

# Razvoj generatorja tokovnih pulzacij kapljevine

Andrej SVETE, Peter SAMBOL, Jože KUTIN, Ivan BAJSIĆ

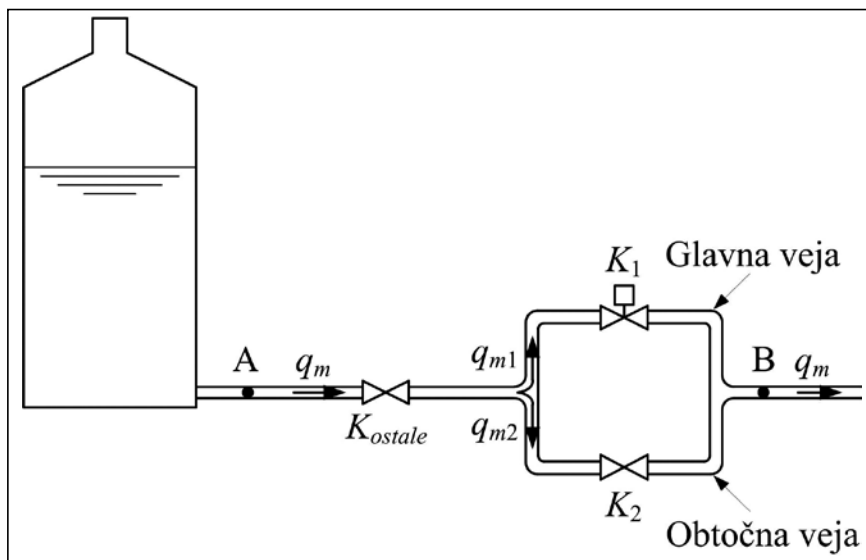
**Izveček:** Zaradi nenehnega večanja zahtev po višji točnosti merjenja pretoka postaja študij vpliva časovno spreminjajočih se tokovnih razmer ključen za nadaljnji razvoj merilnikov pretoka. Prispevek predstavlja razvoj preizkusnega sistema z vgrajenim generatorjem pulzacij toka vode, ki omogoča generiranje ponovljivih tokovnih pulzacij z določenimi lastnostmi, kot sta frekvenca in amplituda tokovnih pulzacij. Generator tokovnih pulzacij kapljevine je sestavljen iz dveh vzporednih cevi, kjer je v glavni cevi vgrajen preklapljavajoč ventil. Mehanska izvedba merilnega sistema z vgrajenim generatorjem tokovnih pulzacij je oblikovana s pomočjo matematičnega modeliranja celotnega preizkusnega sistema. Lastnosti generatorja tokovnih pulzacij in vplivi raztezne posode na blaženje generiranih tokovnih pulzacij so eksperimentalno potrjeni s spektralno analizo generiranih tokovnih pulzacij.

**Ključne besede:** generator tokovnih pulzacij, frekvenca pulzacij, amplituda pulzacij, tlačna izguba, elektromagnetni ventil, frekvenčna slika

## 1 Uvod

Pogonski sistemi toka tekočine, resonančna nihanja pretočnih cevi in krmilnih ventilov, odlepljanje toka tekočine za ovirami v cevovodu, določeni režimi večfaznih tokov v industriji (kemična, avtomobilska, farmacevtska, živilska ...) generirajo tokovne pulzacije in druge dinamične spremembe parametrov toka tekočine [1, 2], zato je razumevanje njihovega vpliva na delovanje in merilno točnost posameznega merilnika pretoka zelo pomembno [3]. V splošnem je občutljivost merilnikov pretoka na tokovne pulzacije odvisna od vrste merilnika in njegove izvedbe ter od frekvenčnega in amplitudnega območja tokovnih pulzacij [4].

Asist. Andrej Svete, univ. dipl. inž., Peter Sambol, dipl. inž., doc. dr. Jože Kutin, univ. dipl. inž., izr. prof. dr. Ivan Bajsić, vsi Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo – LMPS



Slika 1. Shematski prikaz generatorja tokovnih pulzacij

Namen tega prispevka je predstaviti fazo razvoja preizkusnega sistema za eksperimentalno proučevanje vpliva tokovnih pulzacij na merilnike pretoka. Kakovostno laboratorijsko testiranje merilnikov pretoka na pulzirajoče tokove namreč omogoča oceno dinamičnih zmogljivosti meril-

ne opreme za pretoke, napovedovanje dinamičnih merilnih pogreškov v različnih pogojih vgradnje, ustrezno izvedbo vgradnega mesta za merilnik pretoka v realnih sistemih ter optimizacijo izvedbe merilnikov pretoka z namenom zmanjšanja občutljivosti na tovrstne vplive.

