni i sl.), ali i kod svake promjene presjeka strujanja u cijevima i kanalima. Na slici 9 prikazano je strujanje fluida kroz cijev s prigušnicom.





**Slika 9. Strujanje fluida kroz cijev s prigušnicom [8]**

Ako promatramo strujanje idealnog nestlačivog fluida u cijevi s prigušnicom, brzina strujanja je konstantna po presjeku, a faktor ekspanzije jednak je 1.

$$0.5 \cdot \rho \cdot v^2 + \rho \cdot g \cdot h + p = \text{const.} \quad (8)$$

gdje je:

$p$  – tlak fluida [bar]

$\rho$  – gustoća fluida [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$v$  – brzina fluida [m/s]

$h$  – visina težišta poprečnog presjeka fluida u odnosu na neku vodoravnu ravninu [m]

Zbog suženja dolazi do povećanja brzine tekućine i pada tlaka. Strujnice tekućine su putanje djelića tekućine koja protječe kroz cijev i njihovo najveće skupljanje je na mjestu iza najužeg geometrijskog otvora. U ovakvom slučaju je potrebno biti u mogućnosti izračunati volumni protok iz razlike tlakova. Izračun se radi uzimajući u obzir energiju fluida u protoku.

Prema Bernoullijevoj jednadžbi, energija u jedinici mase fluida u protoku sadržana je u tri dijela, a to su:

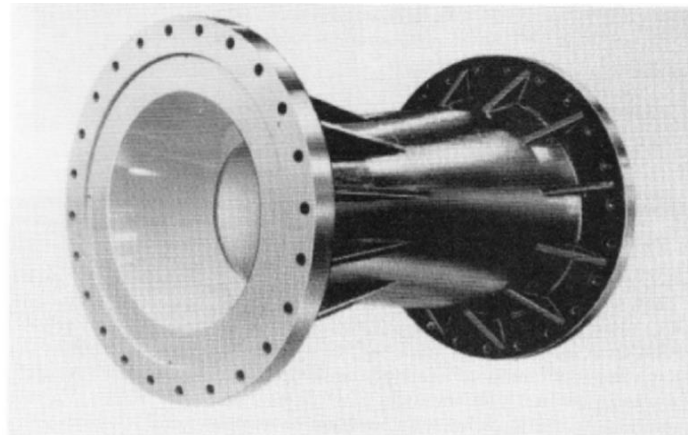
- kinetička energija zbog gibanja fluida ( $V^2/2$ ),
- potencijalna energija ( $g \cdot h$ ),
- energija uslijed tlaka fluida (~~energija protoka~~,  $p/\rho$ ), gdje je  $p$  – tlak fluida, a  $\rho$  – gustoća fluida na tlaku i temperaturi promatranog fluida.

Najpoznatiji predstavnici mjernih uređaja koji mjere razliku tlakova su prigušnice, Dallove i Venturijeve cijevi, te Pitotova cijev.

### 5.2.1. Dallove i Venturijeve cijevi

Kod ovih mjernih uređaja pad tlaka iznosi od 5 do 10 %, pa se one koriste u slučajevima kada nije prihvatljiv veliki pad tlaka kao kod korištenja mjernih prigušnica, Ovdje je smanjena i razlika tlakova. Dallova cijev je kraća vrsta Venturijeve cijevi.

Venturijeva cijev, slika 10, sastoji se od ulaznog cilindra povezanog sa konvergentnim konusnim dijelom, cilindričnog grla i divergentnog konusnog dijela te dva piezometarska priključka. Unutrašnja je površina uređaja rotacijska površina i koncentrična je sa osi Venturijeve cijevi. Konvergentni dio i cilindrično grlo moraju biti koaksijalni te se to provjerava vizualno. Jedan piezometarski priključak se nalazi prije suženja, a drugi na samom suženju te se pomoću njih mjeri razlika tlakova [8].



