

Digitalna obdelava merilnih signalov pri raziskavah vpliva pulzirajočih tokov tekočine na merilnike pretoka

Andrej Svete¹, Jože Kutin², Ivan Bajsič³, Dušan Fefer⁴

^{1, 2, 3} Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, Laboratorij za meritve v procesnem strojništvu-LMPS, Aškerčeva 6, 1000 Ljubljana, Slovenija

⁴ Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija
E-pošta: andrej.svete@fs.uni-lj.si

Povzetek. V prispevku je predstavljena digitalna obdelava merilnih signalov, ki smo jo uporabili pri študiji vpliva pulzirajočih tokov na merjenje pretoka tekočine z dušilnimi elementi. Eksperimentalna analiza merjenja pulzirajočih tokov zraka z dušilno metodo je potekala na merilni progi za zrak s četrtkrožno merilno zaslonko in vgrajenim pulzatorjem toka. Z digitalnim filtriranjem podatkov eksperimentalne analize smo simulirali vpliv različnih časovnih konstant merilnikov tlačne razlike na korenski merilni pogrešek. Ta namreč prispeva pomemben delež k sistemskemu merilnemu pogrešku, ki je prisoten pri merjenju pulzirajočih tokov z dušilno merilno metodo. Rezultati digitalne obdelave merilnih signalov kažejo, da nastopi najmanjši korenski merilni pogrešek pri meritvah, ki jih izvedemo s hitro odzivnim merilnikom tlačne razlike, medtem ko so vrednosti korenskih pogreškov pri merilnikih s počasnim odzivom višje. Korenski pogreški se večajo z intenzivnostjo pulzacij.

Ključne besede: pulzirajoči tok, četrtkrožna merilna zaslonka, korenski pogrešek, digitalni filter, časovna konstanta

Digital processing of measuring signals in study of pulsating-fluid flow effects on flowmeters

Extended abstract. The purpose of measurement devices is to measure physical quantities as well as to analyze and interpret results of measurements. The incessant progress of measurement systems and measurement devices allow for measurements of quantities that can only be measured indirectly. One of such quantities is the fluid flow, which can be measured by pressure-differential devices. With this measuring method we measure pressure differences that occur on local flow restrictors, placed in a channel or a pipe in which a fluid flows. Because of the contraction of the fluid flow through local fluid restrictors, the velocity and pressure change and the pressure difference over a local flow restrictor appears. By measuring the difference in the fluid downstream pressure after an obstruction and the fluid upstream pressure before the obstruction, the volumetric and mass flow rates can be obtained. Under steady-state flow conditions, fluid flow rates can be accurately measured.

Despite the high degree of accuracy of current electronic measurement devices, inaccurate

measurements still occur when the pressure difference modulates, or changes, at a frequency greater than the frequency at which the measurement system extracts the square root of the pressure difference induced by a flow restrictor. Due to the progress in the research conducted over the last few decades into the pulsation effect on orifice flow meters, major influences on orifice plate behaviour are well defined but more work is required before all the effects can be accurately predicted and the meter output appropriately corrected for all pulsation conditions. Numerous investigators have assessed that the major cause of errors in the recorded average flow rates under pulsating flow conditions is nonlinearity of the relationship between the flow and differential pressure. That is why the square-root averaging error is one of the best diagnostic indicators of pulsation effects on the orifice measurement accuracy. The square-root averaging error contributes the greater part of the orifice plate metering error in pulsating flow conditions. It can only be avoided by measuring the average of the square roots of signals from a fast response differential pressure transducers which use instantaneous pressure-difference measured values in flow calculations. Therefore, the correct flow rate would result. On the other hand, the square-root averaging error results from

averaging dynamic signals and increases with the pulsation amplitude. Slow-response differential-pressure transducers that are used in industrial purposes can not measure instantaneous pressure differences because of their reduced frequency response. Slow-response differential-pressure transducers contain electronic low-pass filters that affect their frequency response. Consecutively, slow-response differential-pressure transducers average dynamic signals before they execute flow calculations.

