

# DOLOČANJE STATIČNIH OBČUTLJIVOSTI HITRO ODZIVNIH MERILNIH SISTEMOV ZA TLAK

Andrej Svete, Urh Planko, Jože Kutin

## Izveček:

V prispevku sta predstavljeni dinamična in kvazistatična metoda določanja statične občutljivosti hitro odzivnega piezoelektričnega merilnega sistema za tlak. Z namenom vzpostavitve sledljivosti merjenja časovno spreminjajočega se tlaka do SI-enot je bila v Laboratoriju za meritve v procesnem strojništvu (LMPS) razvita brezmembranska udarna cev. Izvedli smo meritve statične občutljivosti preizkušane piezoelektričnega merilnega sistema za tlak z dinamično metodo umerjanja in uporabo udarne cevi ter s kvazistatično metodo umerjanja. Na podlagi primerjave rezultatov ter njunih merilnih zmogljivosti smo v prispevku preverili ustreznost določanja statičnih značilnic z obema metodama.

## Ključne besede:

meroslovje tlaka, časovno spreminjajoči se tlak, piezoelektrični merilni sistem, udarna cev, kvazistatična metoda umerjanja

## 1 Uvod

S tehnološkim napredkom v zadnjih nekaj desetletjih tehnični procesi postajajo vse hitrejši, s čimer se večajo tudi zahteve po zanesljivem in točnem merjenju časovno spreminjajočega se tlaka v številnih industrijskih panogah, kot so npr. avtomobilska industrija, kjer se merijo tlačne spremembe v motorjih z notranjim zgorevanjem in v sprožilnih sistemih varnostnih tlačnih blazin, pri razvoju parnih in plinskih turbin, pri vbrizgavanju polimerov in tlačnem litju ter v medicini [1]. Kljub zahtevam po uporabi merilnikov tlaka z ustreznimi dinamičnimi lastnostmi se za merjenje časovno spreminjajočega se tlaka večinoma uporabljajo tlačna zaznavala, ki so zaradi zagotavljanja meroslovne sledljivosti umerjena kvazistatično. Kvazistatično umerjanje je pomembna metoda, s katero se določajo statične občutljivosti hitro odzivnih merilnih sistemov za tlak (MST) [2]. Ker pa se statične značilnice merilnikov tlaka močno razlikujejo od njihovih dinamičnih značilnic, se razvijajo številni generatorji tlačnih sprememb, ki bi lahko zagotavljali dinamično umerjanje takšnih merilnikov. V splošnem jih delimo na generatorje periodičnih in neperiodičnih tlačnih sprememb [3]. Pri tem generatorji neperiodičnih tlačnih sprememb pokrivajo relativno široko področje uporabe merilnikov tlaka, saj so zmožni generirati zelo nizke kot tudi najvišje amplitude tlaka v zelo širokem fre-

kvenčnem območju, pri čemer razpon generiranih amplitud sega od približno 0,1 kPa do 10000 kPa v frekvenčnem območju od nekaj hertzov do enega megahertza.

Izmed vseh trenutno razvitih generatorjev je udarna cev edini znani generator tlačnih sprememb, ki je zmožen zagotavljati meroslovno sledljivost dinamičnega umerjanja merilnikov tlaka do mednarodnega sistema merskih enot (SI), saj se časovno spreminjajoči se tlak pri umerjanju realizira preko osnovnih fizikalnih veličin. Udarna cev je v splošnem sestavljena iz dveh delov, in sicer visokotlačnega in nizkotlačnega dela cevi enakih prečnih prereзов, ki ju v konvencionalnih udarnih ceveh ločuje membrana. Hipno odprtje povezave med tema dvema deloma generira udarni val, ki potuje skozi nizkotlačni del. Odboj udarne fronte od končne stene nizkotlačnega dela, v katero je nameščen merilnik tlaka, ki ga dinamično umerjamo, povzroči hitro skočno spremembo tlaka. Ob predpostavki kalorično popolnega plina in adiabatnega toka lahko amplitudo skočne spremembe tlaka določimo iz sledljivih meritev hitrosti udarnega vala  $V$ , začetnega stacionarnega absolutnega tlaka  $p_1$  in temperature  $T_1$  plina v nizkotlačnem delu kot [4,5]:

$$\Delta p = 2p_1 \frac{\gamma_1}{(\gamma_1 - 1)} (M^2 - 1) \left( \frac{M^2 (3\gamma_1 - 1) + 3 - \gamma_1}{M^2 + \frac{2}{(\gamma_1 - 1)}} \right) \quad (1)$$

kjer so  $\gamma_1$  adiabatni indeks,  $M = V/a_1$  Machovo število udarnega vala,  $a_1 = \sqrt{\gamma_1 R_1 T_1}$  hitrost zvoka in  $R_1$  spe-

