

## PRORAČUN MJERNE NESIGURNOSTI U PROCESU KALIBRACIJE CORIOLISOVIH MJERILA PROTOKA

### CALCULATION OF MEASUREMENT UNCERTAINTY IN CALIBRATION PROCESS OF CORIOLIS FLOW-METER

Emir Baralić, Mr.Sci.  
Energoinvest dd Sarajevo  
71000 Sarajevo

Hazim Bašić, Prof. dr.  
Mašinski fakultet u Sarajevu  
71000 Sarajevo

#### REZIME

*Na polju mjerenja protoka u posljednje vrijeme se pojavilo mjerilo masenog protoka na bazi efekta Coriolisove sile. U svakodnevnom mjerenju protoka jedan od problema, posebno u mjerenju protoka nafte i naftnih proizvoda, je izračunavanje i pretvaranje veličina volumetrijskog u maseni protok. Inače, da bi se iz volumetrijskog mjerenja dobili rezultati izraženi u težinskoj veličini, pored samog uređaja za volumetrijsko mjerenje, potrebno je imati i dodatne uređaje za mjerenje temperature, pritiska, gustoće, viskoziteta i ostalih uticajnih varijabli. Svi ovi parametri u kontinualnom procesu dodatno usložnjavaju preračunavanje koje često vodi nedosljednosti i netačnosti. U okviru rada biće istraživani i prezentirani rezultati kalibracije mjerila kasnije ugrađenih u mjerni sistem rafinerije. Pored toga, biće date osnove proračuna mjerne nesigurnosti kalibracije gdje je broj mjerenja relativno mali kao i osnovne informacije o pojavi Coriolisove sile i osnovnim pojmovima o Coriolisovom mjerilu protoka.*

**Ključne riječi:** Protok, Coriolisovo mjerilo, Mjerna nesigurnost

#### SUMMARY

*In recent time in the field of flow measurement the mass flow meter, on the basis of Coriolis force, appeared on the market. On everyday flow measurement is known problem of calculation between mass and volumetric flow and it is stressed in fiscal measurement especially in the oil industry. To get accurate mass units from volumetric, beside volumetric meter it is necessary to include additional measurement apparatus for measurement of temperature, pressure, density and other variables. All mentioned parameters in continual flow process making calculation harder and in many cases making uncertainty higher. In this paper, results of calibration of mass flow meter will be presented, and those flow meter are installed in refinery. Beside, basic of measurement uncertainty will be presented under condition where is measurement passes is relatively low as well as basic information about appearing of Coriolis force and basic information about Coriolis mass flow meter.*

**Keywords:** Flow, Coriolis mass flow meter, Measurement uncertainty

## 1. UVOD

U svakodnevnom mjerenju protoka jedan od problema-zahjeva, posebno u mjerenju protoka nafte i naftnih proizvoda, je izračunavanje i pretvaranje veličina volumetrijskog u maseni protok. Inače da bi se iz volumetrijskog mjerenja dobili rezultati izraženi u težinskoj veličini, pored samog uređaja za volumetrijsko mjerenje, potrebno je imati i dodatne uređaje za mjerenje temperature, pritiska, gustoće i ostalih uticajnih varijabli. Svi ovi parametri u kontinualnom procesu dodatno usložnjavaju preračunavanje koje često vodi nedosljednosti i netačnosti. Prednost korištenja direktnog mjerenja mase, pogotovo u naftnoj industriji je nemjerljiva. Mjerenjem protoka određuju se energetske i materijalne bilance, na osnovu kojih se određuje produktivnost procesa proizvodnje. Istovremeno, protok je najčešće i osnovna veličina za upravljanje procesom proizvodnje. Generalno, postoje dva tipa mjerila protoka:

- sa oduzimanjem energije, uzima energiju od mjenog medija da bi mogao raditi. Neki od ovih tipova su mjerila na bazi razlike pritisaka, vortex, turbinski.
- sa dodavanjem energije, predaje energiju mediju. To su Coriolisovo mjerilo, magnetno, ultrazvučno, termičko mjerilo [4,5].

Kalibracija (umjeravanje) je određivanje odstupanja na mjernom uređaju, tj. utvrđivanje odnosa između vrijednosti prikazane mjerilom ili mjernim sistemom i odgovarajuće poznate mjerne veličine. Umjeravanje mjernog uređaja obuhvata i ispitivanja koja su propisana od nadležne ustanove, a završava potvrdom o ispravnosti, odnosno certifikatom.