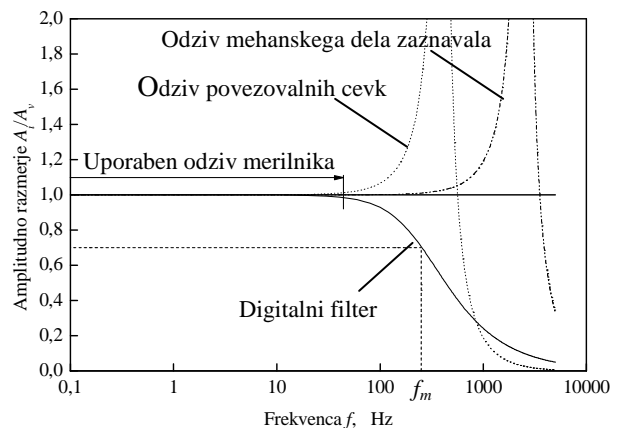
This paper presents digital processing of signals with which we upgrade the study of the effect of the pulsating flow on measurement of the fluid flow by means of pressure-differential devices. Because the measurement of the pulsating flow accuracy depends on dynamic characteristics of differential-pressure transmitters, we simulated the effect of different time constants of differential-pressure transmitters on the measured square-root averaging error with digital filtering of the results of the experimental analysis. In our experimental analysis, we measured the pressure difference across the quarter-circle orifice plate. With digital processing of measuring signals described in this paper we simulated the impact of partial filtering of the differential-pressure transducers on the measured square-root averaging error with various degrees of electronic filtering. Digital-signal processing was carried out in the computer program LabVIEW.

Keywords: pulsating flow, quarter-circle orifice plate, square-root averaging error, digital processing of signals, digital filter, time constant

1 Uvod

Eden pomembnih korakov pri razvoju merilnih zaznaval je bilo izboljšanje obdelave električnih signalov na izhodu iz merilnega zaznavala. Pospešen razvoj v digitalni računalniški tehnologiji in v teoriji obdelave signalov je vodil k prehodu iz analognega k digitalnemu procesiranju merilnih signalov, katerega največja prednost je njegova prilagodljivost, saj je lahko izvedeno v računalniško podprtem okolju. Z razvojem mikroelektronike in poceni integriranih elektronskih vezij so se pomembno izboljšale velikost, hitrost in cena procesnih računalnikov, kar je pripomoglo k razvoju in izvedljivosti številnih zahtevnejših visoko razvitih algoritmov digitalne obdelave signalov. Poznavanje teorije digitalne obdelave signalov je tako ključnega pomena pri uporabi sodobnih visoko razvitih merilnih sistemov. Moderna računalniška programska orodja, kot je LabVIEW [1], nam omogočajo uporabo digitalne obdelave signalov pri raziskovalnem delu. V tem prispevku je opisana digitalna obdelava merilnih signalov pri merjenju tlačne razlike, ki smo jo ugotavljali v eksperimentalnem delu z dušilno merilno metodo na četrtkrožni merilni zaslonki [2].

Merilni sistem za tlačno razliko je sestavljen iz tlačnega zaznavala ter pripadajočega pnevmatskega in elektronskega sistema. Vsaka od komponent sistema vpliva na dinamični odziv merilnika, kot je za uporabljen merilnik tlačne razlike grafično prikazano na sliki 1. Pnevmatični sistem vpliva na dinamični odziv celotnega tlačnega merilnega sistema z dinamičnimi lastnostmi tekočinskega oscilatorja, ki nastane v povezovalnih cevkah med merjenim objektom in merilnim zaznavalom tlačne razlike [3, 4]. Elektronika tlačnega pretvornika pa vpliva na dinamični odziv merilnika tlačne razlike z nizkopasovnim filtrom, ki je vgrajen na izhodu. S tem je omejujoč dejavnik v sistemskem odzivu celotnega tlačnega merilnega sistema.



Slika 1: Dinamični odziv merilnega sistema, uporabljenega v eksperimentalni analizi

Figure 1. Dynamic response of the measurement system used in experimental analysis

Vpliv dinamičnih lastnosti tlačnega merilnega sistema na rezultate eksperimentalne analize smo simulirali z digitalno obdelavo merilnih signalov tlačnega pretvornika. Z digitalnim filtriranjem generiranih signalov smo namreč proučevali vpliv različnih časovnih konstant merilnika tlačne razlike (mejnih frekvenc digitalnega filtra prvega reda) na velikost korenskega merilnega pogreška, ki ga dobimo pri določanju časovno povprečenega pulzirajočega toka tekočine z uporabo dušilnih metod merjenja pretoka tekočine [5]. V ta namen je bil izveden preizkus, ki je potekal na merilni progi v LMPS, ki je predstavljena v poglavju 3. Jedro tega prispevka sta poglavji 3 in 4, kjer so prikazani potek in rezultati digitalne obdelave signalov.