Doc. dr. Andrej Svete, univ. dipl. inž., Urh Planko,  
izr. prof. dr. Jože Kutin, univ. dipl. inž., vsi Uni-  
verza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo

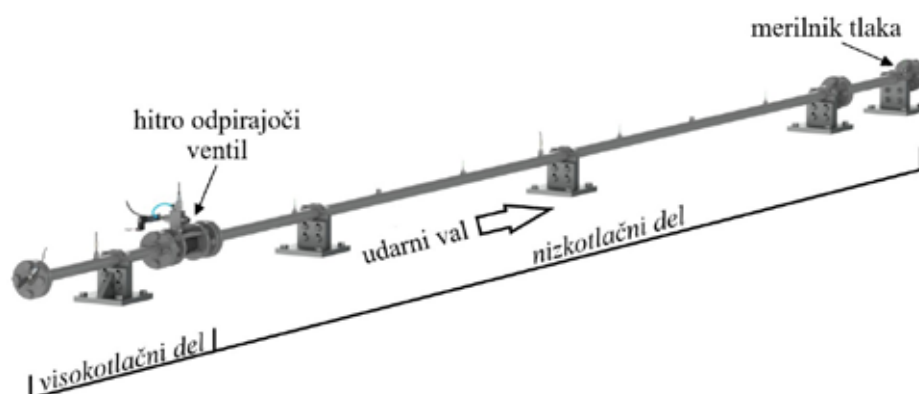
cifična plinska konstanta. Po odboju udarnega vala od končne stene nizkotlačnega dela udarne cevi je tlak na končni steni nizkotlačnega dela udarne cevi konstanten vse do prihoda naslednjega udarnega vala, ki je posledica delnega odboja prvotnega udarnega vala od kontaktne površine med visokoin nizkotlačnim plinom. Izjemno hiter porast tlaka (reda 1 ns [6]) lahko vzbudi frekvence nihanja tlaka reda enega megahertza, pri čemer je spodnja meja vzbujenih frekvenc sorazmerna z recipročno vrednostjo časovne periode, med katero je tlak plina po odboju od končne stene konstanten.

V konvencionalnih udarnih ceveh se udarni valovi generirajo s pretrganjem membrane, kar se ponavadi povzroči s poviševanjem tlaka v visokotlačnem delu udarne cevi. Lastnosti materiala membrane in njeno obnašanje med pretrganjem močno vplivajo na lastnosti generiranega udarnega vala, kar povzroči velike negotovosti, povezane s ponovljivostjo generirane tlačne skočne spremembe. Velika slabost membranske izvedbe udarne cevi je tudi ta, da je potrebno po vsakem preizkusu membrano zamenjati, pri čemer je potrebno celotno udarno cev razstaviti in nato ponovno sestaviti, kar vpliva na obnovljivost generirane tlačne skočne spremembe. Z namenom izboljšanja umerjevalne in merilne zmogljivosti dinamične metode umerjanja z udarno cevjo smo v Laboratoriju za meritve v procesnem strojništvu na Fakulteti za strojništvo Univerze v Ljubljani razvili brezmembransko udarno cev, v kateri membrano nadomešča hitro odpirajoči pnevmatski ventil [7–9].

