

Merilne značilnice hidravličnega Wheatstonovega mostiča

Andrej SVETE, Jože KUTIN, Ivan BAJSIČ

Izvleček: Hidravlični Wheatstonov merilni mostič je potencialna rešitev linearizirane merilne naprave za direktno merjenje masnega pretoka tekočin. V obravnavani izvedbi merilnika so kot dušilni elementi v mostičnih vejah uporabljene geometrijsko enake dušilne merilne zaslonke. Prispevek predstavlja določitev nelinearnosti merilne značilnice, ki je posledica spreminjanja koeficienta lokalnih tlačnih izgub dušilnih zaslonk s pretokom. Osrednje ugotovitve eksperimentalne analize so potrjene tudi z rešitvami fizikalno-matematičnega modela merilnika ter nadgrajene z razvojem nove merilne metode merjenja masnega pretoka tekočine, s katero smo izboljšali ponovljivost meritev.

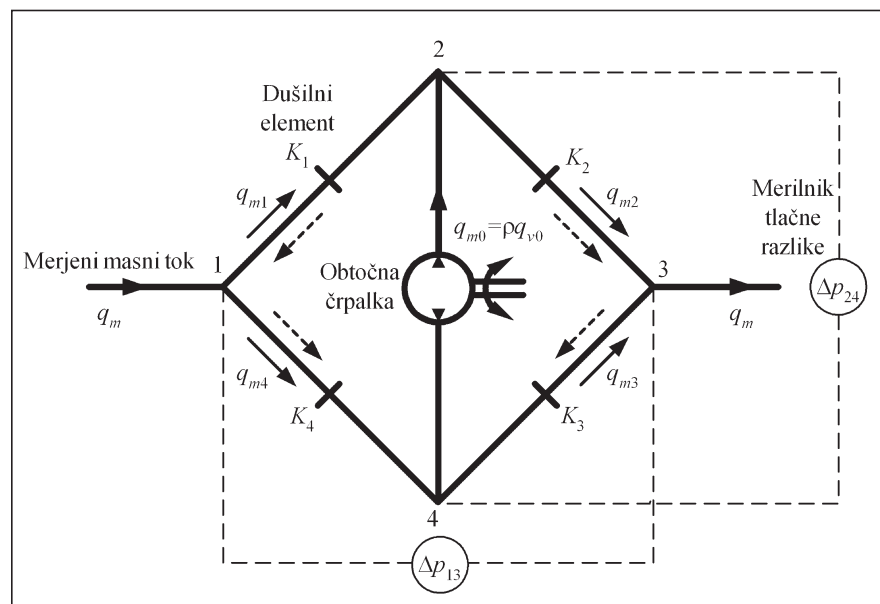
Ključne besede: hidravlični merilni mostič, obtočna črpalka, dušilni element, merilnik tlačne razlike, lokalna tlačna izguba zaslonke, linearizacija merilnika masnega pretoka, merilna značilnica,

1 Uvod

Hidravlični Wheatstonov merilni mostič je ena od starejših rešitev merilnih naprav za direktno merjenje masnega pretoka tekočin (glej npr. patente [1, 2, 3]), kljub temu pa njegove fizikalne lastnosti delovanja popisuje le malo (avtorjem tega prispevka) dostopne znanstvene literature [4, 5]. Hidravlični merilni mostič predstavlja linearizirano dušilno metodo merjenja pretoka, kar je doseženo s konstrukcijsko rešitvijo v analogiji z električnim Wheatstonovim merilnim mostičem. Sestavljajo ga štiri mostične veje, v katerih so vgrajeni identični dušilni elementi, ter obtočna veja, v kateri se z obtočno črpalko vzdržuje konstanten pretok q_{v0} (slika 1). Masni pretok merjene tekočine se določa z merjenjem tlačne razlike preko

obtočne veje Δp_{24} oziroma preko merilnega mostiča Δp_{13} .

stonovega mostiča, ki se v industriji uporabljajo za merjenje pretoka te-



Slika 1. Shema hidravličnega Wheatstonovega mostiča

Hidravlični merilni mostič je bil uspešno razvit za komercialno uporabo. Trenutno je najbolj znan proizvajalec, ki se ukvarja z izdelavo hidravličnih Wheatstonovih mostičev, podjetje AVL, ki izdeluje hidravlične mostiče tako za komercialno kot tudi za industrijsko rabo. Podjetje izdeluje več izvedb hidravličnega Wheat-

kočih goriv in katerih specifikacije so dostopne tudi na uradni internetni strani tega podjetja [6]. Hidravlični Wheatstonov mostič se uporablja v avtomobilski industriji za merjenje količine izpušnih plinov in porabe goriva. Ena od izvedb se uporablja tudi za merjenje pretoka tekočih goriv v naftni industriji, zagotavlja pa

Andrej Svete, univ. dipl. inž., doc. dr. Jože Kutin, univ. dipl. inž., izr. prof. dr. Ivan Bajsič, univ. dipl. inž., vsi Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, Laboratorij za meritve v procesnem strojništvu – LMPS

naj bi točne meritve ob spreminjajoči se gostoti, temperaturi in/ali viskoznosti merjene tekočine. Prednost uporabe takega merilnika je tudi v tem, da nima veliko premikajočih se delov in zato ne potrebuje posebnega vzdrževanja.

Namen tega prispevka je eksperimentalno in teoretično analizirati nelinearnosti merilne značilnice hidravličnega merilnega mostiča, ki je posledica spreminjanja konstante upora dušilnih elementov K_i (zaslonke) v štirih mostičnih vejah. V poglavju 2 je predstavljen fizikalno-matematični model merilnika, ki omogoča simulacije tovrstnih vplivov in je bil predstavljen tudi kot prispevek [7] v zborniku del Kuhljevi dnevi 2007 (nadaljevanje dela [8]). V poglavju 3 je predstavljen merilni sistem [9], na katerem so bile izvedene meritve, katerih rezultati so bili predstavljeni tudi v [10]. V poglavju 4 so prikazani merilni rezultati in njihovi komentarji, v poglavju 5 pa razvoj nove merilne metode merjenja masnega pretoka s hidravličnim mostičem pri uporabi neregulirane obtočne črpalke.