2 Korenski merilni pogrešek

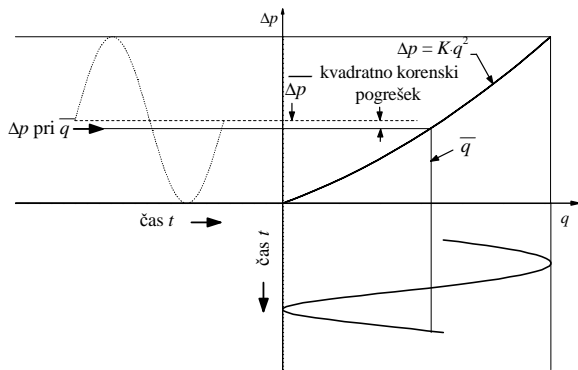
Namen prispevka je matematično in eksperimentalno določiti korenski merilni pogrešek, ki nastopi pri merjenju pulzirajočega toka z dušilnimi metodami in je

posledica korenске odvisnosti med merjenim tokom in izmerjeno tlačno razliko na dušilnem elementu:

$$q = K \cdot \sqrt{\Delta p}, \quad (1)$$

kjer je K konstanta upora tekočine skozi dušilni element.

Korenski merilni pogrešek nastane, če za določanje časovno povprečne vrednosti prostorninskega toka \bar{q} uporabimo koren časovno povprečne vrednosti tlačne razlike $\sqrt{\overline{\Delta p}}$ [6]. Merilniki tlačne razlike s počasnim odzivom, ki se ponavadi uporabljajo v industriji, namreč povprečijo merilni signal pred izračunom korenске vrednosti. Korenski merilni pogrešek pa je enak nič, če namesto tega uporabimo časovno povprečno vrednost korena trenutnih vrednosti tlačnih razlik $\overline{\sqrt{\Delta p}}$, kot je prikazano na sliki 2.



Slika 2: Grafični prikaz korenskega pogreška
Figure 2. Graphic representation of square-root averaging error

Korenski, pogrešek, definiran matematično, ima obliko:

$$SRE = \frac{\sqrt{\overline{\Delta p}} - \overline{\sqrt{\Delta p}}}{\sqrt{\overline{\Delta p}}}. \quad (2)$$

Predpostavimo, da se tlačna razlika spreminja po sinusni funkciji:

$$\Delta p = \overline{\Delta p} \cdot (1 + \varepsilon \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t)), \quad (3)$$

kjer je $\varepsilon = \Delta p'_{rms} / \overline{\Delta p} \cdot \sqrt{2}$ amplitudno razmerje in f frekvenca pulzacij. Amplitudno razmerje med srednjo korensko vrednostjo pulzirajoče komponente tlačne razlike $\Delta p'_{rms}$ in časovno povprečno vrednostjo tlačne razlike $\overline{\Delta p}$ imenujemo intenzivnost pulzacij I_p :