Predstavljeni generator tokovnih pulzacij je sestavljen iz dveh vzporednih cevi, v katerih so vgrajeni ventili, s katerimi generiramo tokovne pulzacije. Medtem ko odpiranje in zapiranje ventila v glavni veji omogoča ustvarjanje tokovnih pulzacij, obtočna veja generatorja tokovnih pulzacij preprečuje prevelik vpliv zaustavitve pretoka na samo delovanje črpalke, ki ves čas deluje pri stalni vrtilni frekvenci (slika 1).

V poglavju 2 je predstavljen matematični model, s katerim dobimo oceno velikosti amplitude pulzacij toka vode, ki jih lahko generiramo z zapiranjem in odpiranjem ventila v glavni veji. Na velikost generiranih amplitud pulzacij toka namreč vplivajo tako linijske kot lokalne tlačne izgube v cevni sistem, ki sestavlja omenjeni generator pulzacij. V poglavju 3 je predstavljen merilni sistem z izvedbo generatorja tokovnih pulzacij, ki je postavljen v Laboratoriju za meritve v procesnem strojništvu. Predstavljeni tlačni generator tokovnih pulzacij je že bil uspešno uporabljen za študij odziva hidravličnega Wheatstonovega merilnega mostiča v primeru časovnega spreminjanja pretoka [5]. V poglavju 4 so prikazani merilni rezultati in njih komentarji. Pri eksperimentalni analizi je poudarek na preprečevanju širjenja pulzacij toka vode od generatorja tokovnih pulzacij nazaj k črpalci, saj želimo, da je naš preizkusni merilni sistem čim bolj zanesljiv, torej pulzacije toka tekočine ne smejo vplivati na delovanje same črpalke, ki deluje pri stalni vrtilni frekvenci, in obratno.

## ■ 2 Fizikalno-matematični model generatorja tokovnih pulzacij

Fizikalno-matematični model generatorja tokovnih pulzacij je postavljen ob predpostavki nestisljivosti toka tekočine ter stacionarnih tokovnih razmer, ki ne upoštevajo resonančnih vplivov tekočinskega sistema. Pri nepovračljivih tlačnih izgubah v pretočnem sistemu obeh vej generatorja pulzacij, glej *sliko 1*, so upoštevane le lokalne tlačne izgube na vgrajenih ventilih (te so privzete kot konstantne vrednosti, neodvisne

od pretoka, kar velja pri velikih Reynoldsovih številih), ki so predpostavljene kot mnogo večje od ostalih lokalnih in linijskih izgub. Notranji premer obeh vej generatorja tokovnih pulzacij je enak, generator tokovnih pulzacij pa je v horizontalni ravnini.

Cevni sistem, ki predstavlja načrtovani generator tokovnih pulzacij, sestavljata dve vzporedno vezani cevi. Pri določitvi tokovnih razmer v vzporednih ceveh generatorja pulzacij upoštevamo, da so mehanske izgube za vsako posamezno cev enake, kjer lahko zakon ohranitve energije zapišemo tudi v obliki izraza za nepovračljive tlačne izgube turbulentnega toka v posamezni veji generatorja [6]:

$$\Delta p_{AB} = q_m^2 K_{ostale} + q_{m1}^2 K_1 + q_{m2}^2 K_2 \quad (1)$$

kjer konstanta upora tekočine  $K$  združuje nepovračljive tlačne izgube. Upoštevamo tudi zakon ohranitve mase, po katerem je skupni masni tok enak vsoti tokov v posameznih vejah:

$$q_m = q_{m1} + q_{m2} \quad (2)$$

Iz enačbe (1) sledi, da lahko kontinuitetno enačbo (2) za generator tokovnih pulzacij zapišemo kot:

$$q_m = q_{m2} \left( \sqrt{\frac{K_2}{K_1} + 1} \right) \quad (3)$$

Tlačne izgube na generatorju tokovnih pulzacij (1) lahko s pomočjo enačbe (3) tako zapišemo v končni obliki:

$$\Delta p_{AB} = q_m^2 K_{AB} \quad (4)$$

kjer je  $K_{AB}$  konstanta upora tekočine med točko A in B:

$$K_{AB} = K_{ostale} + \frac{K_2}{\left( \sqrt{\frac{K_2}{K_1} + 1} \right)^2} \quad (5)$$