■ 2 Fizikalno-matematični model

Fizikalno-matematični model hidravličnega Wheatstonovega merilnega mostiča je postavljen ob predpostavki nestisljivosti in stacionarnosti pretoka tekočine. Pri nepovračljivih tlačnih izgubah v pretočnem sistemu so upoštevane le lokalne tlačne izgube na štirih dušilnih elementih, ki so predpostavljene kot mnogo večje od drugih lokalnih in linijskih izgub. Notranji premer posameznih vej hidravličnega mostiča je enak, merilnik pa je v horizontalni ravnini.

Fizikalno-matematični model opisuje sistem kontinuitetnih in energijskih enačb [11, 12], ki so v nadaljevanju zapisane za predpostavljeno smer pretoka tekočine, kot je na sliki 1 označena s polnimi puščicami. Zakon ohranitve mase zapišemo v obliki treh neodvisnih kontinuitetnih enačb za krajišča hidravličnega mostiča 1, 2 in 3:

$$q_m = q_{m4} + q_{m1}, \quad \rho q_{v0} = -q_{m1} + q_{m2},$$

$$q_m = q_{m2} + q_{m3} \quad (1)$$

kjer so q_m merjeni masni pretok, q_{v0} obtočni prostorninski pretok, ρ gostota tekočine in q_{mi} ($i = 1$ do 4) masni pretoki v posamezni mostični veji. Zakon ohranitve energije zapišemo v obliki treh neodvisnih energijskih enačb med krajišči hidravličnega mostiča 1 in 3 oz. 2 in 4:

$$\Delta p_{13} = K_1 \frac{q_{m1}^2}{\rho} + K_2 \frac{q_{m2}^2}{\rho},$$

$$\Delta p_{13} = K_4 \frac{q_{m4}^2}{\rho} + K_3 \frac{q_{m3}^2}{\rho},$$

$$\Delta p_{24} = K_4 \frac{q_{m4}^2}{\rho} - K_1 \frac{q_{m1}^2}{\rho} \quad (2)$$

z upoštevanimi nepovračljivimi tlačnimi izgubami na posameznem dušilnem elementu:

$$\Delta p_i = K_i \frac{q_{mi}^2}{\rho}, \quad K_i = \frac{\xi_i}{2A^2} \quad (3)$$

kjer je K_i konstanta upora dušilnega elementa, ki je povezana s koeficientom lokalnih tlačnih izgub ξ_i in notranjim presekom mostičnih vej A , $\Delta p_{13} = p_1 - p_3$ in $\Delta p_{24} = p_2 - p_4$ pa sta merjeni tlačni razliki. Zaradi možne spremembe smeri pretoka tekočine v posamezni veji moramo upoštevati:

$$K_i = \begin{cases} +K_i & \text{za } q_{mi} \geq 0 \\ -K_i & \text{za } q_{mi} < 0 \end{cases} \quad (4)$$

Konstanta upora se v splošnem lahko spreminja glede na vrednost pretoka preko dušilnega elementa, $K_i = K_i(q_{mi})$. Ob znanih lastnostih dušilnih elementov ter ob definiranem merjenem in obtočnem pretoku lahko z rešitvijo sistema šestih enačb (1) in (2) izračunamo posamezne masne pretoke v štirih mostičnih vejah ter tlačni razliki Δp_{13} in Δp_{24} .

2.1 Rešitev za idealno značilnico pri konstantnem K_i

Kot idealni primer predpostavimo enake dušilne elemente v posamezni veji hidravličnega mostiča, katerih konstante upora so neodvisne od pre-

toka, $K = K_1 = K_2 = K_3 = K_4$. Analitična rešitev fizikalno-matematičnega modela za tlačni razliki ima v tem primeru obliko:

$$\Delta p_{13} = \begin{cases} Kq_{v0}q_m & \text{za } q_m \leq \rho q_{v0} \\ \frac{K}{2\rho}(q_m^2 + \rho^2 q_{v0}^2) & \text{za } q_m > \rho q_{v0} \end{cases},$$

$$\Delta p_{24} = \begin{cases} \frac{K}{2\rho}(q_m^2 + \rho^2 q_{v0}^2) & \text{za } q_m \leq \rho q_{v0} \\ Kq_{v0}q_m & \text{za } q_m > \rho q_{v0} \end{cases} \quad (5)$$

Če pri pretokih $q_m \leq \rho q_{v0}$ kot izhodni signal uporabimo tlačno razliko Δp_{13} in pri pretokih $q_m > \rho q_{v0}$ tlačno razliko Δp_{24} , lahko za hidravlični Wheatstonov merilni mostič zapišemo idealno merilno značilnico:

$$\Delta p_{id} = Kq_{v0}q_m \quad \text{oz.} \quad \frac{\Delta p_{id}}{q_{v0}} = Kq_m \quad (6)$$

Tlačna razlika Δp_{id} je linearno povezana z merjenim masnim pretokom tekočine q_m , če so v hidravličnem mostiču vgrajeni idealni, med seboj enaki dušilni elementi K , in je prostorninski pretok q_{v0} skozi obtočno vejo konstanten. Analitična rešitev fizikalno-matematičnega modela za masne pretoke v posamezni veji je:

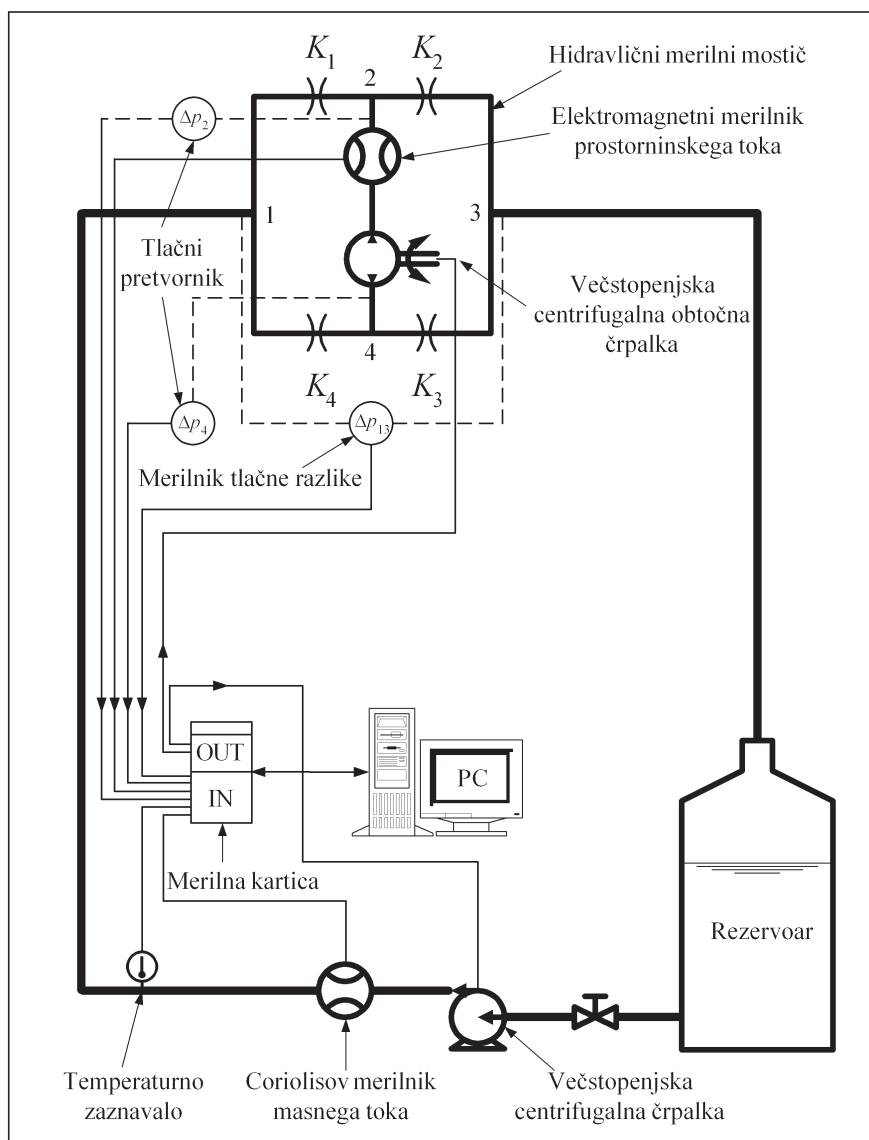
$$q_{m1} = \frac{q_m - q_{m0}}{2}, \quad q_{m2} = \frac{q_m + q_{m0}}{2},$$

$$q_{m3} = \frac{q_m - q_{m0}}{2}, \quad q_{m4} = \frac{q_m + q_{m0}}{2} \quad (7)$$

kar pomeni, da so v primeru, ko je merjeni pretok manjši od obtočnega $q_m < \rho q_{v0}$, tokovne razmere v mostiču takšne, kot je na sliki 1 prikazano s črtkanimi puščicami. S polnimi puščicami so na isti sliki označene tokovne razmere, ki nastanejo, ko je merjeni pretok večji od obtočnega $q_m > \rho q_{v0}$. V primeru, ko je merjeni pretok enak obtočnemu $q_m = \rho q_{v0}$, pa tekočina v mostični veji 1 in 3 miruje.

■ 3 Merilni sistem

Eksperimentalna študija hidravličnega Wheatstonovega merilnega mostiča je potekala na merilni prog



Slika 2. Shema merilne proge

s pretokom vode v LMPS na Fakulteti za strojništvo v Ljubljani. Shematsko je prikazana na sliki 2.

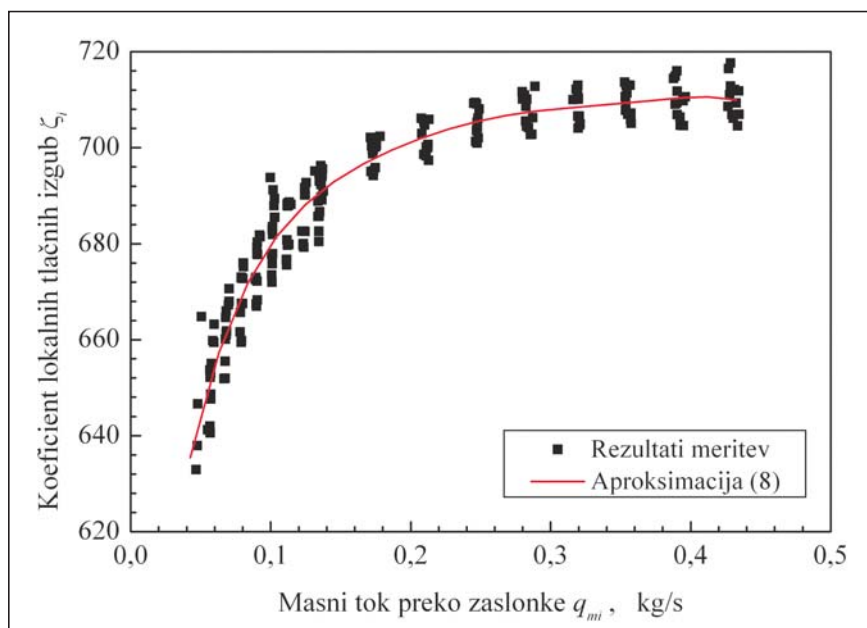
Hidravlični merilni mostiči sestavljajo cevni vodniki z notranjim premerom $D = 24$ mm. Kot dušilni elementi so v mostičnih vejah vgrajene štiri enake dušilne zaslonke z notranjo odprtino premera $d = 6$ mm. Obtočni pretok zagotavlja obtočna centrifugalna črpalka (Grundfos, CRN2-110), vrednost obtočnega pretoka pa merimo z elektromagnetnim merilnikom prostorninskega pretoka (Foxboro, IMT 25). Tlačna razlika Δp_{13} je merjena z merilnikom tlačne razlike (Endress+Hauser, PMD 70, merilno območje 3 bar), tlačna razlika Δp_{24} pa z dvema merilnikoma nadtlaka (Foxboro Eckardt, BIA 408, merilno območje 6 in 3 bar).