## 2. CORIOLISOVA SILA, UTICAJNI PARAMETRI NA MJERNU NESIGURNOST

Inercijalna sila, kao i centrifugalna sila, je pseudo sila (fiktivna sila), koja se javlja usljed složenog kretanja materijalne tačke i naziva se Coriolisova sila. Ova sila je uzrok iskrivljene putanje projektila, kao i kružne putanje orkana i vazduha u zemljinoj atmosferi.

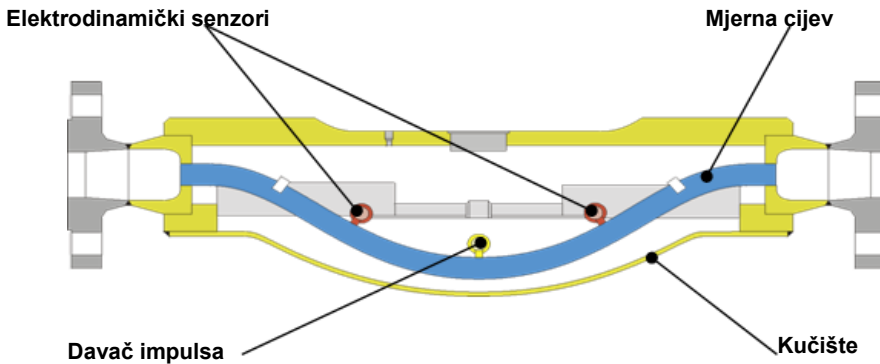
$$\vec{a}_{cor} = 2 \left( \frac{d\xi_M}{dt} \frac{d\vec{i}_1}{dt} + \frac{d\eta_M}{dt} \frac{d\vec{j}_1}{dt} + \frac{d\zeta_M}{dt} \frac{d\vec{k}_1}{dt} \right) = 2[\vec{\omega}_p, \vec{v}_r], \quad (1)$$

Coriolisovo ubrzanje koje je jednako dvostrukom vektorskom proizvodu  $[\vec{\omega}_p, \vec{v}_r]$ , upravno je na ravan u kojoj leže vektori  $\vec{\omega}_p$  i  $\vec{v}_r$ , a ima smjer da gledano iz vrha vektora  $\vec{a}_{cor}$ , obrtanje vektora  $\vec{\omega}_p$ , najkraćim putem ka vektoru  $\vec{v}_r$ , vidi se u smjeru suprotnom od smjera obrtanja kazaljke na satu [6]. Coriolisovo ubrzanje je jednako nuli kada je:

- prenosno kretanje translatorno, odnosno  $\vec{\omega}_p = 0$ ,
- kada su vektori  $\vec{\omega}_p$  i  $\vec{v}_r$  kolinearni,
- relativna brzina jednaka nuli  $\vec{v}_r = 0$ .

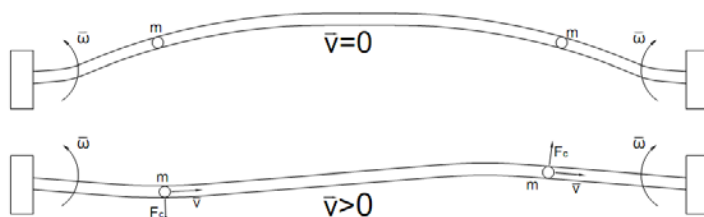
Coriolisovo mjerilo, prikazano na slici 1, se uobičajeno sastoji od senzora protoka koji su ugrađeni u cjevovod i elektronske jedinice koja prima signale od senzora i koje pretvara u elektro izlaze koji predstavljaju maseni protok. Tipično mjerilo se sastoji od [5,7,8,9]:

- dvije paralelne cijevi kroz koje protiče mjereni fluid,
- kućišta koje štiti cijevi i ojačava čitavu konstrukciju,
- elektromagnetskog pobuđivača koji pobuđuje cijevi da vibriraju,
- dva senzora kretanja koji mjere relativnu brzinu između para cijevi na dvije tačke jednako udaljene od centra-simetrične.



Slika 1. Tipična izvedba Coriolisovog mjerila

U toku trajanju protoka, pomjeranje cijevi zbog Coriolisove sile,  $\vec{F}_c = -2m[\vec{v}, \vec{\omega}]$ , slika 2, uzrokuje pobudu i pomjeranje izlaznih senzora A i B koji za razliku od stanja mirovanja nisu u fazi jedan sa drugim. Promjena u masenom protoku će proporcionalno povećavati ili smanjivati ovo pomjeranje u fazama.