**Slika 10. Venturijeva cijev [8]**

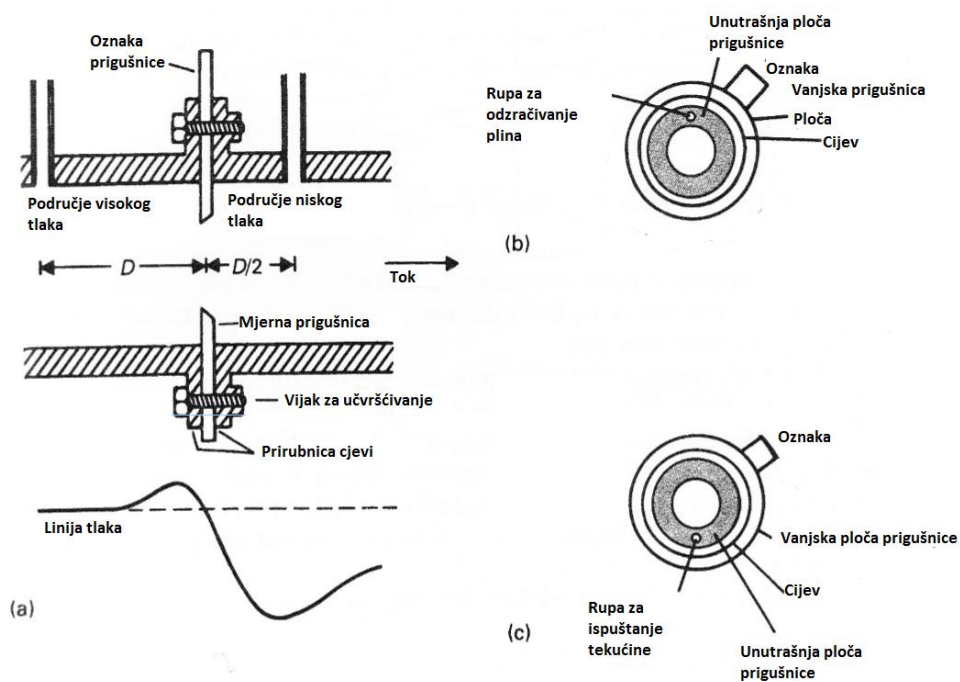
Izvedba suženja Dallove cijevi najčešće se ugrađuje u postojeće cijevi, ali može biti i posebna izvedba cijevi sa suženjem. Ograničenja za širu upotrebu Dallovih i Venturijevih cijevi su visoka cijena, skupa izrada i velika dužina.

### 5.2.2. Mjerna prigušnica i hidrometar

Mjerna prigušnica (engl. *Orifice plate*) je tanka ploča sa otvorom, kružnog oblika i koncentrična s osi cjevovoda. Standardne mjerne prigušnice su tanke ploče sa oštrom ivicom. Debljina ploče je mala u odnosu na poprečni presjek. Površine moraju biti paralelne i ravne. Zbog pojave turbulencija ispred i iza otvora nastaju povećani gubici

energije pa je za mjerila sa mjernim prigušnicama karakterističan najveći diferencijalni tlak  $\Delta p$ , što rezultira visokom osjetljivošću. Sužavanje presjeka izaziva razlike u tlaku prije i iza prigušnice, tj. izaziva pad tlaka iza prigušnice a pad tlaka može iznositi i do 50 %.

Na prigušnicama osim glavnog manjeg promjera postoji i još manji pomoćni otvor koji služi za prolaz zaostalog zraka ili plinova, odnosno ukapljene tekućine. Prigušnice se moraju pažljivo izrađivati da se izbjegnu dodatni nepotrebni gubici u cjevovodima. Ovo je danas najčešći način mjerenja protoka fluida.



**Slika 11. Mjerenje protoka s prigušnicama [12]**

Slika 11 prikazuje princip mjerenja prigušnicom, od kojih je prikazana a) izvedba, b) protok tekućine i c) protok plinova.

Prednosti ovog načina mjerenja su:

- jednostavnost montaže,
- jednostavna primjena,
- relativno niska cijena i
- fleksibilnost.

Glavni je nedostatak visoki nepovratni gubitak energije zbog turbulencija oko prigušnice što u slučaju većih protoka predstavlja ekonomske gubitke.

Hidrometar ili vodomjer, slika 12, je sprava za mjerenje brzine protjecanja tekućina (najčešće vode) i za određivanje količine protekle tekućine kroz neku cijev. Sastoji se od šire cijevi u koju je umetnuta uža, konusna cijev. Razlika tlaka u nekoj točki šire cijevi izvan konusa i na najužem mjestu konusa ovisi o brzini protjecanja fluida kroz cijev, pa se na osnovi toga hidrometra može kalibrirati za izravno očitavanje brzine, odnosno protoka u cijevi.