Pretok vode skozi merilno progo zagotavlja centrifugalna črpalka (Grundfos, CRN4-120). Referenčno vrednost masnega pretoka meri Coriolisov merilnik masnega pretoka (Foxboro, CFS 10). Meri se tudi temperatura vode, ki se upošteva pri določanju njene gostote. Vsi merilniki imajo električne izhodne signale in so povezani na vhodno/izhodno merilno kartico (National Instruments, DAQPad-6020E). Preko merilne kartice se z električnimi signali nadzoruje tudi vrtilna frekvenca obeh črpalk. Nadzorni program merilnega sistema je izdelan v programskem okolju LabVIEW.

Tlačno-pretočne lastnosti uporabljenih dušilnih zaslonk so bile določene eksperimentalno. Slika 3 prikazuje skupek rezultatov meritev koeficienta lokalnih tlačnih izgub ene od dušilnih zaslonk za različne kombinacije smeri zaslonke in smeri njenih vpenjalnih elementov. Polna črta predstavlja aproksimacijo rezultatov v obliki:

$$\xi_i = 720,31 - \frac{3,9591}{q_{mi}}, K_i = \frac{8\xi_i}{\pi^2 D^4} \quad (8)$$

ki je uporabljena kot vhodni podatek v fizikalno-matematičnem modelu hidravličnega merilnega mostiča.



Slika 3. Spreminjanje koeficienta lokalnih tlačnih izgub dušilne zaslonke z masnim pretokom preko zaslonke

■ 4 Rezultati meritev z regulirano obtočno črpalko

Pri meritvah z regulirano obtočno črpalko je obtočna centrifugalna črpalka preko elektromagnetnega merilnika prostorninskega pretoka in nadzornega računalnika vzdrževala konstanten obtočni pretok. Meritve na hidravličnem merilnem mostiču so potekale pri štirih različnih obtočnih pretokih q_{v0} , in sicer 750, 1000, 1250 in 1500 dm³/h (cca. 0,21, 0,28, 0,35 in 0,42 dm³/s), v območju merjenega masnega pretoka q_m do 0,84 kg/s. Slika 4 prikazuje potek izmerjenih tlačnih razlik v odvisnosti od merjenega pretoka za primer obtočnega toka 1000 dm³/h. Rezultati potrjujejo ugotovitve teoretične analize v poglavju 2. Vidna je linearna odvisnost izmerjene tlačne razlike Δp_{13} , ko je masni pretok q_m manjši od obtočnega, ter linearna odvisnost Δp_{24} , ko je q_m večji od obtočnega. Izmerjeni potek tlačnih razlik tudi v drugih odsekih sledi obliki analitičnih rešitev (5).

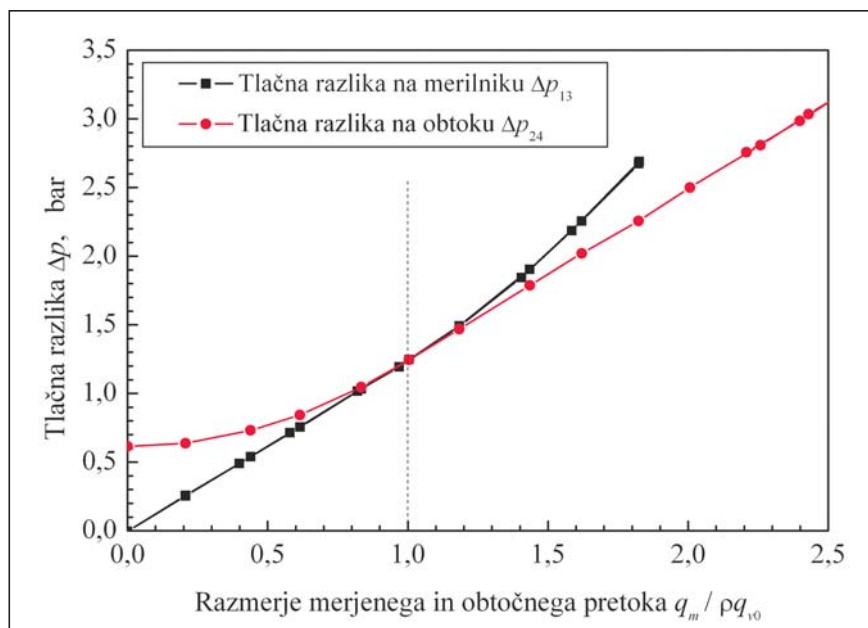
Slika 5 ponuja podrobnejši vpogled v linearnost merilne značilnice za primer obtočnega pretoka 1000 dm³/h. Odstopek od linearne značilnice je razlika med dejansko merilno značilnico in njeno linearno aproksimacijo. Poleg rezultatov meritev je na sliki 5 s polno črto prikazana tudi rešitev fizikalno-matematičnega modela. Vpliv spreminjanja konstante upora dušilnih elementov s pretokom se kaže v določeni nelinearnosti merilne značilnice hidravličnega merilnega mostiča. Značilna sprememba se zgodi pri prehodu preko točke, ko je merjeni pretok enak obtočnemu.