Slika 2. Coriolisovo mjerilo bez protoka i sa protokom

Određena masa (tečnost ili gas) koja protiče uz neku brzinu kroz vibrirajuću cijev uzrokuje deformaciju cijevi. Ta deformacija je uzrokovana Coriolisovom silom. Coriolisova sila zavisi od mase mjenjenog fluida. Senzori koji mjere protok na cijevima mjerila podložni su deformacijama koje nastaju zbog protoka. Promjene u osobinama fluida obično utiču na fleksibilnost/elastičnost oscilirajuće mjerne cijevi. Nulti otklon između senzora koji se dobije prilikom kalibracije, može biti izmjenjen promjenom prvobitnih parametara. Ta izmjena tačnosti nultog otklona može uzrokovati grešku mjerenja. Faktori koji uzrokuju grešku mjerenja mijenjaju nulti otklon i to tako što mijenjaju elastičnost / čvrstoću elemenata senzora. Temperatura i pritisak imaju najznačajniji uticaj na mjerenje masenog protoka. Dodatni faktori koji mogu uticati na osobine mjerila mogu biti:

- uticaj stabilnosti nule mjerila,
- zarobljeni gas u mediju,
- vanjske vibracije,
- erozivne osobine medija,
- slojevi boje ili prljavštine unutar mjerne cijevi.

Uticaj temperature na elastične osobine materijala mjerne cijevi je takav da se povećanjem temperature povećava elastičnost mjerne cijevi. Obrnuto, smanjenjem temperature smanjuje se elastičnost, odnosno povećava se čvrstoća. Pod uslovima konstantnog masenog protoka, povećanjem temperature mjerne cijevi, generiše se otklon vremena koji se ne javlja pod normalnom temperaturom između dva senzora.

Utjecaj pritiska na mjernu cijev i senzore očituje se na više različitih načina. Povećanje pritiska uzrokuje povećanje napona (okomito na stjenku cijevi). Ovo povećanje napona uzrokuje očvršćenje mjerne cijevi. Očvršćenje mjerne cijevi zajedno sa sensorima dovodi do greške mjerenja, odnosno do mjerenja vremena  $\Delta t$  između senzora koje nije u skladu sa kalibracijom mjerila, i pored toga što se masa fluida ne mijenja.

Kao dio normalne procedure prvog pokretanja za Coriolisovo mjerilo, osnovno je izmjeriti otklon između elektrodinamičkih senzora kada nema protoka. Ovaj postupak se naziva nulovanje mjerila. Vrijednost dobivena nulovanjem je  $\Delta t_{nula}$ . Specifikacija stabilnosti nule mjerila prezentuje područje vrijednosti „sačuvane nule“ koja se dobiva prilikom nulovanja mjerila u više navrata pod istim procesnim uslovima. Varijacija u vrijednosti  $\Delta t_{nula}$  se dobija kao rezultat ograničenja sposobnosti transmitera da otkrije i precizno izmjeri slabe/male signale sa elektrodinamičkih senzora kada je mjerilo bez protoka. Stabilnost nule ili nesigurnost nule predstavlja maksimalnu prihvaćenu varijaciju sačuvane nule za stabilan proces i dobre uslove montaže. Efekat stabilnosti nule na tačnost mjerenja može se razumjeti iz sljedeće jednačine koja je nominalna jednačina nesigurnosti Coriolisovih mjerila [7].

$$\text{Nominalna nesigurnost} = \pm \left( \text{Osnovna nesigurnost} + \frac{\text{Stabilnost nule}}{\text{Maseni protok}} \right) \quad (2)$$

gdje je:

- *osnovna nesigurnost*                      tačnost senzora, prikazana za svaki senzor posebno,
- *stabilnost nule*                            individualna specifikacija senzora,
- *maseni protok*                              radni protok.

Iz jednačine (2) je vidljivo da se nominalna nesigurnost povećava smanjenjem masenog protoka. Pomak nule je razlika između sačuvane i prave nule. Uopšteno, ova razlika je veoma mala. Veliki, odnosno, neočekivan pomak nule se dešava u slučajevima kada:

- postoji određen protok kroz senzor, a protoka ne bi trebalo biti,
- senzor ili transmiter je promjenjen bez ponovnog nulovanja,
- vibracije/naponi okolnog cjevovoda se odražavaju na senzor.