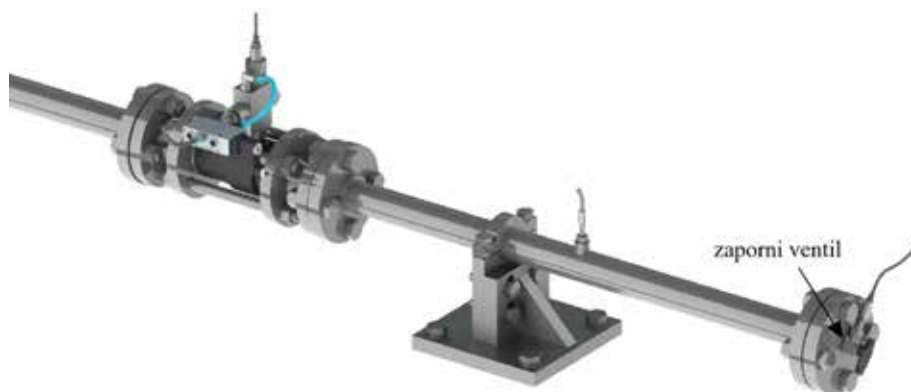
Namen tega prispevka je primerjati statične občutljivosti izbranega hitro odzivnega piezoelektričnega MST, določene z dinamično metodo umerjanja in uporabo razvite brezmembranske udarne cevi s statičnimi občutljivostmi, dobljenimi s kvazistatično metodo umerjanja in uporabo za ta namen razvitega sistema. V poglavju 2 sta predstavljena razvita brezmembranska udarna cev in merilni sistem za kvazistatično umerjanje MST. V poglavju 3 so prikazani in ovrednoteni rezultati primerjave dobljenih statičnih občutljivosti piezoelektričnega MST.

## 2 Brezmembranska udarna cev in merilni sistem za kvazistatično umerjanje MST

Razvita brezmembranska udarna cev s hitro odpirajočim pnevmatskim ventilom je prikazana na *sliki 1*. Cevi visokotlačnega dela dolžine 1 m in nizkotlačnega dela dolžine 6,82 m, z notranjim premerom 40 mm in debelino stene 7,5 mm sta izdelani iz nerjavečega jekla. Da bi se izognili nepravilnostim na stičiščih med cevema in ventilom, ki bi lahko generirale sekundarne udarne valove, sta cevi privijačeni na pnevmatski ventil enakega učinkovitega pretočnega premera. Vgrajeni hitro odpirajoči pnevmatski ventil (Ista Pneumatics, KB-40-70) omogoča tlake v visokotlačnem delu cevi do 10 MPa. Udarna cev je po dolžini togo pritrjena s petimi masivnimi pritrdilnimi stojali za zmanjšanje vpliva vibracij, ki nastanejo pri odpiranju pnevmatskega ventila in pri gibanju udarnih valov. Za določitev amplitud tlačnih skokov z merilnim modelom udarne cevi (1) začetni tlak okolice v nizkotlačnem delu  $p_1$  merimo z merilnikom tlaka okolice (Mensor, CPR6000). Začetni stacionarni nadtlak v visokotlačnem delu  $p_{4,n}$  merimo s pretvornikom tlaka (Mensor, CPR6000), priključenim na zaporni ventil, ki je vgrajen v končno steno visokotlačnega dela. Zaporni ventil je namenjen tudi izpustu plina iz udarne cevi v okolico (glej *sliko 2*). Začetno temperaturo plina v nizkotlačnem delu  $T_1$  določamo z merjenjem temperature stene nizkotlačnega dela z uporovnim temperaturnim zaznavalom (TetraTec Instruments, WIT-S), vgrajenim na sredini dolžine nizkotlačnega dela. Temperaturno zaznavalo je povezano z digitalnim pretvornikom (Pico Technology, PT-104). Hitrost generiranega udarnega vala vzdolž nizkotlačnega dela udarne cevi določamo z merjenjem časovnih zamikov med prehodi udarne fronte, ki jih zaznavamo s petimi enakimi piezoelektričnimi tlačnimi zaznavali (Kistler, 603CAA), vgrajenimi v steni nizkotlačnega dela cevi. Izhodni signali vseh petih pretvornikov tlaka so zaporedno povezani na isti vhod nabojnega ojačevalnika (Kistler, 5018A). Dinamično preizkušani piezoelektrični MST je sestavljen iz piezoelektričnega tlačnega zaznavala (Kistler, 603CAA), ki je vgra-