Za občutljivost hidravličnega merilnega mostiča, ki jo izrazimo kot naklonski koeficient linearne aproksimacije odvisnosti $\Delta p/q_{v0}$ od q_m :

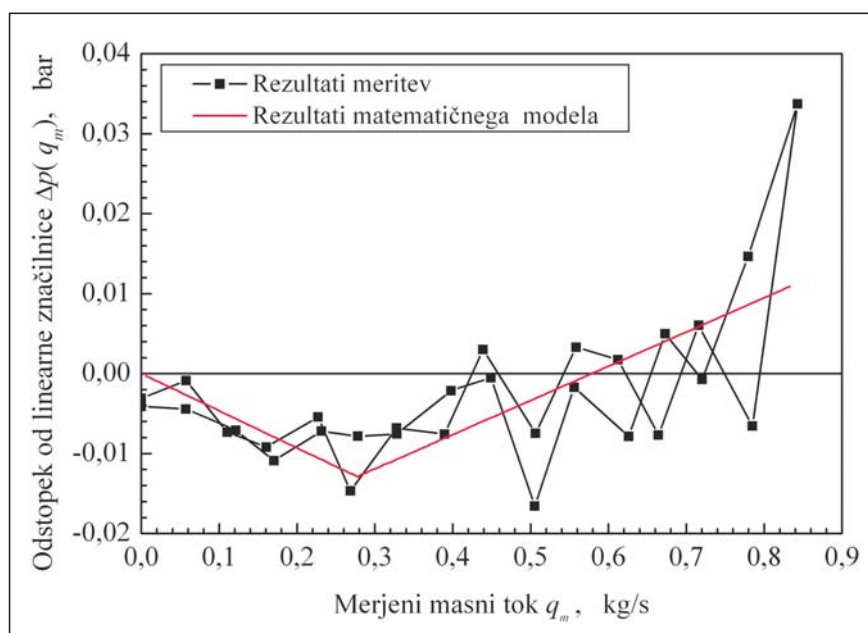
$$K_{WM} = \frac{\Delta p}{q_{v0} q_m} \quad (9)$$

in v primeru idealne značilnice (5) zanjo velja, da je enaka konstanti upora dušilnega elementa:

$$K_{WM} = \frac{\Delta p_{id}}{q_{v0} q_m} = K \quad (10)$$



Slika 4. Izmerjene tlačne razlike pri obtočnem pretoku 1000 dm³/h



Slika 5. Absolutni odstopki merilne značilnice od linearne aproksimacije pri obtočnem pretoku 1000 dm³/h

opazimo, da se pri različnih obtočnih pretokih skoraj ne spreminja. Preglednica 1 prikazuje vrednosti občutljivosti merilnika. Občutljivost izmerjene merilne značilnice je nekoliko večja od teoretične in se bolj spreminja z obtočnim pretokom. Možen vzrok so poenostavitve fizikalno-matematičnega modela, ki upošteva le tlačne izgube v dušilnih elementih. V zadnjem stolpcu preglednice 1 je podana še ocenjena linearnost merilne značilnice pri različnih obtočnih pretokih, ki je

določena kot relativna vrednost največjega odstopka glede na merilno območje. Rezultati kažejo, da se linearnost merilne značilnice povečuje z večanjem obtočnega pretoka.

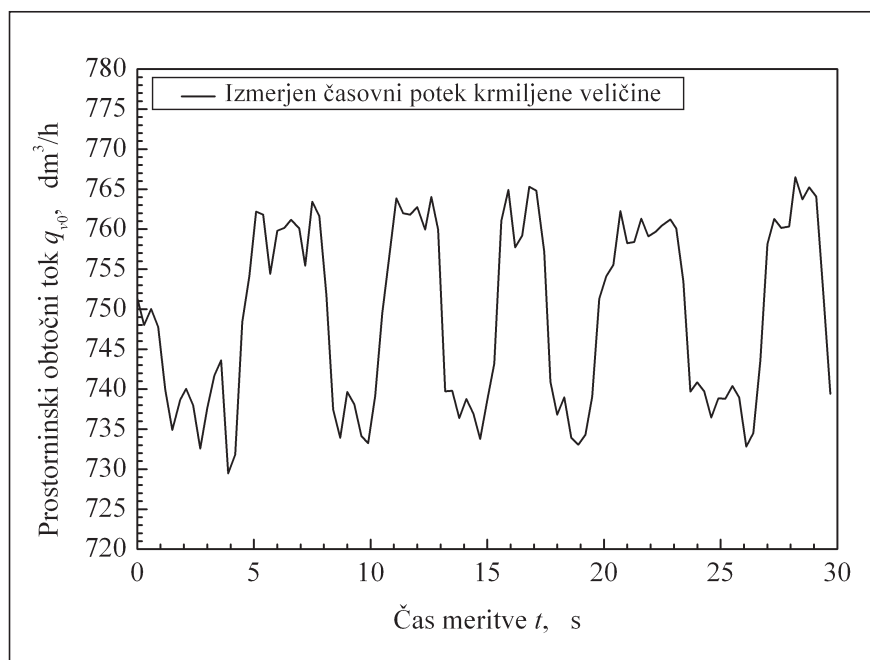
Eksperimentalni in teoretični rezultati kažejo tako podoben trend kot tudi podobno vrednost odstopkov. Imajo pa relativno nizko ponovljivost, ki je v veliki meri posledica nihanja pretoka pri krmiljenju obtočnega pretoka zaradi kvan-