Pri tem ventil  $K_2$  v obtočni veji predstavlja konstantno lokalno oviro, vrednost konstante upora tekočine  $K_1$  v glavni veji pa se spreminja glede na

stanje ventila. Enačba (5) tako velja za primer, ko je ventil v glavni veji odprt, medtem ko se izraz v primeru, ko je ventil v glavni veji zaprt ( $K_1 = \infty$ ), preoblikuje v naslednjega:

$$K_{AB} = K_{ostale} + K_2 \quad (6)$$

Če kot idealni primer predpostavimo generiranje majhnih relativnih sprememb pretoka vode, je tlačni padec na črpalci  $\Delta p_c$  med pulzacijami ves čas konstanten:

$$\Delta p_c = q_{m,o}^2 K_{AB,o} = q_{m,z}^2 K_{AB,z} \quad (7)$$

kjer sta  $Q_{AB,o}$  in  $K_{AB,o}$  masni pretok in konstanta upora tekočine v primeru, ko je ventil v glavni veji odprt, ter  $Q_{AB,z}$  in  $K_{AB,z}$  ko je zaprt. Iz te enačbe dobimo razmerje največjega in najmanjšega generiranega pretoka:

$$\frac{q_{m,o}}{q_{m,z}} = \sqrt{\frac{K_{AB,z}}{K_{AB,o}}} \quad (8)$$

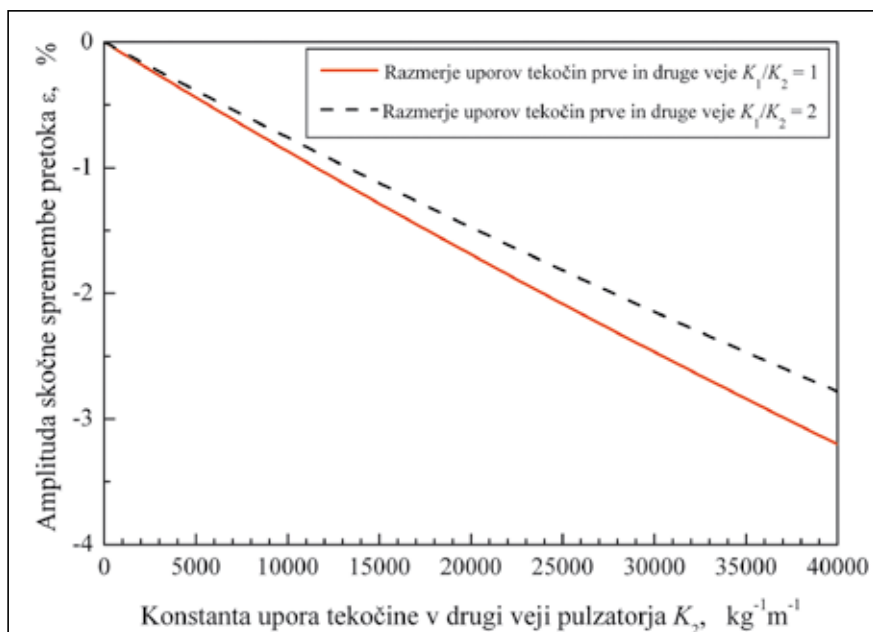
Relativno amplitudo spreminjanja pretoka glede na povprečno vrednost  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = \frac{A_{q_m}}{\bar{q}_m} = \left( \frac{q_{m,o}/q_{m,z} - 1}{q_{m,o}/q_{m,z} + 1} \right) \quad (9)$$

ki jo lahko ustvarimo z zaprtjem ventila  $K_1$  v glavni veji, lahko zapišemo v odvisnosti od velikosti konstante upora tekočine v obtočni veji  $K_2$  ter razmerja konstant upora tekočine obeh vej  $K_1/K_2$  generatorja tokovnih pulzacij. Relativna amplituda spreminjanja pretoka  $\varepsilon$  velja za skočne spremembe v tokovnih razmerah, ki nastopijo v podresonančnem območju generiranja tokovnih pulzacij.

Na *sliki 2*, kjer so predstavljeni rezultati matematične analize pulzatorja, vidimo, da lahko z večjim razmerjem upora tekočine obeh vej  $K_1/K_2$  dosežemo manjše relativne amplitude skočne spremembe pretoka. Pri tem smo lokalne in linijske tlačne izgube pred generatorjem pulzacij  $K_{ostale}$  ocenili glede na dejanske tlačne izgube v merilni progi, ki je predstavljena v poglavju 3.

Rezultati matematičnega modela kažejo, da če želimo z odpiranjem



Slika 2. Rezultati matematične analize pulzatorja vode ( $K_{ostale} = 2,094 \cdot 10^5 \text{ kg}^{-1}\text{m}^{-1}$ )