**Slika 1** : Shematski prikaz razvite brezmembranske udarne cevi



Slika 2 : Shematski prikaz visokotlačnega dela udarne cevi z zapornim ventilom

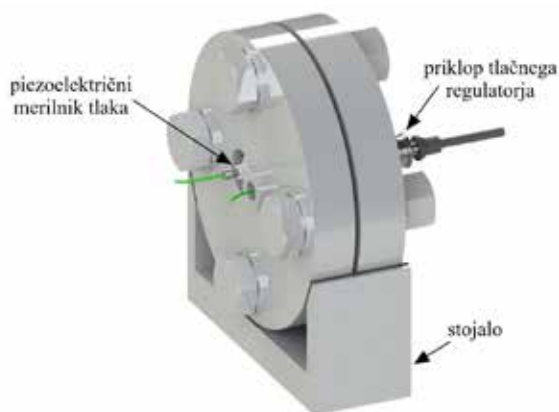
jen v končno steno nizekotlačnega dela udarne cevi, in nabojnega ojačevalnika (Kistler, 5018A). Napetostna izhoda iz nabojnih ojačevalnikov zajemamo z merilno kartico (National Instruments, NI 9775). Merilna kartica vključuje tudi digitalni izhodni modul, ki omogoča računalniško nadzorovano odpiranje in zapiranje hitro odpirajočega pnevmatskega ventila z uporabo analognega napetostnega signala, ki se prenaša na elektropnevmatski ventil. Zajem in obdelava signala ter aktiviranje odpiranja in zapiranja ventila so izvedeni v programskem okolju LabVIEW.

Razviti merilni sistem za kvazistatično umerjanje MST je prikazan na sliki 3. Da omogočimo najboljšo možno primerljivost med rezultati, pridobljenimi z dinamičnim umerjanjem z udarno cevjo in kvazistatičnim umerjanjem, smo želeli pri izgradnji sistema za kvazistatično umerjanje ohraniti kar največ komponent iz sistema udarne cevi. Sistema si tako delita isto prirobnico, v katero je vgrajen preizkušan piezoelektrični merilnik tlaka. Posebej za kvazistatično umerjanje pa je bila izdelana dodatna prirobnica, ki omogoča priklop tlačnega regulatorja in preko vijačnih spojev spojitve končne prirobnice nizkotlačnega dela udarne cevi z vgrajenim piezoelektričnim merilnikom tlaka. Ta je bila dimenzionirana

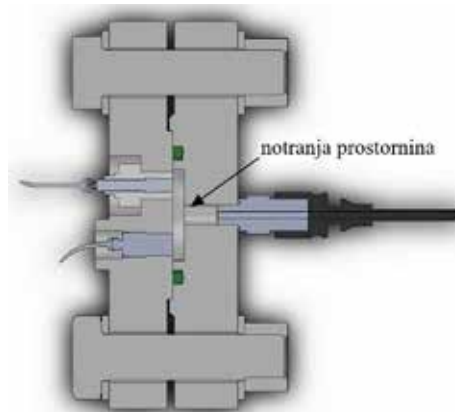
tako, da ima zaradi čim hitrejšega polnjenja in s tem generiranja čim hitrejših kvazistatičnih sprememb tlaka čim manjšo notranjo prostornino, hkrati pa še ohranja strukturno trdnost (glej sliko 4). Za sistem za kvazistatično umerjanje MST je bilo izdelano stojalo, ki omogoča stabilnost sistema med meritvami in hkrati zagotavlja prirobnici z vgrajnim preizkušanim merilnikom tlaka enak položaj kot v udarni cevi. Posebej izdelano stojalo ima na točkah stika s sistemom za kvazistatično umerjanje MST nameščen penast material, ki deluje protizdrsko.