### 3. ANALIZA KALIBRACIJE MASENOG MJERILA PROTOKA

U Rafineriji nafte Pančevo je dizajniran novi sistem pretakanja TNP-a, i sistem se sastoji od osam mjernih mjesta. Kalibracija svakog uređaja se izvodila u laboratorijskim uslovima i svaki uređaj je ispitivan u pet karakterističnih tačaka protoka. Certifikati izdati od strane akreditovane laboratorije su analizirani i data je mjerna nesigurnost. Kako je osam mjerila kalibrisano na približno istim protocima, karakteristične tačke su grupisane i rezultati su predstavljeni kao da je jedan te isti uređaj ispitivan osam puta u jednoj karakterističnoj tački protoka. Zbog laboratorijskih uslova kalibracije, izvršene se određene aproksimacije, a kao nesigurnost ispitne stanice je uzeta ona iz certifikata. Proizvođač u svojoj tehničkoj dokumentaciji navodi tačnost bolju od  $\pm 0,1\%$  izmjerene vrijednosti. Greška koja se dobije kao rezultat kalibracije mjerila u ovlaštenoj laboratoriji izračunava se na osnovu formule:

$$\text{Relativna greška mjerenja} = \frac{\text{Izmjerena masa} - \text{Ref. masa}}{\text{Ref. masa}} (\%) \quad (3)$$

Pored vrijednosti relativne greške mjerenja potrebno je dobiti i nepouzdanost srednje vrijednosti  $C$  kada je broj mjerenja  $n$  manji od 25. Nepouzdanost  $C$  stoga zavisi od faktora  $t$  i

broja ponovljenih mjerenja, dok je relativna nepouzdanost  $c$  odnos nepouzdanosti  $C$  i srednje vrijednosti [1,2,3,7]:

$$C_{(P=0,95)} = \pm t \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4)$$

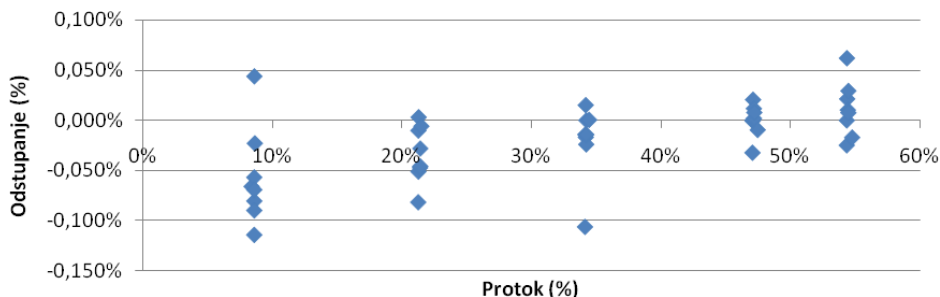
gdje je:

- $x_i$  izmjerena vrijednost
- $\bar{x}$  srednja vrijednost

U kalibracionom certifikatu je navedeno i ovjereno od akreditovane laboratorije da je mjerna nesigurnost ispitnog uređaja 0,035% sa faktorom pokrivanja 2, odnosno sigurnošću od 95%. Ako se u ovom slučaju uvede proširena mjerna nesigurnost, sa maksimalnom mjernom nesigurnošću ispitnog uređaja  $E$  [1] slijedi:

$$x = \bar{x} + u = \bar{x} \pm (|C| + |E|) \quad (5)$$

Relativne greške mjerenja, prema kalibracionim certifikatima, za svih osam mjerila prema karakterističnim protocima su predstavljene na slici 3, [10].

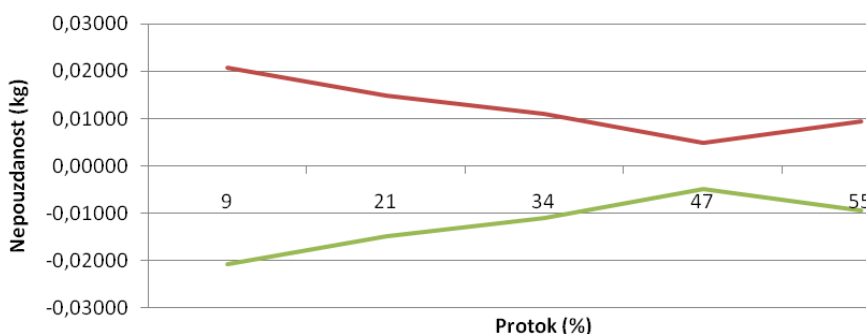


Slika 3. Relativne greške mjerenja za svaki od kontrolisanih protoka za svih 8 mjerila

tako da za različite protoke dobiju nepouzdanosti srednje vrijednosti koje su date u Tabeli 1 sa statističkom sigurnošću od 95% koje su prikazane i na slici 4:

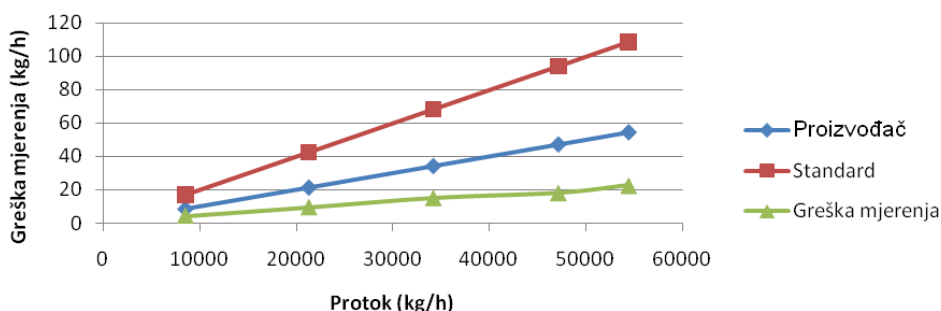
Tabela 1. Nepouzdanost srednje vrijednosti

Protok	9%	21%	34%	47%	55%
Nepouzdanost 95%	0,02070	0,01481	0,01090	0,00484	0,00935



Slika 4. Nepouzdanost srednje vrijednosti

dok je greška mjerenja u odnosu na protok prikazana na slici 5.



Slika 5. Greška mjerenje u odnosu na protok

#### 4. ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazan je primjer izračunavanja mjerne nesigurnosti prilikom kalibracije mjerila protoka. Navedeni su najvažniji uticaji na grešku mjerenja kao što su promjene temperature i pritiska. Opisana je i greška, odnosno nesigurnost koja se može javiti neadekvatnim baždarenjem nule protoka. U naftnoj industriji se unutar mjenenog medija može javiti pomješana gasna i tečna fazi, što može dovesti do netačnog mjerenja. Pored navedenih uticaja, vrlo čest uzrok nesigurnosti mjerenja mogu biti razne vibracije. Zajedno sa ostalim uticajima, prilikom mjerenja se mogu pojaviti netačnosti, i cilj je iste prepoznati i naći rješenje za njihovo smanjenje i uklanjanje. Jedan od važnijih aspekata je i montaža mjerila u mjerni sistem. U posljednjem poglavlju su prikazani rezultati uzeti iz kalibracionih certifikata dobijenih uz mjerilo. Upoređujući rezultate greške mjerenja sa pripadajućim standardima i dozvoljenim odstupanjima vidljivo je da se dobijeni rezultati nalaze unutar zahtjevanih odnosno dozvoljenih limita.

#### 5. LITERATURA

- [1] Seferović E., Bašić H.: "Osnovi metrologije i obrade rezultata mjerenja"; Mašinski fakultet Sarajevo, 2005, ISBN-9958-601-10-9
- [2] BIPM / OIML / IEC / ISO / IFCC: "Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration",
- [3] ISO/IEC: "Uncertainty of Measurement -Part 3 Guide to the Expression of the Uncertainty of Measurement", GUM 98-3, 2008,
- [4] Endress+Hauser: "Flow Handbook"; Endress+Hauser Flowtec AG, CH/Reinach/BL, 2004, ISBN-3-9520220-4-7,
- [5] Baker R.: "Flow Measurement Handbook"; Cambridge University Press, New York, 2005, ISBN 13-978-0-521-48010-9,
- [6] Določek V.: "Dinamika", Mašinski fakultet Sarajevo, 2007,
- [7] Micro Motion: "Proving Coriolis Flowmeters"; Fisher-Rosemount, Colorado, 1998,
- [8] OIML: "OIML R 117-1 Dynamic Measuring Systems for Liquids Other Than Water"; 2007,
- [9] McGhee J., Handerson I., Sydenham P.: "Sensor science - Essential for instrumentation and measurement technology"; Elsevier - Flow Measurement and Instrumentation, University of South Australia, 1998,
- [10] Baralić E., Bašić H.: "Istraživanje uticajnih parametara na mjernu nesigurnost Coriolisovih mjerila masenog protoka u eksploatacionim uslovima"; Magistarski rad, Mašinski fakultet u Sarajevu, 2013,