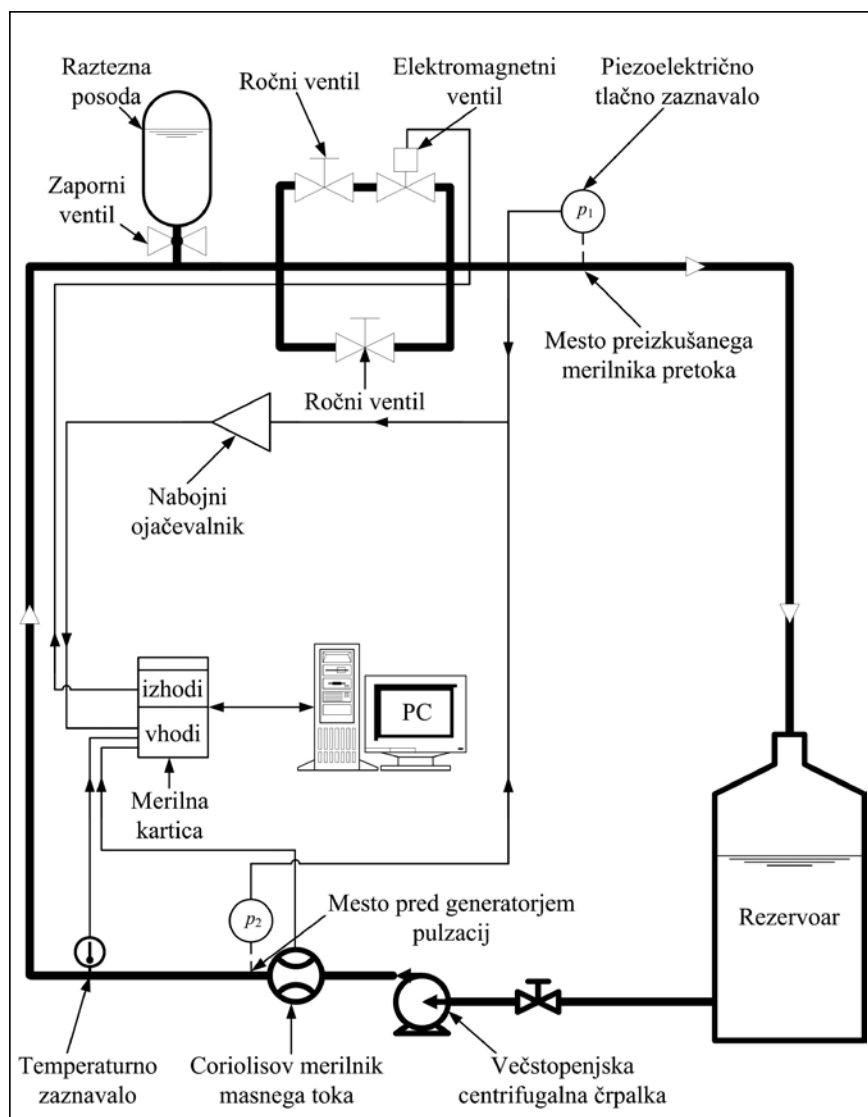
ventila v glavni veji ustvarjati majhne amplitude pulzacij pretoka tekočine, je potrebno v primeru, ko so tlačne izgube v merilni progi pred generatorjem tokovnih pulzacij  $K_{ostale}$  zanemarljive, v glavni veji v trenutku, ko je ventil v odprt, ustvariti veliko večje dušenje toka vode kot v obtočni veji. V dejanskem primeru, kjer tlačne izgube v merilni progi pred generatorjem pulzacij  $K_{ostale}$  niso zanemarljive, pa moramo, če želimo ustvariti amplitude pulzacij vrednosti le nekaj odstotkov začetnega pretoka vode, v obeh ceveh generatorja pulzacij ustvariti dovolj veliko dušenje. To smo pri dejanski izvedbi generatorja tokovnih pulzacij, ki je predstavljena v poglavju 3, dosegli z vgradnjo dodatnega ventila v glavno vejo, katerega priprtje omogoča povečanje konstante upora tekočine v primeru, ko je ventil v tej veji odprt. Na ta način lahko le s pripiranjem ventila v obtočni veji (skoraj) linearno nastavljamo amplitudo pulzacij toka vode, vrednosti nekaj odstotkov povprečnega pretoka, kot kažejo rezultati matematičnega modela, ki so prikazani na sliki 2.

### ■ 3 Merilni sistem

Z namenom eksperimentalnega proučevanja dinamičnih lastnosti merilnikov pretoka smo nadgradili merilno progo s tokom vode v LMPS na Fakulteti za strojništvo v Ljubljani,

ki je bila predstavljena že v [7, 8]. V merilno progo smo vgradili generator tokovnih pulzacij, katerega fizikalno-matematični model je predstavljen v prejšnjem poglavju. Shema nadgrajene merilne proge je prikazana na sliki 3.