Preglednica 1. Merilna občutljivost in linearnost merilnika pri različnih obtočnih pretokih

Obtočni pretok	Občutljivost merilnika v cm^{-4}		Linearnost merilnika v % merilnega razpona
	model	meritev	model
750 dm^3/h	16,06	16,26	0,42
1000 dm^3/h	16,06	16,20	0,35
1250 dm^3/h	16,07	16,14	0,23
1500 dm^3/h	16,07	16,08	0,25

tizacije frekvenčnega regulatorja obtočne črpalke. Frekvenčni regulator obtočne črpalke ima namreč le 6 bitov (64 kvantov) in krmiljeni obtočni pretok v splošnem niha med sosednjima kvantoma črpalke. Zaradi tega se je pri vsaki meritvi izvajalo 30-sekundno povprečenje, kar pa tega vpliva ne izniči popolnoma. Pri vrednotenju merilnih rezultatov moramo nadalje upoštevati merilno točnost uporabljene merilne opreme, npr. razred točnosti merilnikov tlaka je 0,1.

Ločljivost elektromagnetnega merilnika prostorninskega pretoka, preko katerega je obtočna črpalka krmiljena in ima boljše ločljivost od same črpalke, vpliva na nihanje krmiljene veličine okoli vrednosti posameznega kvanta črpalke. Iz grafičnega prikaza vidimo, da črpalka deluje nekaj časa na višjem in nekaj časa na nižjem kvantu, tako da krmiljeni obtočni pretok v splošnem niha med sosednjima ravnema črpalke. Posledica tega pa je slabša ponovljivost meritev.


Slika 6. Nestabilnost krmiljene veličine v stacionarnem stanju pri delovanju krmilnega sistema

Na *sliki 6* je prikazan časovni potek krmiljenja obtočnega prostorninskega pretoka med 30-sekundnim povprečenjem, ki smo ga izvajali med meritvami z regulirano obtočno črpalko, kjer je bila ta nastavljena na generiranje obtočnega pretoka na 750 dm^3/h , merjeni masni pretok pa je imel vrednost 2000 kg/h .

■ 5 Rezultati meritev z neregulirano obtočno črpalko

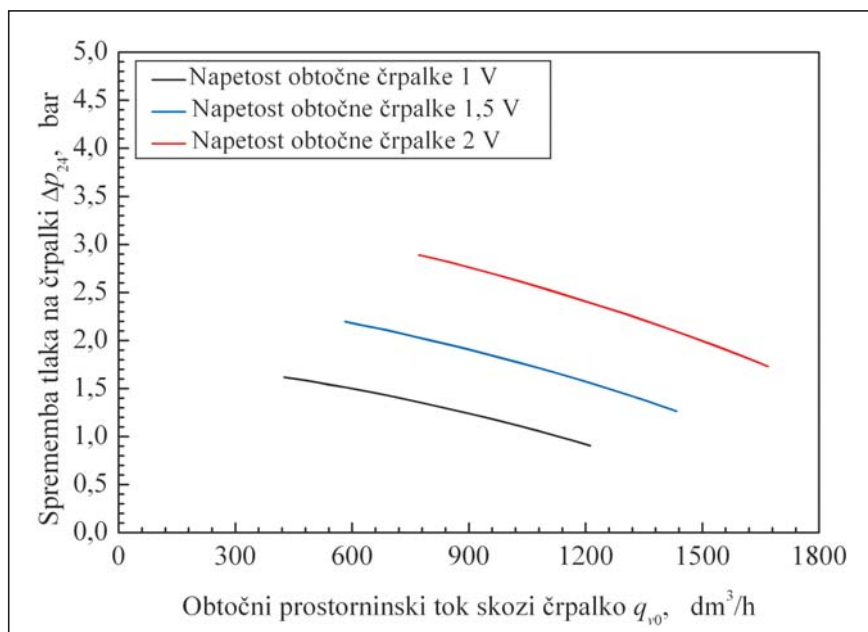
Ugotovili smo, da s poznano občutljivostjo merilnika K_{wm} ki je neodvisna od velikosti obtočnega pretoka, lahko merimo masne pretoke pri poljubnih obtočnih pretokih. S pomočjo te ugotovitve smo razvili

novi metodo merjenja masnega pretoka tekočine s hidravličnim mostičem. Pri tej metodi nam ni potrebno vzdrževati konstantne vrednosti obtočnega pretoka v obtočni veji, s čimer se izognemo vplivu kvantizacije frekvenčnega regulatorja obtočne črpalke. Prav vpliv kvantizacije frekvenčnega regulatorja obtočne črpalke pa je bil do sedaj največja pomanjkljivost te merilne metode.

V obravnavani izvedbi hidravličnega merilnega mostiča je bil za potrebe raziskav kot merilnik obtočnega pretoka uporabljen dodaten merilnik pretoka, kar za tržno izvedbo zagotovo ni ekonomsko upravičeno. Pri uporabi centrifugalne črpalke je namreč mogoče informacijo o obtočnem pretoku dobiti le z merjenjem tlačne razlike na črpalci, pri čemer moramo predhodno poznati tlačno-pretočno značilnico črpalke pri določeni vrtilni frekvenci. Tlačno-pretočna značilnica obtočne črpalke Grundfos CRN2-110, ki smo jo uporabili v naši eksperimentalni analizi, je na *sliki 7* prikazana za različne napetosti (vrtilne frekvence) črpalke.