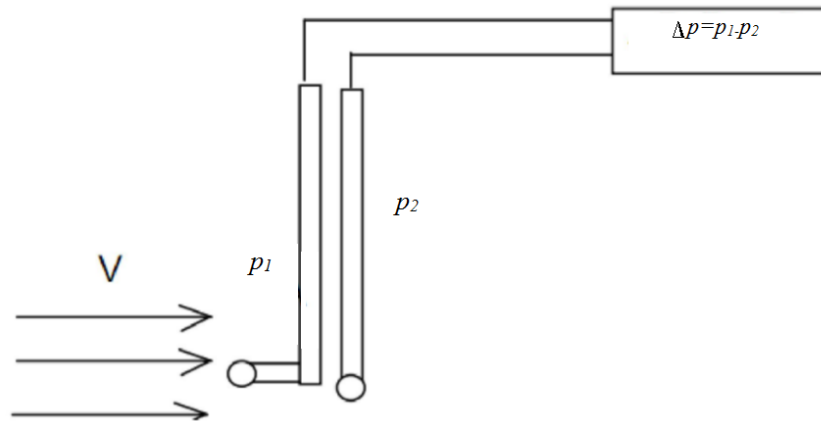


**Slika 12. Hidrometar za kućanstvo [4]**

### **5.2.3. Pitotova cijev**

Za razliku od prethodno spomenutih mjernih uređaja protoka koji mjere volumetrijski ili maseni protok, Pitotova cijev mjeri brzinu protoka u određenoj točki. Na osnovu zakona o očuvanja energije za idealne tekućine može se izvesti jednostavan način određivanja brzine tekućine, mjerenjem razlike statičkog i dinamičkog člana tlaka, odnosno odgovarajućih članova u Bernoullijevoj jednadžbi.

Slika 13 pokazuje shematski prikaz principa mjerenja ovom metodom. Pitotova cijev je mjerni uređaj koji se sastoji od dvije kapilare spojne na diferencijalni manometar. Jedna kapilara ima otvor okomit na strujnice tekućine i u njoj djeluje tlak jednak zbroju statičkog i dinamičkog tlaka, a druga kapilara ima otvor paralelan sa strujnicama i u njoj vlada statički tlak. Mjerni signal je razlika dvaju tlakova [4].



**Slika 13. Mjerenje Pitotovom cijevi [6]**

Mjeri se statički tlak fluida  $p_2$  i tlak fluida  $p_1$ . Fluid ulaskom u cijev koja vodi do manometra  $p_1$  gubi na brzini tj. stagnira uz porast tlaka  $p$ . Energija je po jedinici mase je  $p_1/\rho$  jer nema kinetičke energije.

Zbroj statičke energije i kinetičke energije fluida daje dinamičku energiju odnosno, dalje daje dinamički tlak iz kojeg se izračunava brzina kretanja fluida kroz cijev. Pogreška mjerenja Pitotove cijevi je oko 2 % za brzine fluida do  $150 \text{ ms}^{-1}$ .

### **5.3. ELEKTRONIČKI PROTOKOMJERI**

Električni ili elektronički protokomjeri su dosta zastupljeni u mjerenju protoka te su najprodavaniji mjerači protoka zbog njihovih mnogobrojnih prednosti.

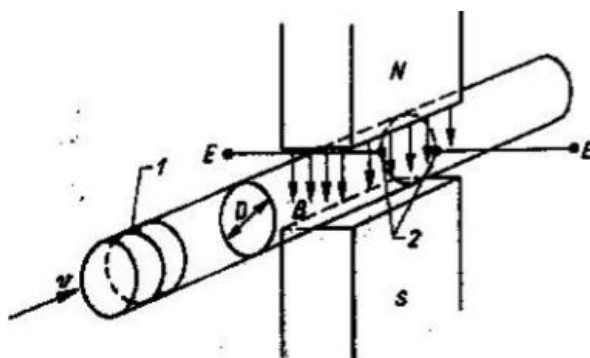
To mogu biti vrtložni protokomjer, elektromagnetski protokomjer, ultrazvučni protokomjer, Dopplerov protokomjer, laserski Dopplerov protokomjer i slični. Najčešće se koriste za vodovodna mjerenja i u prehrambenoj industriji zbog lakog higijenskog održavanja.

#### **5.3.1. Elektromagnetski protokomjer**

Magnetski mjerači protoka predstavljaju napredak u tehnici mjerenja protoka, pogotovo za različite viskozne tekućine i paste, celulozne mase, jako agresivne tekućine, vode koja nosi pijesak ili druge krute komade i čestice itd. što se ranije obavljalo s velikim teškoćama i nepouzdanošću.

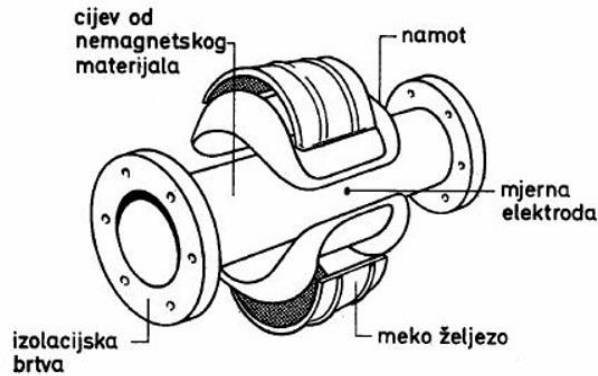
Kod elektromagnetskog protokomjera sam fluid djeluje kao vodič napona, a na stjenkama cijevi su postavljene dvije elektrode (izolirane od same cijevi). Primjenjiv je samo na vodljive tekućine. Djeluje na principu Faradayeva zakona elektromagnetske indukcije, prema kojemu je elektromotorna sila inducirana u vodiču što se giba kroz magnetsko polje razmjerna brzini promjene magnetskog toka.