$$I_p = \frac{\Delta p'_{rms}}{\overline{\Delta p}}. \quad (4)$$

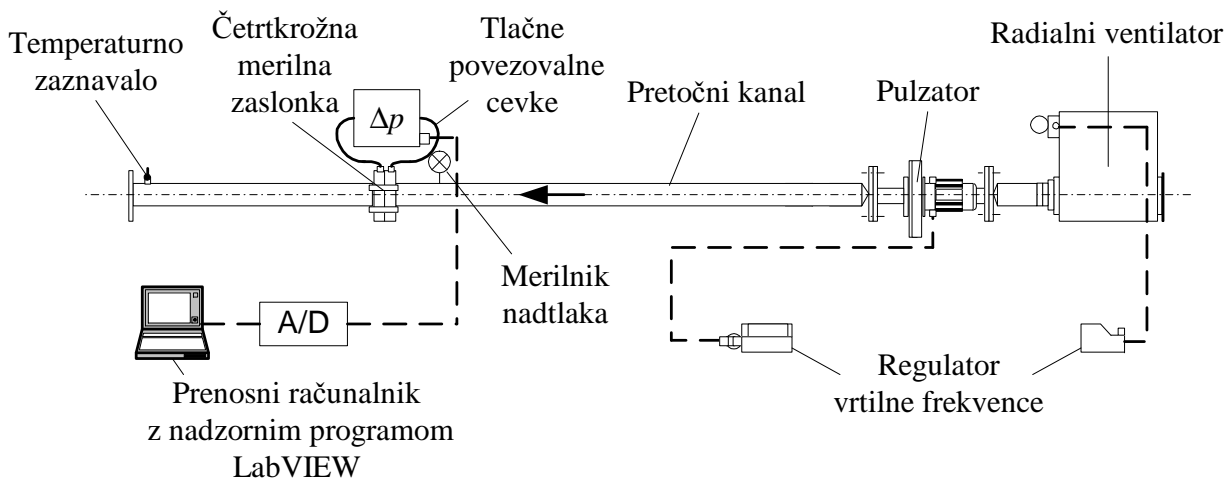
Tako dobimo matematično rešitev za korenski pogrešek sinusnega signala:

$$SRE = \left(\left(\frac{1}{\sqrt{(1 + I_p \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t))}} \right) - 1 \right). \quad (5)$$

Grafično je odvisnost teoretičnega korenskega pogreška od intenzivnosti pulzacij I_p prikazana skupaj z rezultati eksperimentalne analize na sliki 5.

3 Opis preizkusa

Eksperimentalna študija merjenja pulzirajočih tokov zraka z dušilno metodo je potekala na merilni progi v Laboratoriju za meritve v procesnem strojništvu na Fakulteti za strojništvo v Ljubljani in je shematsko prikazana na sliki 3. Kot dušilni element za pretok je



Slika 3: Shema merilne proge v LMPS
Figure 3. Schematic of a measuring circuit in LMPS

bila uporabljena četrtkrožna merilna zaslonka, izdelana in vgrajena po standardih [2].

3.1 Merilna proga

Pretok zraka zagotavljamo z radialnim ventilatorjem, na katerem pretok spreminjamo z nadzorom vrtilne frekvence. V merilni progi je za ventilatorjem vgrajen pulzator, ki je razvit v Laboratoriju za meritve v procesnem strojništvu [7]. Pulzator ima vgrajeno rotirajočo zastojno ploščo, ki je oblikovana tako, da z vrtenjem omogoča generiranje čim bolj sinusno spreminjajočega se toka zraka. Pulzator omogoča frekvenco generiranja pulzacij toka zraka do 100 Hz in štiri različne amplitude pulzirajočega toka (uporabili smo štiri različne zastojne plošče s štirimi različnimi razmerji prekrivanja cevi).

Tok zraka je nato speljan po cevovodu do mesta, kjer je vgrajena četrtkrožna merilna zaslonka [2], na kateri smo merili tlačno razliko z variabilnim magnetno uporovnim merilnikom (Validyne, P855D) [8, 9], katerega dinamične lastnosti so omejene z nizkopasovnim filtrom z mejno frekvenco 250 Hz. Izhodno napetost merilnika tlačne razlike smo merili z merilno kartico (National Instruments, DAQPad-6020E) in računalniškim programom LabVIEW. V toku zraka smo merili temperaturo in nadtlak ter ju upoštevali pri določanju gostote zraka ter pri izračunu pretoka zraka.

3.2 Digitalna obdelava merilnih signalov

Potek digitalnega filtriranja merilnih signalov je bil izveden v programskem okolju LabVIEW, ki nam omogoča branje shranjenih podatkov eksperimentalne analize ter njihovo digitalno obdelavo. S tem je omogočena določitev korenskega merilnega pogreška v odvisnosti od časovne konstante uporabljenega digitalnega nizkopasovnega filtra na izhodnem signalu merilnika tlačne razlike. Program je shematsko prikazan na sliki 4. Sestavni podprogrami nadzornega program so:

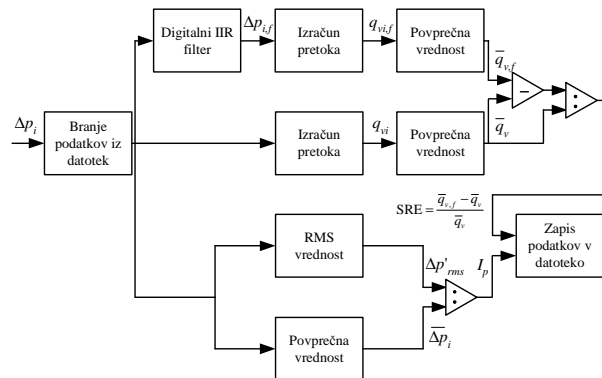
- *Podprogram Branje podatkov iz datotek*: branje podatkov iz datotek, v katerih so shranjeni izmerjeni podatki tlačnih razlik na četrtkrožni merilni zaslonki.

- *Podprogram Izračun pretoka*: izračun gostote zraka po plinski enačbi, ki jo v nadaljevanju uporabi za preračun prostorninskega toka.

- *Digitalni IIR filter*: nizkopasovni Butterworthov IIR filter prvega reda, s katerim smo simulirali različne časovne konstante merilnika tlačne razlike [10]. Časovna konstanta odziva τ je obratno sorazmerna mejni frekvenci f_m Butterworthovega filtra prvega reda:

$$\tau = \frac{1}{2\pi f_m} \quad (6)$$

- *Podprogram Zapis podatkov v datoteko*: shranjevanje podatkov v datoteko, ki so v našem primeru izmerjeni korenski pogreški v odvisnosti od intenzivnosti pulzacij.



Slika 4: Blokveni diagram programa, uporabljenega za digitalno filtriranje podatkov eksperimentalne analize
Figure 4. Block diagram of the program used for digital filtering of data gained from experimental analysis

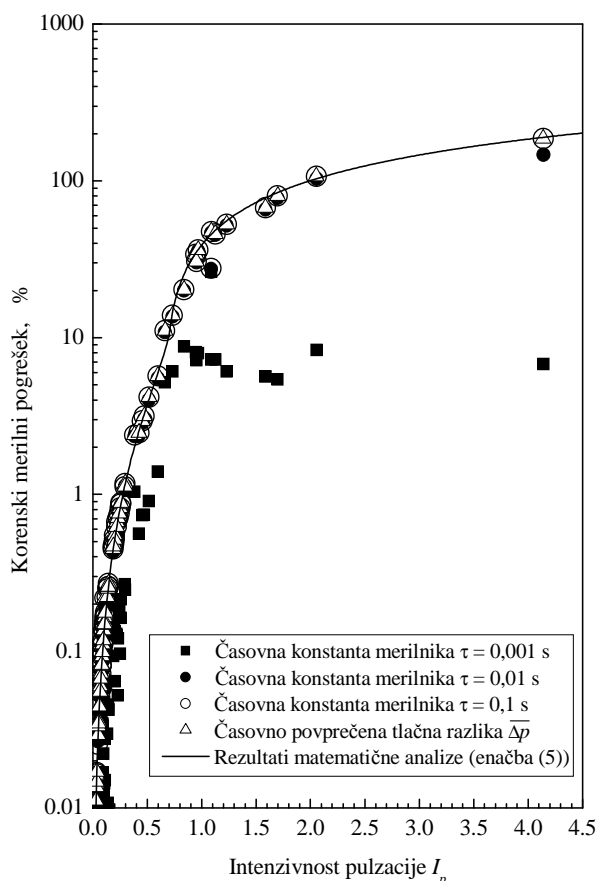
4 Rezultati

Rezultati meritev, ki so prikazani na sliki 5, prikazujejo primerjavo korenskih merilnih pogreškov za različne nastolirane merilnike tlačne razlike, ki imajo dinamične lastnosti določene s časovnimi konstantami (mejnimi frekvencami) $\tau = 0,001$ s ($f_m = 160$ Hz), $0,01$ s ($f_m = 16$ Hz) in $0,1$ s ($f_m = 1,6$ Hz). Na sliki 5 je prikazana tudi primerjava teoretično (enačba (5)) in eksperimentalno določenega korenskega pogreška, kjer smo pri določanju časovno povprečene vrednosti toka tekočine uporabili kar koren časovno povprečene vrednosti tlačne razlike (idealno povprečenje tlačne razlike).