### 3 Rezultati

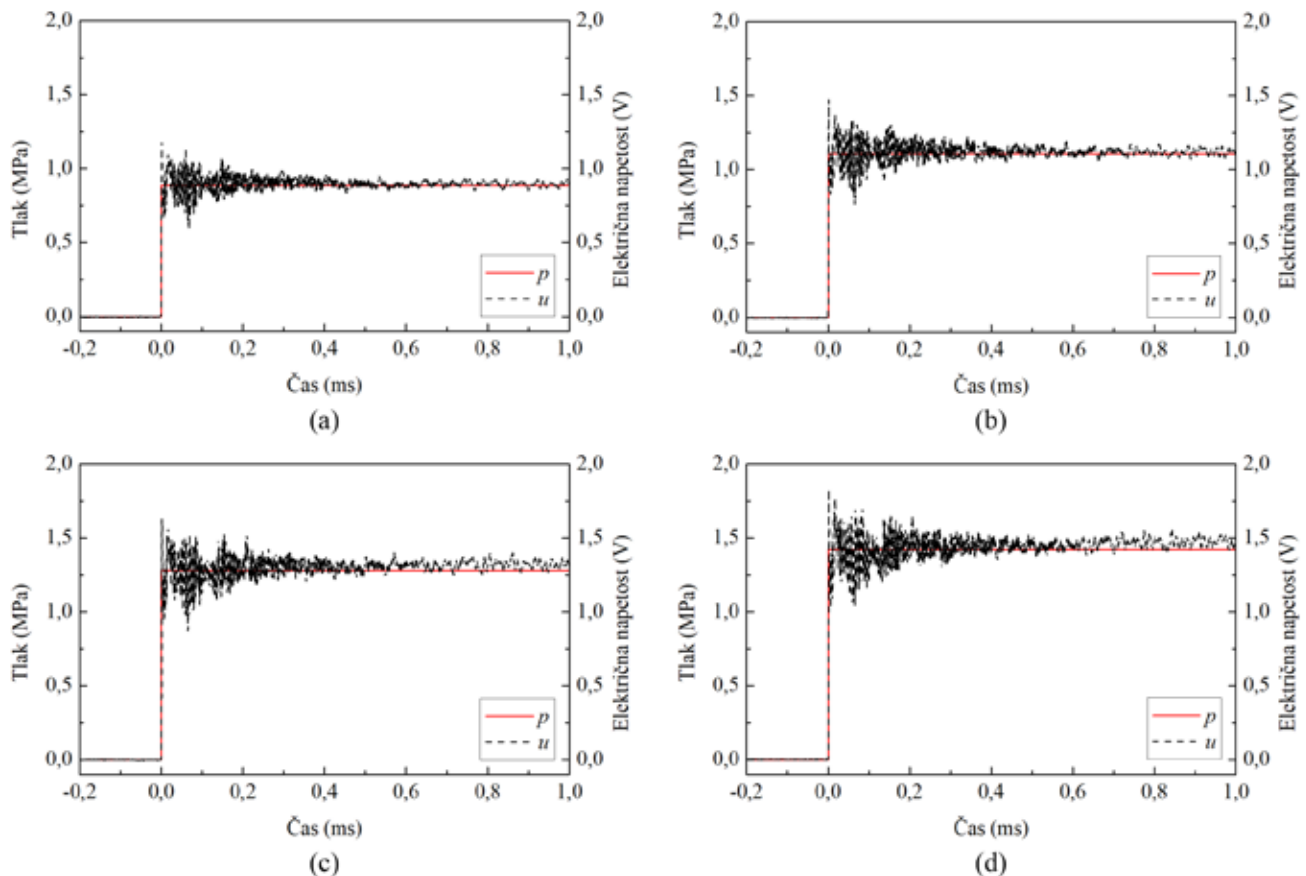
Meritve z udarno cevjo so bile izvedene z dušikom pri začetnih nadtlakih v visokotlačnem delu cevi od 4 MPa do 10 MPa po koraku 2 MPa in pri tlaku okolice v nizkotlačnem delu udarne cevi. Za določitev amplitud generiranih skočnih sprememb tlaka na končni steni nizkotlačnega dela, kjer je vgrajen dinamično preizkušan merilnik tlaka, s pomočjo merilnega modela udarne cevi (1) je bil pred odprtjem hitro odpirajočega pnevmatskega ventila izmerjen začetni absolutni tlak v nizkotlačnem delu  $p_1$  (tlak okolice) ter z merjenjem temperature stene nizkotlačnega dela določena začetna



Slika 3 : Razvit sistem za kvazistatično umerjanje MST



Slika 4 : Shematski prikaz prečnega prereza merilnega sistema za kvazistatično umerjanje MST



**Slika 5:** Generirana dinamična sprememba tlaka na končni steni nizkotlačnega dela udarne cevi in izmerjen izhodni napetostni signal piezoelektričnega MST: (a)  $p_{4,n} = 4$  MPa, (b)  $p_{4,n} = 6$  MPa, (c)  $p_{4,n} = 8$  MPa, (d)  $p_{4,n} = 10$  MPa