Tok vode skozi merilno progo zagotavlja centrifugalna črpalka (Grundfos, CRN4-120). Časovno povprečno referenčno vrednost masnega toka meri Coriolisov merilnik masnega toka (Foxboro, CFS 10). Meri se tudi temperatura vode, ki se upošteva pri določanju njene gostote. Tlačne pulzacije na mestu kasnejše vgradnje preizkušane merilnika pretoka in v delu merilne proge pred generatorjem pulzacij (na mestu vgradnje Coriolisovega merilnika masnega toka) merimo s piezoelektričnim tlačnim zaznavalom Kistler (tip 7261, merilno

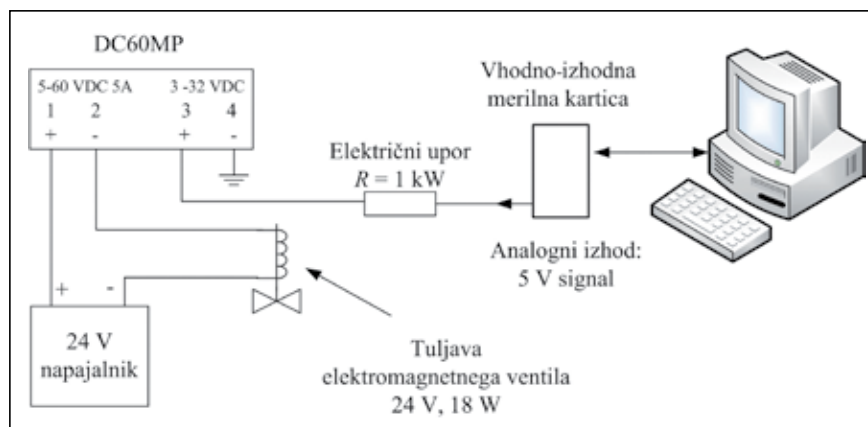


Slika 3. Shema merilne proge

območje:  $-1$  do  $10$  bar, nelinearnost manjša od  $0,3\%$  merilnega razpona, občutljivost  $2160$  pC/bar), ki je vezan z nabojnim ojačevalnikom Kistler (tip 5007, izhodno območje  $\pm 10$  V, nelinearnost manjša od  $0,05\%$  merilnega razpona, nizkopasovni filter  $180$  kHz, tri nastavitve časovnih konstant). Vsi merilniki imajo električne izhodne signale in so povezani na vhodno-izhodno merilno kartico (National Instruments, PCI-6031E). Preko merilne kartice se z električnimi signali nadzorujeta tudi vrtilna frekvenca črpalke in elektromagnetni ventil, ki je predstavljen v nadaljevanju. Nadzorni program merilnega sistema je izdelan v programskem okolju LabVIEW.

Vgrajeni generator tokovnih pulzacij sestavljata obtočna in glavna veja z elektromagnetnim ventilom (Jakša, tip 340747). Poleg elektromagnetnega ventila sta v primarno in sekundarno vejo vgrajena še ročna ventila, s katerima nastavljamo intenzivnost pulzacij. Pri nadzoru elektromagnetnega ventila je pomembna sposobnost doseganja čim višjih frekvenc preklapljanja, kar je omogočeno z uporabo polprevodniškega releja, ki je vgrajen med ventilom in merilno kartico, kot je prikazano na *sliki 4*. Polprevodniški releji se po funkciji delovanja sicer ne razlikujejo od klasičnih elektromagnetnih relejev. Njihova prednost pa je, da za delovanje potrebujejo nizkonapetostne logične signale velikosti  $1$  V. To je pomembna lastnost, saj lahko na analognem izhodu na merilni kartici generiramo napetosti vrednosti največ  $\pm 10$  V, največji dovoljeni električni tok pa ne sme presehati  $5$  mA. Glede na lastnosti krmiljenega elektromagnetnega ventila, ki za delovanje potrebuje  $24$  V enosmerne napetosti in porabi  $18$  W moči, smo izbrali primeren polprevodniški rele (Opto 22, tip DC60MP), s katerim lahko preklapljammo električni tok vrednosti  $0,75$  A.

Da bi preprečili širjenje tokovnih pulzacij od generatorja tokovnih pulzacij proti referenčnemu Coriolisovemu merilniku masnega toka ter črpalke, je pred generatorjem pulzacij vgrajena raztezna posoda Varem (tip Extravarem LC, prostornina  $12$  l, najvišji