Princip rada ovog mjerača prikazan je na slici 14. Cjevovod kroz koji protječe mjerna tekućina presijecaju poprečno linije magnetskog polja. Zbog boljeg razumijevanja potrebno je zamisliti da je tekućina podijeljena na niz tankih diskova (1), čija je ravnina okomita na os cjevovoda. Na taj način protok tekućine kroz cjevovod se može promatrati kao poprečno kretanje niza elektrovodljivih diskova, koji pri svom kretanju sijeku silnice magnetskog polja, prema zakonu indukcije, u vodiču koji se kreće kroz magnetsko polje inducirat će se električna struja.



**Slika 14. Shema rada elektromagnetskog mjerača[12]**

Primjena elektromagnetskog pretvornika, prikazanog na slici 15, prikladna je za kapljevine koje imaju minimalnu električnu vodljivost (prirodna voda, vodene otopine), a ne može se primijeniti za deioniziranu vodu, ugljikovodike (nafta, benzin). Mjerni signal neovisan je od ostalih svojstava tekućine kao što su gustoća, viskoznost, temperatura, tlak i na njega ne utječe električna vodljivost kapljevine. On također posjeduje linearnu karakteristiku u cijelom mjernom opsegu.



Slika 15. Elektromagnetski pretvornik protoka [8]

### 5.3.2. Vortex protokomjer

Iza nepokretnog objekta u struji fluida stvaraju se vrtlozi čija je frekvencija ( $f$ ) proporcionalna brzini strujanja pa izraz glasi:

$$f = \frac{v}{d} St \quad (9)$$

gdje je:

$f$  – frekvencija [Hz]

$v$  – brzina strujanja fluida [m/s],

$d$  – širina prepreke [m],

$St$  – Strouhalov broj.

Veza između frekvencije vrtloga i brzine fluida određena je Strouhalovim brojem ( $St$ ) te je on konstantan za određeni oblik tijela u struji fluida. Nailaskom na prepreku, brzina fluida raste, a tlak pada. Na taj način se na prednjoj strani prepreke formira niži, a na zadnjoj strani viši tlak. U područje vrtloženja se postavlja mjerni pretvornik koji može pratiti frekvenciju vrtloženja. Oscilacije su linearne, direktno proporcionalne protoku i neovisne o gustoći, tlaku, temperaturi i viskoznosti tekućine.

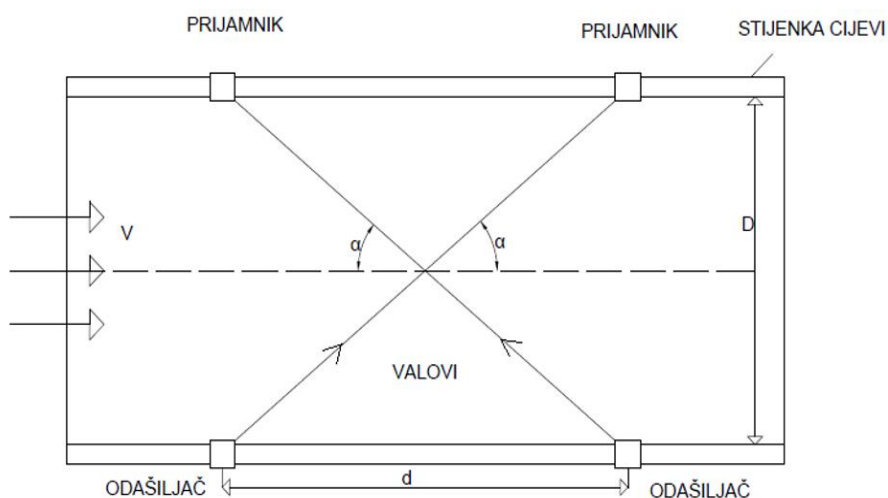
Najčešće se mjeri frekvencija promjene tlaka uslijed vrtloženja, a mogu se koristiti termistori, tenzometri, ultrazvučna metoda, induktivna metoda, ali kao najbolji su se pokazali piezoelektrični senzori koji se ugrađuju ili u uronjeno tijelo ili iza njega. Prednosti mjerila protoka vrtloženjem su linearna karakteristika, velika dinamika (1:100), točnost bolja od 1%. Nedostatak je što se ne koriste se za vrlo viskozne tekućine [6].

Ovi protokomjeri nisu prikladni za mjerenje malih protoka, ali su vrlo postojani na velike promjene tlaka i temperature. Gubitak tlaka koji se javlja kod njih je zanemariv.