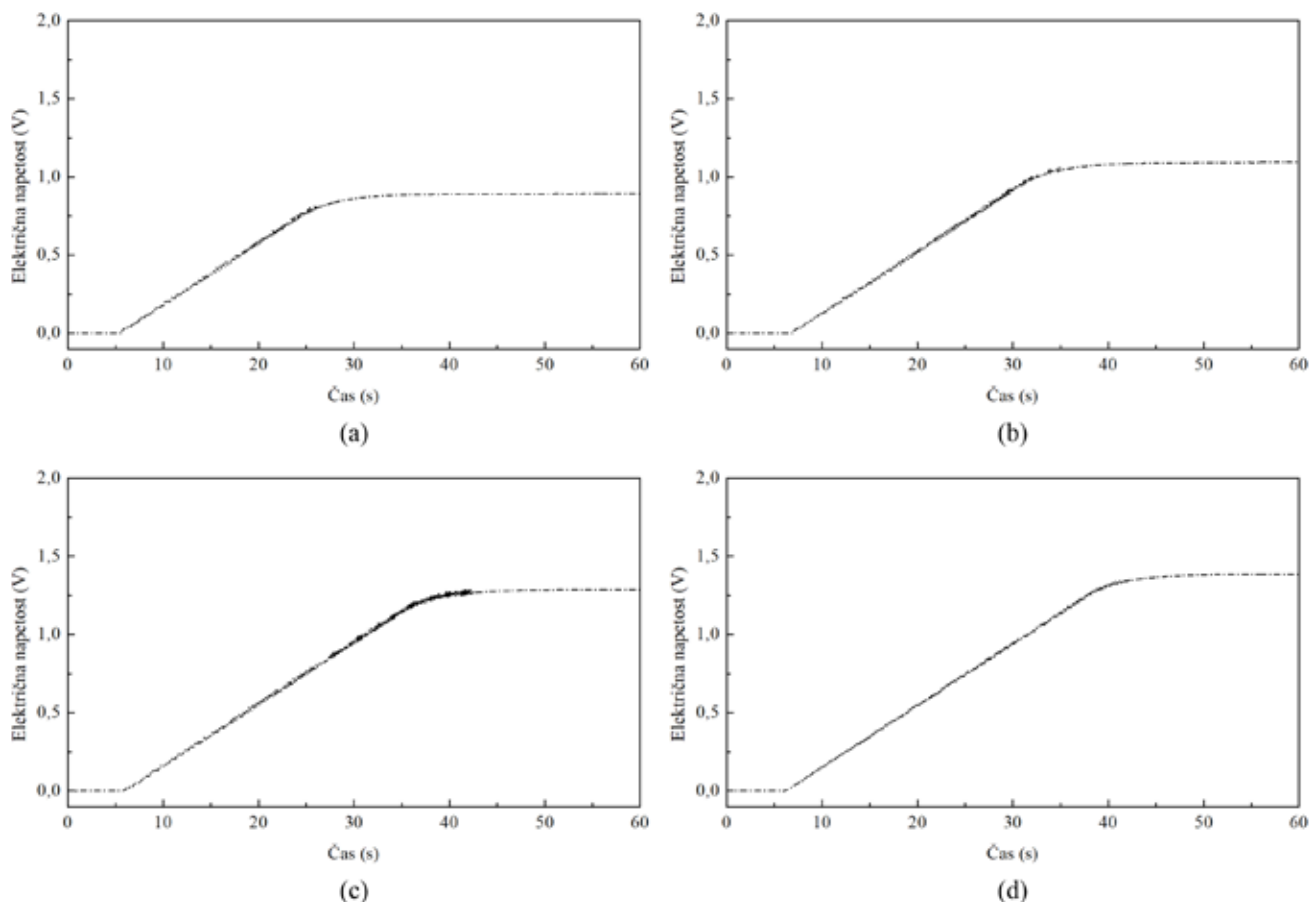
temperatura dušika v nizkotlačnem delu  $T_1$ , Adiabatični indeks  $\gamma_1$  in specifična plinska konstanta  $R_1$  dušika pod merilnimi pogoji sta bila pridobljena iz baze podatkov NIST REFPROP [10]. Hitrost udarne vala na končni steni  $V$  smo določili z uporabo metode časa letenja, pri čemer smo upoštevali čase, ko udarni val preide piezoelektrična tlačna zaznavala, vgrajena v steni vzdolž nizkotlačnega dela cevi, in njihove medsebojne oddaljenosti [7]. Slika 5 prikazuje izmerjene napetostne odzivne signale piezoelektričnega MST  $u$  in z merilnim modelom udarne cevi (1) določene tlačne signale, generirane na končni steni nizkotlačnega dela udarne cevi  $p$  pri štirih različnih začetnih tlakih v visokotlačnem delu cevi v intervalu od -0,2 ms do 1 ms, pri čemer je čas prihoda udarne fronte na končno steno nizkotlačnega dela udarne cevi nastavljen na  $t = 0$ . Iz rezultatov je razvidno, da amplituda generiranega tlačnega skoka na končni steni nizkotlačnega dela udarne cevi  $\Delta p$  naraste s približno 0,9 MPa na 1,4 MPa, ko povečamo začetni nadtlak v visokotlačnem delu cevi s 4 MPa na 10 MPa. Rezultati tudi kažejo, da odzivni signali piezoelektričnega MST dosežejo končno ustaljeno vrednost odziva na skočno spremembo tlaka v manj kot 1 ms po generirani tlačni spremembi za vse opazovane začetne tlake v visokotlačnem delu udarne cevi.