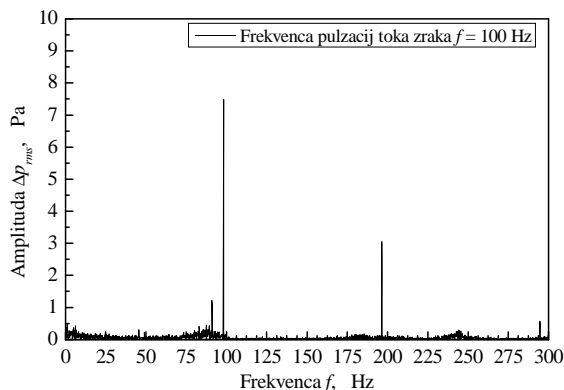
Opazimo, da dobimo najmanjši korenski merilni pogrešek pri meritvah, ki smo jih izvajali s hitro odzivnim merilnikom tlačne razlike z najmanjšo vrednostjo časovne konstante. Korenski pogreški pri merilnikih, ki imata višje vrednosti časovnih konstant ($0,01$ s in $0,1$ s), so višje in se zelo približajo rezultatom matematične in eksperimentalne analize, kjer smo uporabili časovno povprečeno vrednost tlačne razlike. Razlika med izmerjenimi korenskimi pogreški s hitro odzivnim merilnikom tlačne razlike ter preostalima merilnikoma se z večanjem intenzivnosti pulzacij veča. Pri največji vrednosti intenzivnosti pulzacij, kjer smo še izvajali meritve ($I_p = 4,1$), je razlika med korenskimi pogreški že približno 180-odstotna.

Pri uporabi počasi odzivnih merilnikov tlačne razlike ($\tau = 0,1$ s in $\tau = 0,01$ s), ki imata mejni frekvenci manjši oziroma enaki 16 Hz, se dobljeni korenski pogrešek zelo približa rezultatom matematične analize. To pomeni, da med frekvenco 16 Hz in 160 Hz, ki je mejna frekvenca hitro odzivnega merilnika tlačne razlike, v merilnem sistemu nastopa pomembna frekvenčna komponenta. Iz frekvenčnih slik vseh meritev ugotovimo, da je v amplitudno frekvenčnem

spektru merilnega sistema med frekvencama 16 Hz in 160 Hz opazna značilna frekvenca, in sicer prva lastna frekvenca prve povezovalne cevke vrednosti 90 Hz. Ta je vidna tudi iz amplitudno frekvenčnega spektra tlačnega merilnega signala, ki je na sliki 6 prikazan za frekvenco pulzacij toka zraka $f = 100$ Hz.



Slika 5: Z matematično analizo izračunan in z eksperimentalno analizo določen korenski merilni pogrešek
Figure 5. Calculated and measured square-root averaging error



Slika 6: Amplitudno frekvenčni spekter merilnega signala tlaka
Figure 6. Amplitude frequency spectrum of the pressure measuring signal

5 Sklepi

Pri dinamičnih meritvah tlaka je želja izogniti se lastnim frekvencam povezovalnih elementov merilnika tlačne razlike, saj pri teh frekvencah nastanejo ojačitve tlačnega valovanja, ki jih povzroči resonančni sistem zraka v povezovalnih cevkah med objektom merjenja in merilnikom tlaka. Ker je ta frekvenca v našem merilnem sistemu višja od vrednosti mejnih frekvenc počasi odzivnih merilnikov tlačne razlike, so ti bolj občutljivi na korenske merilne pogreške. Merilniki z nizkimi mejnimi frekvencami namreč porežejo najpomembnejše frekvenčne komponente merilnega sistema, ki so višjih vrednosti od mejne frekvence nizkopasovnih digitalnih filtrov teh merilnikov.

Z digitalno obdelavo merilnih signalov smo se prepričali, da so meritve časovno povprečne vrednosti toka pulzirajoče tekočine z dušilno merilno metodo lahko izpostavljene korenskim merilnim pogreškom. Vzrok je v uporabi merilnikov tlačne razlike, ki merilni signal povprečijo pred izračunom korenske vrednosti. Takšni merilniki se pogosto uporabljajo tudi v industriji. Korenske merilne pogreške je tako mogoče zmanjšati s primernejšo izbiro merilnika tlačne razlike.