### 5.3.3. Ultrazvučni protokomjer

Ultrazvuk, po kojem je ova metoda nazvana, zvučni je val koji je frekvencijom iznad gornje granice osjetljivosti ljudskog uha. Dakle tu su, prema slici 16, dva para odašiljača i prijamnika. Promjer cijevi  $D$ , međusobni razmak između odašiljača i prijamnika  $d$  i brzina emitiranog mehaničkog ultrazvučnog vala  $c$  su poznati pa je jedina nepoznanica brzina fluida  $v$ .

Sa slike se može primijetiti kako dolazi do promjene frekvencija valova odnosno Dopplerovog efekta. Brzina valova u suprotnom smjeru gibanja je manja od brzine onoga u smjeru gibanja fluida. Mjeri se vrijeme koliko je potrebno za valove da prođu kroz cijev i njihova razlika daje brzinu protjecanja. Kašnjenje je u obliku faznog pomaka ako se radi o sinusoidalnim valovima.



**Slika 16. Prikaz rada ultrazvučnog mjernog pretvarača protoka [17]**

Završno s mjerenjem, podaci se ubacuju u računalo koji preračunava podatke i daje konačni prikaz brzine ili u ponekim slučajevima podatke prosljeđuje u nadređeno računalo. Zbog kosog kretanja valova u odnosu na gibanje fluida u obzir se mora uzeti samo vodoravna komponenta vala. Prednosti ultrazvučne metode su visoka točnost, brzi odziv, nema ometanja protjecanja, linearnost, možemo mjeriti protok za različite vrste fluida.



Upotrebom ultrazvučnih pretvarača može se mjeriti protjecanje u širokom spektru područja kao što su naftovodi, ali i u općoj medicini za protok krvi u žilama [17].

Ovdje se mogu spomenuti još dvije vrste protokomjera. To su:

- Dopplerov protokomjer – koristi se kada u tekućini ima čestica (ili mjehurića) od kojih se ultrazvuk može odbijati (reflektirati).
- Laserski Dopplerov protokomjer – umjesto ultrazvučnog vala koristi se monokromatski sinkroni val svjetlosti odnosno laser. Frekvencijski pomak mjeri se analizom interferometrijske slike koja nastaje interferiranjem upadne i reflektirane zrake.

#### **5.4. MASENI PROTOKOMJERI**

Mjerenja protoka, koja se baziraju na mjerenju brzine, volumnog protoka ili prijenosa topline nisu najpouzdanija ako se tijekom mjerenja mijenja kemijski sastav, temperatura ili tlak tekućine. Nadalje, viskoznost mjenog fluida, korozija ili oštećenja na cijevima mogu utjecati na preciznost mjerenja. Postoji mnogo vrsta i konstrukcija ovakvih uređaja, a najčešće upotrebljavan je Coriolisov protokomjer [4].

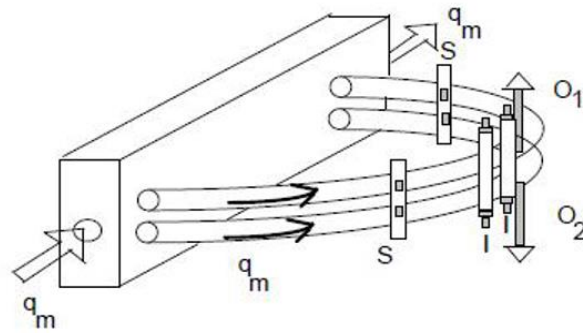
##### **5.4.1. Coriolisov protokomjer**

Coriolisova sila je inercijska sila koja djeluje na sve čestice u rotirajućim sustavima kad se gibaju pod nekim kutom u odnosu na rotacijsku os; okomita je na brzinu gibanja i na rotacijsku os.

Metoda mjerenja protoka ovom metodom idealna je za mjerenje protoka mase kapljevina, ali postoje i izvedbe za mjerenja protoka mase plinova. Ovakvi su mjerači veoma jednostavni jer nemaju pokretnih dijelova, ne uzrokuju pad tlaka mjenog medija, odstupanje od linearnosti i netočnost na radnom opsegu mogu biti manji od 0,25 %. Ugradnja ove metode je jednostavna, a pored protoka mase mjere i gustoću medija.

Coriolisov protokomjer se sastoji od dvije paralelne cijevi savite u obliku slova U kroz koje protječe tekućina u istom smjeru. Način rada zasniva se na uvijanju cijevi koje titraju, a kroz njih protječe tekućina. Gornja i donja cijev titraju suprotno, tako da kada se gornja cijev kreće prema gore, donja cijev ima suprotan smjer kretanja.