Za primerjavo rezultatov je bilo tudi kvazistatično umerjanje izvedeno pri generiranju kvazistatičnih sprememb tlaka enakih amplitud, in sicer 0,9 MPa, 1,1 MPa, 1,3 MPa in 1,4 MPa. Ker v primeru, ko je piezoelektrični merilnik izpostavljen kvazistatični spremembi, prihaja do odtekanja električnega naboja v nabojnem ojačevalniku, je potrebno za določitev statične občutljivosti piezoelektričnega MST izvesti korekcijo lezenja izhodnega napetostnega signala zaradi odtekanja naboja [11]. S tem namenom je bil v programskem okolju LabVIEW narejen program, ki iz petsekundnega odseka izmerjenega izhodnega napetostnega signala pred generirano kvazistatično spremembo tlaka, ko je merilnik izpostavljen konstantnemu tlaku okolice, določi naklon  $k_{\text{odtekanje}}$  ter začetno vrednost  $n$  lezenja signala zaradi odtekanja naboja, za kar smo uporabili LabVIEW podprogram Linear fit.vi. S pomočjo dobljenega  $k_{\text{odtekanje}}$  in  $n$  program določi korigiran izhodni napetostni signal kot:

$$u^*(t) = u(t) - (k_{\text{odtekanje}} t + n) \quad (2)$$

kjer je  $u(t)$  izmerjen izhodni napetostni signal piezoelektričnega MST.

Na sliki 6 so prikazani korigirani izhodni napetostni signali pri generiranju štirih različnih vrednosti am-



**Slika 6 :** Generirana kvazistatična sprememba tlaka in korigiran izhodni napetostni signal piezoelektričnega MST: (a)  $\Delta p = 0,9$  MPa, (b)  $\Delta p = 1,1$  MPa, (c)  $\Delta p = 1,3$  MPa, (d)  $\Delta p = 1,4$  MPa

plitud kvazistatične tlačne spremembe  $\Delta p$ , in sicer 0,9 MPa, 1,1 MPa, 1,3 MPa in 1,4 MPa. S slike je razvidno, da je čas, v katerem tlačni generator zgenerira tlačno spremembo, odvisen od njene amplitude. Tako za generiranje kvazistatične spremembe tlaka 0,9 MPa tlačni generator potrebuje približno 30 s, za generiranje kvazistatične spremembe tlaka 1,4 MPa pa približno 40 s.

Statična občutljivost piezoelektričnega MST je določena kot razmerje spremembe izhodnega napetostnega signala MST in amplitude generirane skočne spremembe tlaka:

$$K = \frac{\Delta u}{\Delta p} \tag{3}$$

Pri uporabi dinamične metode umerjanja smo spremembo napetostnega signala  $\Delta u$  določili kot razliko med povprečno vrednostjo ustaljenega izhodnega napetostnega signala po skočni spremembi in njegovo začetno vrednostjo pred skočno spremembo. Amplitudo generirane skočne spremembe tlaka  $\Delta p$  smo določili s pomočjo merilnega modela udarne cevi (1). Pri uporabi kvazistatične metode umerjanja pa smo spremembo napetostnega signala  $\Delta u$  določili kot razliko med povprečno vrednostjo korigiranega izhodnega napetostnega signala v pet

sekund dolgem časovnem intervalu po generirani kvazistatični spremembi in povprečno vrednostjo korigiranega signala pred skočno spremembo v enako dolgem časovnem intervalu, medtem ko je bila kvazistatična sprememba tlaka  $\Delta p$  izmerjena s pomočjo tlačnega regulatorja (izdelovalec Druck, tip DPI 510).