6 Literatura

- [1] Chugani, M. L., Samant, A. R., Cerna, M.: *LabVIEW signal processing*, Prentice Hall, New Jersey, 1998.
- [2] ISO/TR 15377: *Measurement of fluid flow by means of pressure-differential devices- Guidelines for specification of nozzles and orifice plates beyond the scope of ISO 5167-1*, ISO, Geneve, 1998.
- [3] Bajsić, I., Kutin, J., Žagar, T.: Response time of a pressure measurement system with a connecting tube, *Instrumentation Science & Technology*, 35(4), 2007, str. 399-409.
- [4] Whitmore, S. A., Lindsey, W. T., Curry, R. E., Gilyard, G. B.: *Experimental characterization of the effects of pneumatic tubing on unsteady pressure measurements*, NASA TM 4171, 1990.
- [5] ISO/TR 3313: *Measurement of fluid flow in closed conduits - Guidelines on the effects of flow pulsations on flow-measurement instruments*, ISO, Geneve, 1998.
- [6] Gajan, P., Mottram, R. C., Hebrard, P., Andriamihafy, H., Platet, B.: The influence of pulsating flows on orifice plate flowmeters, *Flow Measurement and Instrumentation*, 3(3), 1992, str. 118-129.
- [7] Buljan, D.: *Razvoj in testiranje generatorja pulzirajočega toka zraka*, diplomska naloga univerzitetnega študija (mentor I. Bajsić), št. 5447, Fakulteta za strojništvo, Univerza v Ljubljani, 2005.
- [8] Busch-Vishniac, I. J.: *Electromechanical sensors and actuators*, Springer, New York, 1998.
- [9] Dutoit, B. M., Besse, P. A., Friedrich, A. P., Popovic, R. S.: *Demonstration of a new principle for an active electromagnetic pressure sensor*, Proceedings of the 2nd European Conference on Magnetic Sensors & Actuators EMSA'98, EPFL, Lausanne, 1998, str. 153-155.

[10] Smith, M. J. T., Mersereau, R. M.: *Introduction to Digital Signal Processing, A Computer Laboratory Textbook*, John Wiley & Sons, New York, 1992.

Andrej Svete je diplomiral leta 2007 na Fakulteti za strojništvo v Ljubljani, kjer je trenutno zaposlen kot mladi raziskovalec v Laboratoriju za meritve v procesnem strojništvu. Na raziskovalnem področju se ukvarja z eksperimentalnim vrednotenjem vpliva tokovnih pulzacij na delovanje različnih tipov merilnikov pretoka tekočine.

Jože Kutin je diplomiral, magistriral in doktoriral na Fakulteti za strojništvo v Ljubljani (v letih 1996, 1999, 2003). Trenutno je zaposlen kot asistent za področje Meroslovje v Laboratoriju za meritve v procesnem strojništvu na Fakulteti za strojništvo v Ljubljani. Njegovo raziskovalno delo zajema meroslovje, s poudarkom na metrologiji tokov ter dinamiki tlaka in temperatur.

Ivan Bajsić je diplomiral in magistriral na Fakulteti za strojništvo v Ljubljani (v letih 1975 in 1984) ter doktoriral na Fakulteti za strojništvo v Sarajevu (1990). Trenutno je zaposlen kot izredni profesor za več učnih predmetov s področja meroslovja na vseh stopnjah študija na Fakulteti za strojništvo Univerze v Ljubljani. Njegovo raziskovalno delo zajema področje uporabnega meroslovja energetske-procesnih veličin stanja.

Dušan Fefer je diplomiral leta 1975 in se leta 1976 zaposlil kot asistent na Fakulteti za elektrotehniko, Univerze v Ljubljani, kjer je leta 1983 magistriral in leta 1986 doktoriral. Svojo raziskovalno pot je začel v industriji na področju visokofrekvenčnih TV merilnih sistemov. Leta 1976 se je zaposlil na Fakulteti za elektrotehniko, kjer je bil leta 1997 izvoljen za rednega profesorja. Njegovo pedagoško in raziskovalno delo vključuje področja merilnih sistemov, senzorjev, preciznih AC/DC napetostnih referenčnih virov, akustike, magnetike, tehničnega varovanja in vplivov elektromagnetnih polj na biološke sisteme.