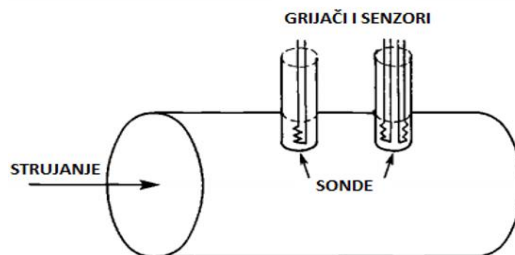
Titranje je pobuđeno elektromagnetskim djelovanjem i dolazi do rezonancije kada cijevi titraju vlastitom ili prirodnom frekvencijom. Frekvencija titraja je od 100 do 300 Hz s vrlo malom amplitudom, manjom od 1 mm. Zbog Coriolisove sile tekućina djeluje silom na stjenke cijevi i dolazi do njihovog savijanja (torzije) i pomaka u titranju. Slika 17 prikazuje ovaj postupak gdje su  $O_1$  i  $O_2$  smjerovi oscilacija, a  $S$  induktivna osjetila pomaka.



**Slika 17. Shematski prikaz Coriolisovog mjerila protoka [14]**

#### 5.4.2. Termodinamički protokomjer

Izvedba protokomjera u obliku sonde i izvedba protokomjera koje se serijski spaja na dio cijevi su dvije vrste izvedbe koje postoje u ovoj vrsti protokomjera. Termodinamički protokomjer, slika 18, koristi grijani element koji se nalazi u struji fluida.



**Slika 18. Termodinamički protokomjer [12]**

Svoj rad temelji na principu konvektivnog prijenosa topline i ovisi o razlici temperature između sonde i fluida te na karakteristikama samog fluida. Za potrebe mjerenja temperature fluida koriste se anemometri s konstantnom snagom ili anemometri konstantne temperature.

Temperatura grijane sonde varira s brzinom fluida te se koristi kao osjetni parametar. Odziv je spor zbog temperaturne inercije sonde i podešavanje je sporo jer kod nižih protoka postaje izraženija prirodna konvekcija [4].

Jednadžba koja opisuje ovo mjerenje glasi:

$$q_h = k' (1 + K \cdot q_m n) \cdot \Delta T \quad (10)$$

gdje je:

$q_h$  – potrebna toplina [J],

$k'$  – konstanta koja omogućuje prijenos topline i razliku temperatura kad nema protoka,

$K$  – konstanta koja povezuje područje cijevi gdje je umetnuta sonda,

$q_m$  – maseni protok [kg/s],

$\Delta T$  – temperaturna razlika grijane i negrijane sonde [°C],

$n$  – faktor ovisan o brzini strujanja [1/2 za male brzine, 1/3 za velike brzine].

## 6. PRIMJENA MJERENJA PROTOKA NA BRODU

Fluidi koji se koriste u propulzijskom sustavu broda su:

- voda,
- more,
- gorivo (dizel i teško),
- ulja za hlađenje i podmazivanje,
- zrak,
- ispušni plinovi i
- vodena para.

Za pravilan rad propulzijskog sustava potrebno je točno definirati i dozirati količinu određenog medija. U skladu s time potrebno je napraviti mjerenja protoka, a što se najčešće radi protokomjerima i različitim prigušenim sredstvima. Turbinski davač protoka se koristi u vrlo širokom mjernom području protoka [9].

### 6.1. MJERENJE POTROŠNJE GORIVA

Spremnici za gorivo su izuzetno jednostavne konstrukcije i oblika, a informacija o razini goriva bila je vidljiva u kontrolnoj kabini preko stakalca iza kojeg se nalazio indikator razine. Veće performanse brodova donijele su i veću složenost unutar sustava za gorivo. Za transport goriva unutar spremnika i do motora bilo je potrebno smjestiti pumpe za prijenos i premještanje goriva i buster pumpe (engl. *booster pump*). Složenije konfiguracije spremnika za sobom su donijele potrebu za multi-ventilskim sustavima kako bi posada mogla prebacivati gorivo iz spremnika u skladu s potrebama za vrijeme vožnje.

Sustavi za mjerenje goriva postajali su sve složeniji kako je rasla potreba za točnosti sustava. Većina sustava temeljila se na kapacitivnom mjerenju razine goriva sa senzorima smještenim direktno u spremnicima.

Danas su u upotrebi protokomjeri s malim odstupanjem od stvarne potrošnje. Jedan od takvih je protokomjer tvrtke *Insatech* (slika 19) koji funkcioniра po Coriolisovom protokomjeru. Mjerenje se vrši odmah u masi, a ne u volumenu što daje visoku točnost. Protokomjer se postavlja prije i poslije motora, a izmjereni rezultat protoka će biti poslan preko Modbus signala do ekrana [9].