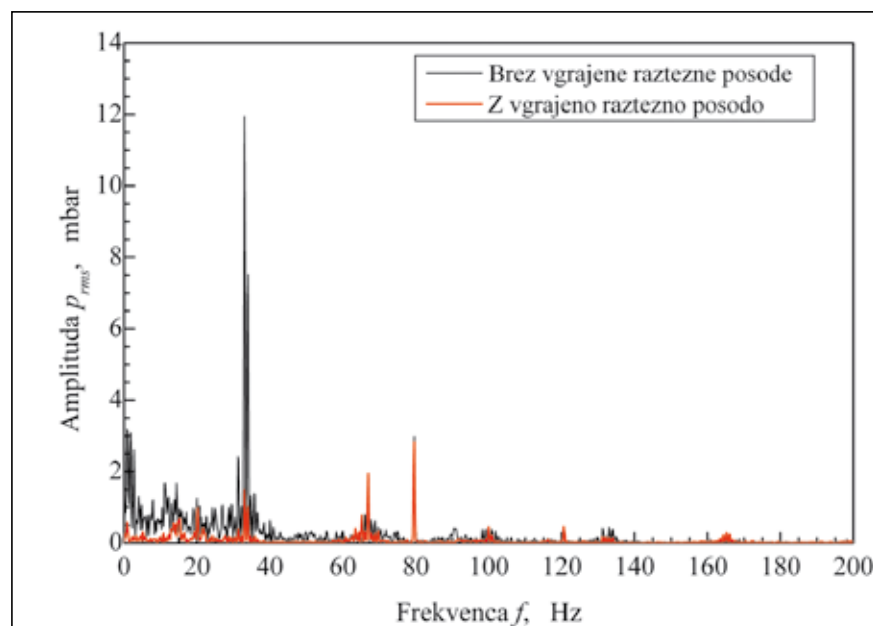
Slika 4. Shema krmiljenja polprevodniškega releja

tlak  $8$  bar). Raztezna posoda ima v dovodu vgrajen zaporni ventil, ki omogoča ločeno izvajanje meritev v primeru, ko ni vpliva delovanja raztezne posode (zaprt dovodni ventil), in v primeru, ko raztezna posoda vpliva na blaženje pulzacij toka tekočine v merilni progi (odprt dovodni ventil).

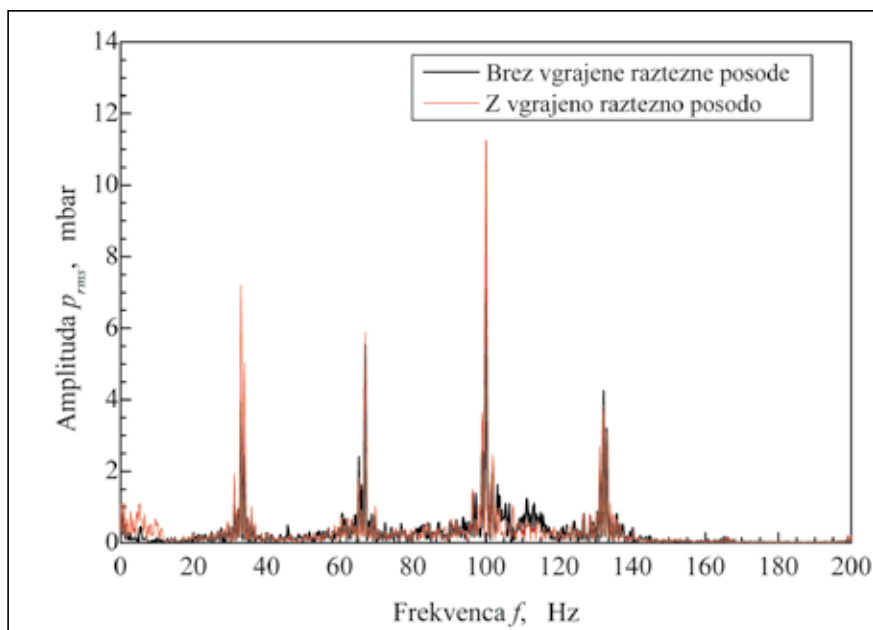
#### ■ 4 Rezultati eksperimentalne analize

Po vgradnji generatorja tokovnih pulzacij smo pri najvišji frekvenci generiranih tlačnih pulzacij, ki jih pri masnem pretoku vode  $q_m = 2000$  kg/h in relativni amplitudi pulzacij  $= 0,1$  omogoča generator pulzacij, izmerili vpliv raztezne posode, s katero želimo blažiti vpliv tokovnih pulzacij na referenčni Coriolisov merilnik

pretoka in glavno črpalko. Pri tem smo amplitudo pulzacij toka ocenili z merjenjem pretoka v stacionarnih tokovnih razmerah, in sicer ko je bil elektromagnetni ventil zaprt (brez dovoda električnega napajanja) in ko je bil ta odprt pri nespreminjajočih se nastavitvah upora tekočine ostalih dveh ročnih ventilov. Največja frekvenca pulzacij toka vode, ki smo jo v merilni progi dosegli z razvitim generatorjem pulzacij toka vode, je vrednosti  $33$  Hz. Pri višjih frekvencah preklapljanja elektromagnetni ventil namreč ni več deloval pravilno. Predhodno smo delovanje releja, ki je preklapljal ventil, testirali brez priklopljenega bremena na izhodnih sponkah ter dosegli frekvenco vrednosti  $400$  Hz. Izkaže se, da je zgradba elektromagnetnega ventila tista, ki omejuje de-



Slika 5. Amplitudno frekvenčni spekter v merilni progi na mestu pred generatorjem pulzacij



**Slika 6.** Amplitudno frekvenčni spekter na mestu kasnejše vgradnje merilnika pretoka

lovanje generatorja pulzacij. Sliki 5 in 6 predstavljata amplitudno frekvenčni diagrama na mestu kasnejše vgradnje preizkušane merilnika pretoka in v delu merilne proge pred generatorjem pulzacij v primeru brez vpliva in z vplivom vgrajene raztezne posode.