Slika 8 prikazuje primerjavo odstopkov od linearne značilnice za obe merilni metodi, torej za metodo, kjer uporabljamo regulirano (za primer obtočnega pretoka 1500 dm^3/h), ter za metodo, kjer uporabljamo neregulirano centrifugalno črpalko (za primer napetosti obtočne črpalke 2 V). Odstopek od linearne značilnice $\Delta p/q_{v0}(q_m)$ je razlika med dejansko merilno značilnico in njeno linearno aproksimacijo. Opazimo, da smo s to metodo omejili vpliv kvantizacije frekvenčnega regulatorja obtočne črpalke na točnost meritev s hidravličnim mostičem. S to metodo smo izboljšali predvsem ponovljivost meritev. Tako pri rezultatih meritev z neregulirano obtočno črpalko opazimo nek izrazitejši trend poteka absolutnih odstopkov.

Iz meritev občutljivosti hidravličnega merilnega mostiča, v katerem uporabimo neregulirano obtočno črpalko, zopet opazimo, da se ta pri različnih obtočnih pretokih skoraj ne spreminja. *Preglednica 2* prikazuje



Slika 7. Tlačno-pretočna značilnica črpalke pri različno nastavljenih vrtilnih frekvencah

vrednosti občutljivosti merilnika pri različnih vrtilnih frekvencah (napetostih) obtočne črpalke. Občutljivost izmerjene merilne značilnice se dobro ujema s teoretično dobljeno občutljivostjo merilnika. Občutljivost izmerjene merilne značilnice je tako kot pri meritvah z regulirano obtočno črpalke nekoliko večja od teoretično dobljene občutljivosti merilnika. Vzrok je spet mogoče iskati v poenostavitvah fizikalno-matematičnega modela, ki upošteva le tlačne izgube v dušilnih elementih.

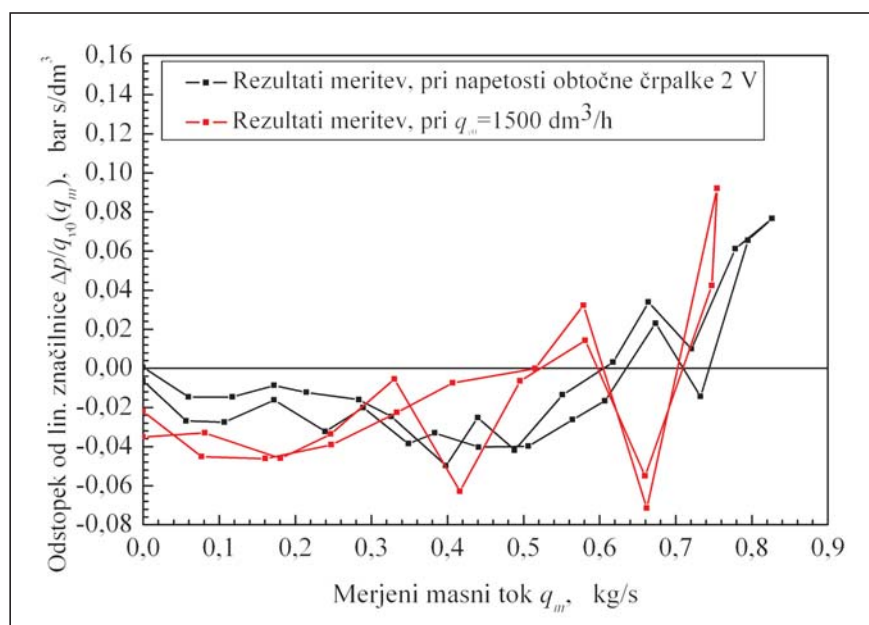
■ 6 Sklepi

V prispevku smo z meritvami in z reševanjem fizikalno-matematičnega modela preučevali neidealnosti hidravličnega Wheatstonovega merilnega mostiča, ki so posledica spreminjanja konstante upora dušilnih elementov (zaslonk) s pretokom preko posamezne mostične veje.

Preglednica 2. Izmerjena občutljivost merilnika pri različnih vrtilnih hitrostih (napetostih) neregulirane obtočne črpalke

Napetost črpalke	Občutljivost merilnika v cm^{-4}		Linearnost merilnika v % merilnega razpona
	model	meritev	
1 V	16,07	16,40	0,36
1,5 V	16,07	16,31	0,29
2 V	16,07	16,22	0,25

mostiča, ki je postavljen v LMPS na Fakulteti za strojništvo v Ljubljani, je potrdila linearnost odvisnosti tlačne razlike od merjenega pretoka pri konstantnem obtočnem pretoku. Pri pretokih, ki so manjši od obtočnega, linearna odvisnost velja za tlačno razliko preko merilnika Δp_{13} in pri pretokih, ki so večji od obtočnega za tlačno razliko preko obtoka Δp_{24} . Če kot izhodni signal uporabimo kvocient tlačne razlike in obtočnega prostorninskega pretoka, je občutljivost bolj ali manj neodvisna od velikosti obtočnega pretoka. Značilna nelinearnost merilnika, ki je posledica zmanjševanja konstante lokalnega upora dušilnih zaslonk pri manjših pretokih (Reynoldsovih številih), se z večanjem obtočnega pretoka zmanjšuje.



Slika 8. Absolutni odstopki občutljivosti merilnika od linearne aproksimacije pri obeh merilnih metodah

Eksperimentalna analiza konkretne izvedbe hidravličnega merilnega

V dosedanjih raziskavah na področju merjenja masnih pretokov s hidravličnim Wheatstonovim mostičem še ni bilo podane rešitve problema, kako povsem omejiti vpliv dinamike sistema, ki je posledica reguliranja konstantnega prostorninskega obtočnega pretoka z obtočno črpalke. Tako smo z razvojem in predstavitvijo nove metode merjenja masnih pretokov s pomočjo neregulirane obtočne črpalke zadostili tudi tej pomanjkljivosti, ki je bila do sedaj največji problem