**Slika 19. Protokomjer i sustav za očitavanje [9]**

## 6.2. MJERENJE KOLIČINE ZRAKA

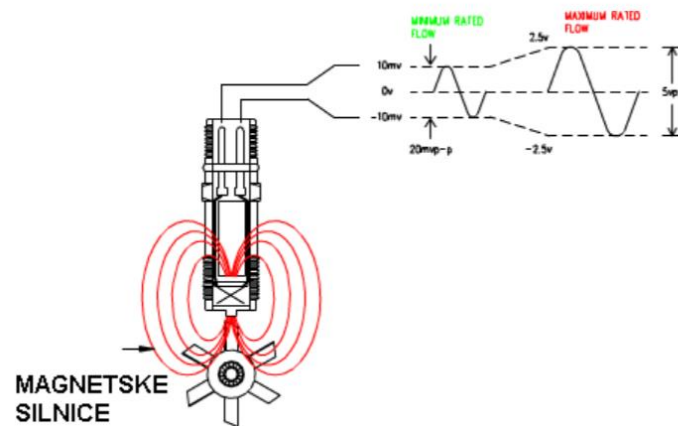
Ovdje se ponajviše koriste plinski satovi s okrenutim klipovima za veće i srednje protoke. Specijalno profilirani klipovi okreću se u kućištu. Sinkronizacija njihovog okretanja postiže se vanjskim zupčanicima. Broj okretaja klipova razmjernan je protoku plina ili pare. Mjerenjem vremena može se odrediti satni protok. Kod navedenih plinskih satova mjeri se tlak i temperatura plina da bi se rezultati mogli svesti na normalne uvjete okoline. Obično se za ova mjerenja koristi Prandtlova cijev pomoću koje se može odrediti statički, ukupni i dinamički tlak. Postavljanjem navedenog instrumenta na raznim mjestima u cijevi može se utvrditi raspored brzina i odrediti srednja brzina strujanja [9].

## 6.3. MJERENJE PROTOKA U CJEVODIMA

Uređaji za mjerenje protoka nisu toliko česti u brodskim cjevovodima. Tipična je primjena u cjevovodu goriva glavnog porivnog stroja, kao zasebna lokalna jedinica ili kao indikator kompjuterskog sustava upravljanja. U drugom se slučaju podatak dobiven takvim mjeracem može koristiti za optimizaciju plovidbe, tj. usmjeravanje broda u odnosu na

lokalne morske struje, vjetrove i valove te zakrivljenost Zemlje, kako bi se uz najmanji utrošak goriva uplovilo u određenu luku točno na vrijeme.

Najčešće se takav indikator izvodi kao turbina smještena unutar cjevovoda. Pokreće ju strujanje fluida, a ona može preko zupčastog prijenosa pokretati brojčanik ili se protok može odrediti na osnovu broja električnih impulsa. Ovakav instrument prikazan je na slici 20.



**Slika 20. Mjerač protoka [18]**

Volumenski protok je proporcionalan broju okretaja turbine, odnosno broju impulsa. Uređaj je tvornički baždaren kako bi broj impulsa točno određivao protok fluida. Negativna je strana takve izvedbe mogućnost zaprljanja i blokiranja, a posebno u slučaju teške nafte. Zato u cjevovodu goriva uvijek postoji i mimovod (engl. *by-pass*) mjerača protoka [18].

## 7. ZAKLJUČAK

Upotreba mjerenja protoka je od velike koristi i pomaže svakodnevno mnogim ljudima u školovanju, učenju, a i daje inspiraciju svakom čovjeku da otkrije nešto novo. U raznim tehnološkim pogonima, potrebno je mjeriti protok pa je mjerenje postalo bitan dio u procesu stvaranja proizvoda.

U radu su prikazane osnove mjerenja neelektričnih veličina pretvorbom u električne veličine, analogno-digitalna pretvorba i mjerni sustav. U koracima su opisane najvažnije mjerne metode sa svojim primjerima uređaja i postupaka mjerenja. Objasnjeno je koji su postupci prikladni za svoja postrojenja kao i slučajevi u kojima se najlakše dolazi do bržeg i točnijeg rezultata. Prije svakog mjerenja potrebno je proučiti sve dostupne metode mjerenja protoka i odabrati najpogodniju metodu za dani slučaj. Svaka metoda ima svoje prednosti i nedostatke pa je potrebno dobro razmisliti koju metodu treba primijeniti u određenom slučaju.

Također da bi se mogli dobiti pouzdani podaci na mjerilima, potrebno je njihovo umjeravanje prije svakog novog mjerenja. Mjerila su sve više zastupljena jer se želi znati koliko koji sustav troši energije te da li postoji mogućnost smanjenja iste s ciljem smanjenja zagađenja okoliša i veće energetske učinkovitosti sustava.

Nova tehnološka rješenja vezana uz upravljanje i nadzor brodskih motora pospješuju rad samih motora te utječu na brže i jednostavnije otkrivanje kvarova [9].