Amplitudno frekvenčni spekter na mestu vgradnje referenčnega Coriolisovega merilnika pretoka, ki ga predstavlja *slika 5*, potrjuje, da z vgradnjo raztezne posode močno ublažimo tokovno pulzacijo, ki jo generiramo z generatorjem pulzacij ( $f_p = 33$  Hz). Prav tako je zmanjšana amplituda harmonikov te frekvence (v primerjavi z mestom kasnejše vgradnje preizkušane merilnika pretoka), saj je na sliki viden le drugi harmonik frekvence pulzacij. Edina frekvenčna komponenta, ki se ohrani na mestu v merilni progi, je tlačna pulzacija pri frekvenci 80 Hz. Ker je tudi po podatkih izdelovalca kritično območje zunanjih mehanskih nihanj za merilnik pretoka Foxboro CFS 10 med 40 in 100 Hz, lahko potrdimo, da je omenjena komponenta tlačnih pulzacij posledica nihanja merilne cevi omenjenega Coriolisovega merilnika pretoka (ta je vgrajen pred mestom vgradnje raztezne posode, kjer posoda ne blaži vpliva pulzacij). Ta frekvenčna komponenta ostaja enaka za različne pretoke, saj se delovna lastna frekvenca Coriolisovega merilni-

ka ne spreminja bistveno s pretokom tekočine (odvisna je le od gostote tekočine, ki pa je bila v našem primeru konstantna).

Iz frekvenčne slike na mestu kasnejše vgradnje merilnika pretoka, ki jo prikazuje *slika 6*, opazimo, da se ta v primeru delovanja raztezne posode bistveno ne spremeni. Iz amplitudno frekvenčnega spektra opazimo, da v obeh primerih v merilnem sistemu nastopi značilna frekvenca pri 33 Hz, ki je frekvenca generirane pulzacije toka vode, pri 66 Hz, 99 Hz in 132 Hz pa nastopijo harmoniki te frekvence,  $f = i \cdot f_p$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ). Nekatere frekvenčne komponente se pri delovanju raztezne posode celo ojačajo. Raztezna posoda namreč deluje kot oscilator, zato se v primeru, ko tokovne pulzacije sovpadajo z lastno frekvenco zračne komore, njihova amplituda ojača. Ker pa so ojačane tokovne pulzacije (lastna frekvenca same posode je velikostnega reda 1 Hz [9]) še vedno na ravni šuma, vgrajena raztezna posoda predstavlja pomembno izboljšanje našega merilnega preizkuševališča.

## ■ 5 Sklepi

V prispevku je prikazan fizikalno-matematični model generatorja tokovnih pulzacij, katerega mehansko izvedbo z dodatno vgrajeno raztezno

posodo smo vgradili v hidravlično merilno progo (z vodo) v LMPŠ na Fakulteti za strojništvo v Ljubljani. Eksperimentalna analiza je potrdila uporabnost omenjenega generatorja pulzacij, saj ta omogoča generiranje ponovljivih tokovnih pulzacij z definiranimi lastnostmi. Generator tokovnih pulzacij vode, ki ga sestavlja obtočna in glavna veja z elektromagnetnim ventilom, nam omogoča generiranje tokovnih pulzacij frekvence do 40 Hz. V dosedanjih raziskavah na področju razvoja generatorja tokovnih pulzacij se je izkazalo izredno zahtevno doseganje visokih frekvenc pulzacij toka vode [10, 11, 12], kar je tudi največja omejitev razvitega generatorja tokovnih pulzacij, katerega omejenost doseganja visokih frekvenc pulzacij je posledica predvsem omejenega dinamičnega odziva uporabljenega elektromagnetnega ventila.

Kot velik problem pri merilnih sistemih za proučevanje vpliva generiranih pulzacij toka tekočine na merilnike pretoka se je izkazalo tudi generiranje konstantnega povprečnega pretoka. Naloga črpalke v takšnih merilnih sistemih je namreč generirati kar se da konstanten povprečni pretok, ki so mu v merilnem sistemu dodane pulzacije, generirane z vgrajenim generatorjem pulzacij. Črpalke pa so v splošnem zelo občutljive na pulzacije, ki se širijo vzdolž cevovoda v obe smeri glede na vgrajeni generator pulzacij. Z opisanim generatorjem tokovnih pulzacij pa smo izboljšali delovanje črpalke, saj smo z vgrajenim blažilnikom pulzacij izničili njihov vpliv na samo delovanje črpalke. Prav tako je v takšnih sistemih pomembno zmanjšati vpliv pulzacij, ki jih s svojim delovanjem generira sama črpalka. Tipične frekvence tokovnih pulzacij, ki jih generirajo različni tipi črpalke, so vrednosti do 300 Hz [13], kar pomeni, da jih je možno z uporabo raztezne posode, ki deluje kot nizkopasovni filter, močno zmanjšati. S tem smo postavili zanesljiv preizkusni sistem, ki omogoča tudi zmanjšanje vpliva nezaželenih frekvenčnih komponent, ki se pogosto pojavijo v takšnih merilnih sistemih.