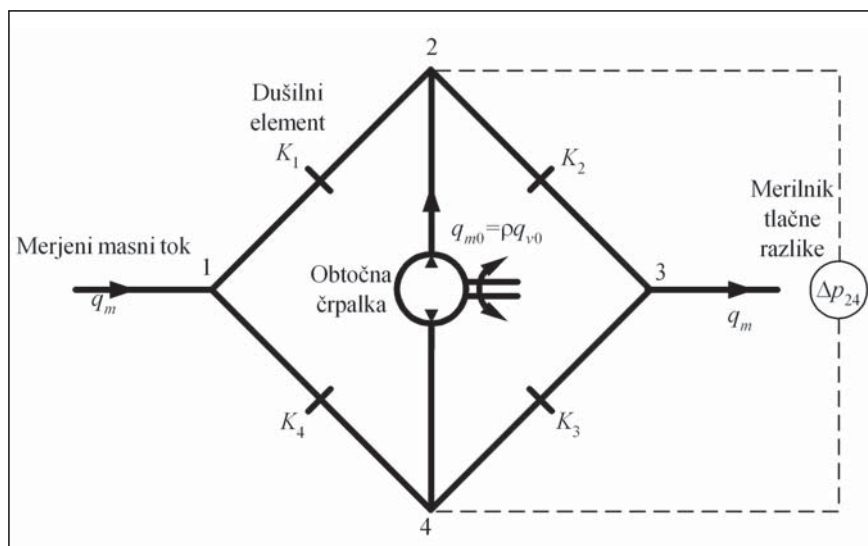
te merilne metode. Izvedena je bila tudi eksperimentalna analiza merilne metode z neregulirano obtočno črpalko na konkretnem hidravličnem Wheatstonovem merilnem mostiču, katere rezultati potrjujejo prednosti omenjene merilne metode.

V praksi se priporoča uporaba obtočne črpalke z nizko nastavljeno vrtilno frekvenco, ki zmanjša rabo energije in zahtevnost vzdrževanja merilnikov, saj v tem primeru potrebujemo le en merilnik tlačne razlike (za določanje tlačne razlike preko obtočne veje Δp_{24}). S poznano občutljivostjo merilnega mostiča, za katero smo potrdili, da je pri poljubnih obtočnih tokovnih razmerah konstantna, lahko namreč določimo trenutno vrednost obtočnega prostorninskega pretoka preko poznane tlačno-pretočne značilnice centrifugalne črpalke pri določeni vrtilni frekvenci.

Z razvojem nove metode merjenja pretoka tekočine s hidravličnim mostičem smo še dodatno zadostili potrebam nezahtevnosti vzdrževanja merilnika, ki je bila že do sedaj ena glavnih prednosti te merilne metode, saj je v praksi zagotavljanje povsem konstantnega obtočnega prostorninskega pretoka tudi z zelo kakovostnimi črpalkami zelo težavno.

Literatura

- [1] Fishman, B., Ryder, F.: Mass flowmeter, *Patent US 3232104*, 1966.
 [2] Masnik, W.: Mass flowmeter, *Patent US 3662599*, 1972.



Slika 9. Shema hidravličnega Wheatstonovega mostiča pri metodi z neregulirano obtočno črpalko z nizko nastavljeno vrtilno frekvenco

- [3] Doi, N.: Mass flowmeter, *Patent US 4031758*, 1977.
 [4] Bajsić, I.: Linearizacija merilnika pretočnih količin, *Strojniški vestnik*, 1986, let. 32, št. 7/9, str. 118–120.
 [5] Baker, R. C.: *Flow Measurement Handbook*, Cambridge University Press, 2000.
 [6] AVL: Hydraulic Wheatstone bridge mass flowmeter, <http://www.avl.com>, 2007.
 [7] Svete, A., Kutin, J., Bajsić, I.: Merilne značilnice hidravličnega Wheatstonovega mostiča, *zbornik Kuhljevi dnevi*, Slovensko društvo za mehaniko, 2007, str. 233–240.
 [8] Romih, G.: *Načrtovanje in razvoj hidravličnega Wheatstonovega merilnega mostiča*, diplomska naloga visokošolskega študija (mentor I. Bajsić), št. 1266, Fakulteta za strojništvo, Ljubljana, 2006.
 [9] Babič, D.: *Modeliranje hidravličnega Wheatstonovega merilnega mostiča*, diplomska naloga visokošolskega študija (mentor I. Bajsić), št. 1306, Fakulteta za strojništvo, Ljubljana, 2006.
 [10] Svete, A.: *Merilne značilnice hidravličnega Wheatstonovega mostiča*, diplomska naloga univerzitetnega študija (mentor I. Bajsić), št. 1266, Fakulteta za strojništvo, Ljubljana, 2007.
 [11] Škerget, L.: *Mehanika tekočin*, Tehniška fakulteta v Mariboru in Fakulteta za strojništvo, Ljubljana, 1994.
 [12] Guyon, E., Hulin, J. P., Petit, L., Mitescu, C. D.: *Physical Hydrodynamics*, Oxford University Press, 2001.

Measuring Characteristics of a Hydraulic Wheatstone Bridge

Abstract: A hydraulic Wheatstone measuring bridge is a potential solution for a linear flowmeter for direct mass-flow measurements. In a concrete example of a flowmeter placed in the Laboratory of Measurements in Process Engineering at the Faculty of Mechanical Engineering in Ljubljana four matched orifices are used as local flow restrictors in the bridge network. This paper presents an analysis of the nonlinearity of the measuring characteristics of the hydraulic measuring bridge, which results from the impact of the flowrate on the local pressure losses in the orifices. The results of the experimental analysis are confirmed with solutions of the upgraded physical-mathematical model of the flowmeter and are upgraded with the development of the new measuring method for measuring fluid mass flow with the hydraulic Wheatstone measuring bridge, with which we improved the repeatability of the measurements.

Keywords: hydraulic measuring bridge, recirculating pump, flow restrictor, differential pressure transmitter, local pressure loss of the orifice, linearization of mass flowmeter, measuring characteristics,