## 8. LITERATURA

- [1] Virag, Z.: *Materijali za pripremanje ispita iz kolegija Mehanika fluida 2*, Fakultet Strojarsstva i Brodogradnje, Zagreb
- [2] Valter, Z.: *Procesna mjerenja*, Elektrotehnički fakultet u Osijeku, 1994.
- [3] *Računala i procesi*, Veleučilište u Rijeci, nastavni materijali, dostupno na: [https://www.veleri.hr/files/datotekep/nastavni\\_materijali/k\\_informatika\\_s1/Predavanje\\_7\\_a.pdf](https://www.veleri.hr/files/datotekep/nastavni_materijali/k_informatika_s1/Predavanje_7_a.pdf) (pristupljeno 26.07.2019.).
- [4] Wikipedia, *Mjerenje protoka*, dostupno na: [https://hr.wikipedia.org/wiki/Mjerenje\\_protoka#Mjerna\\_prigušnica](https://hr.wikipedia.org/wiki/Mjerenje_protoka#Mjerna_prigušnica), (pristupljeno 21.07.2019.).
- [5] Božičević, J.: *Temelji automatike 2*, Mjerni pretvornici i mjerenje, Školska knjiga, Zagreb, 2000.
- [6] Kvesić, T.: *Mjerenje neelektričnih veličina*, završni rad, Sveučilište J.J. Strossmazera u Osijeku, 2018.
- [7] Žanetić, R.: *Mjerni pretvornici u industrijskim pogonima*, Split, 2005.
- [8] Rihtarić, D.: *Mjerila za mjerenje protoka i razina kapljevina*, diplomski rad, FSB, Zagreb, 2011.
- [9] *Senzori i mjerni pretvarači*, Elektrotehnički fakultet Podgorica, Podgorica 2009.
- [10] Vukelić, J.: *Nove tehnologije za nadzor i analizu brodskih motora*, završni rad, PFST, Split, 2018.
- [11] Šišić, E.: *Senzori*, seminarski rad, dostupno na: [www.am.unze.ba/mt/2013/Sisc%20Eldina%20senzori.docx](http://www.am.unze.ba/mt/2013/Sisc%20Eldina%20senzori.docx), (pristupljeno 22.07.2019.).
- [12] Kardum, S.: *Mjerenje masenog protoka fluida*, Završni rad, Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2009
- [13] Bego, V.: *Mjerenja u elektrotehnici*, 9. izdanje, Graphis, Zagreb, 2003.
- [14] Milenković, B.: *Priručnik za mjerenje protoka fluida*, SMEITS, Beograd, 2000.
- [15] Posilović, M.: *Mjerenje protoka svježeg i otpadnog zraka u ispitnim kabinama za motore s unutarnjim izgaranje*, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb, 2012.
- [16] Sorić, J.: *Uvod u numeričke metode u strojarstvu*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2009.
- [17] Bajac, A.: *Ispitivanje ultrazvučnog mjerila protoka*, Završni rad, Zagreb, 2016
- [18] Kralj P.: *Brodski cjevovodi*, Sveučilište u Rijeci, nastavni materijali



## POPIS SLIKA

Slika 1. Veza proizvodnje, kontrole, automatizacije, proizvoda i metrologije [3].....	6
Slika 2. Otporni pretvornika s kliznikom [5].....	9
Slika 3. Laserski vibrometer [11] .....	11
Slika 4. Piezoelektrični pretvarač [2] .....	12
Slika 5. Elektrodinamički pretvarač [7].....	13
Slika 6. Shematski prikaz mjerenja rotametrom [12] .....	15
Slika 7. Različiti oblici ronila [12] .....	16
Slika 8. Poprečni presjek suvremenog turbinskog mjerača protoka [6] .....	17
Slika 9. Strujanje fluida kroz cijev s prigušnicom [8] .....	19
Slika 10. Venturijeva cijev [8].....	20
Slika 11. Mjerenje protoka s prigušnicama [12] .....	21
Slika 12. Hidrometar za kućanstvo [4] .....	22
Slika 13. Mjerenje Pitotovom cijevi [6] .....	23
Slika 14. Shema rada elektromagnetskog mjerača[12] .....	24
Slika 15. Elektromagnetski pretvornik protoka [8] .....	25
Slika 16. Prikaz rada ultrazvučnog mjernog pretvarača protoka [17] .....	26
Slika 17. Shematski prikaz Coriolisovog mjerila protoka [14] .....	28
Slika 18. Termodinamički protokomjer [12].....	28
Slika 19. Protokomjer i sustav za očitavanje [9] .....	31
Slika 20. Mjerač protoka [18].....	32

## POPIS KRATICA

A/D (engl. <i>Analog to Digital Conversion</i> )	analogno-digitalna pretvorba
D/A (engl. <i>Digital to Analog Conversion</i> )	digitalno-analogno pretvorba
MUR	Mjerni, Upravljački i Regulacijski uređaji
SI (fra. <i>Système International d'Unités</i> )	Međunarodni sustav jedinica