Kljub vgrajeni raztezni posodi, ki delno blaži tokovne pulzacije na mestu vgradnje merilnika pretoka, pa bi bilo smotrno še dodatno zmanjšati efektivno dolžino tekočinskega sistema na tem delu merilne proge. Dodatno zmanjšanje efektivne dolžine tekočinskega sistema bi dosegli z vgradnjo dodatne raztezne posode, ki deluje kot delno odbojna točka pulzacij, v merilni sistem za načrtovanim mestom vgradnje merilnika pretoka. S tem bi se izognili vplivu resonance tekočinskega sistema na velikost generiranih pulzacij, saj se ta z zmanjšanjem efektivne dolžine tekočinskega sistema zviša.

## Literatura

- [1] Wylie, E. B., Streeter, V. L.: *Fluid transients*, McGraw-Hill Inc, New York, 1978.
- [2] Douglas, J. F., Gasiorek, J. M., Swaffield, J. A.: *Fluid Mechanics, 3th Edition*, Longman Scientific & Technical, London, 1995.
- [3] Mottram, R. C.: An overview of pulsating flow measurement, *Flow Measurement and Instrumentation*, 3(3), 1992, str. 114–117.
- [4] Standard ISO/TR 3313: *Measurement of fluid flow in closed conduits – Guidelines on the effects of flow pulsations on flow-measurement instruments*, 2003.
- [5] Sambol, P.: *Statične in dinamične značilnice hidravličnega Wheatstonovega mostiča*, diplomska naloga visokošolskega študija (mentor I. Bajsič), št. 1819, Fakulteta za strojništvo, Ljubljana, 2010.
- [6] Škerget, L.: *Mehanika tekočin*, Tehniška fakulteta v Mariboru in Fakulteta za strojništvo, Ljubljana, 1994.
- [7] Svete, A., Kutin, J., Bajsič, I.: Merilne značilnice hidravličnega Wheatstonovega mostiča, *Ventil*, 2008, 14(6), str. 566–572.
- [8] Svete, A., Kutin, J., Bajsič, I.: Static and dynamic characteristics of a hydraulic Wheatstone bridge mass flowmeter, *Flow Measurement and Instrumentation*, 20(6), 2009, str. 264–270.
- [9] Naudascher, E.: *Hydrodynamic forces*, A. A. Balkema, Rotterdam, 1991.
- [10] Cheesewright, R., Clark, C., Bisset, D.: The identification of external factors which influence the calibration of Coriolis mass-flow meters, *Flow Measurement and Instrumentation*, 17(1), 2000, str. 1–10.
- [11] Vetter, G., Notzon, S.: Effect of pulsating flow on Coriolis mass flowmeters, *Flow Measurement and Instrumentation*, 5(4), 1994, str. 263–273.
- [12] Lee, B., Cheesewright, R., Clark, C.: The dynamic response of small turbine flowmeters in liquid flows, *Flow Measurement and Instrumentation*, 15(5–6), 2004, str. 239–248.
- [13] Koudal, O., Brunner, M., Wenger, A., Sorokin, S. V.: High frequency Coriolis meter performance under pulsating flow conditions, *poročilo FLOMEKO'98*, Lund, Švedska, junij 1998, str. 239–242.

## Development of a Liquid-Flow Pulsator

**Abstract:** The continuously increasing demand for more accurate flow measurements is the reason why the study of the effects of pulsating flow conditions is becoming crucial for the further development of flowmeters. This paper presents the development of an experimental test facility with an integrated water-flow pulsator, which is able to generate reproducible flow pulsations with defined properties, such as the frequency and the amplitude of the pulsating flow. The flow pulsator consists of two parallel conduits with the switching valve integrated into the main conduit. The mechanical implementation of the measurement system with the built-in pulsator was carried out with the help of mathematical modelling of the entire test system. The properties of the modelled pulsator and the impact of the expansion chamber on the generated flow-pulsation damping are experimentally verified by a spectral analysis of the generated flow pulsations.

**Keywords:** flow pulsator, pulsation frequency, pulsation amplitude, pressure loss, electromagnetic valve, frequency spectrum

Univerza v Ljubljani  
Fakulteta za strojništvo