Povprečna statična občutljivost štiridesetih ponovljenih meritev (deset ponovitev pri posamezni nominalni vrednosti generirane tlačne spremembe), dobljena z dinamično metodo umerjanja, znaša 0,9970 V/MPa, povprečna statična občutljivost, dobljena s kvazistatično metodo umerjanja, pa znaša 0,9894 V/MPa. Da bi ovrednotili primerljivost rezultatov povprečnih statičnih občutljivosti piezoelektričnega MST, dobljenih po obeh metodah umerjanja, smo uporabili normiran merilni pogrešek:

$$E_n = \frac{K_{\text{kvazistatična}} - K_{\text{dinamična}}}{\sqrt{U(K_{\text{kvazistatična}})^2 + U(K_{\text{dinamična}})^2}} \tag{4}$$

kjer je  $K_{\text{kvazistatična}}$  povprečna statična občutljivost, dobljena s kvazistatično metodo umerjanja, in  $K_{\text{dinamična}}$  povprečna statična občutljivost, dobljena z dinamično metodo umerjanja, pri čemer sta

$U(K_{\text{kvazistatična}})$  in  $U(K_{\text{dinamična}})$  njuni razširjeni merilni negotovosti. Negotovosti statičnih občutljivosti sta bili ovrednoteni v skladu z JCGM 100:2008 [12]. Skupna standardna merilna negotovost statične občutljivosti, dobljene s kvazistatično metodo  $u(K_{\text{kvazistatična}})$ , je bila ovrednotena z upoštevanjem standardne merilne negotovosti s tlačnim regulatorjem generirane kvazistatične spremembe tlaka  $u_{\text{gen}}(K_{\text{kvazistatična}})$  ter standardne negotovosti zaradi ponovljivosti kvazistatične metode umerjanja  $u_{\text{pon}}(K_{\text{kvazistatična}})$ , ocenjene kot eksperimentalni standardni odmik povprečja. Razširjena merilna negotovost statične občutljivosti je bila nadalje določena kot:

$$U(K_{\text{kvazistatična}}) = t_p(v_{\text{ef}})u(K_{\text{kvazistatična}}) \quad (5)$$

kjer je  $t_p(v_{\text{ef}})$  Studentov faktor, ki ustreza stopnji zaupanja 95,45 % in številu efektivnih prostostnih stopenj:

$$v_{\text{ef}} = (N-1) \frac{u^4(K_{\text{kvazistatična}})}{u_{\text{pon}}^4(K_{\text{kvazistatična}})} \quad (6)$$

kjer je  $N = 40$  število ponovljenih meritev. Relativna razširjena merilna negotovost  $U_r(K_{\text{kvazistatična}}) = U(K_{\text{kvazistatična}})/K_{\text{kvazistatična}}$  tako znaša 0,18 %. Standardna merilna negotovost statične občutljivosti, dobljene z dinamično metodo  $u(K_{\text{dinamična}})$ , pa je bila ovrednotena z upoštevanjem standardne merilne negotovosti amplitude generiranega tlačnega skoka (postopek ovrednotenja merilne negotovosti amplitude generiranega tlačnega skoka je podrobno predstavljen v [7]) in standardne negotovosti zaradi ponovljivosti dinamične metode umerjanja, ocenjene kot eksperimentalni standardni odmik povprečja. Relativna razširjena merilna negotovost statične občutljivosti, dobljene z dinamično metodo umerjanja, je tako ocenjena na 0,87 %. Ker je pogrešek med povprečnima vrednostma dobljenih statičnih občutljivosti po obeh metodah umerjanja 0,0076 V/MPa, normirani pogrešek določanja statičnih občutljivosti tako znaša 0,86. Ker dobljeni normirani pogrešek ustreza pogoju  $|E_n| \leq 1$ , lahko potrdimo, da je ujemanje rezultatov po obeh metodah ustrezno glede na podane merilne negotovosti.

## 4 Sklepi

Prispevek predstavlja dinamično in kvazistatično metodo določanja statične občutljivosti hitro odzivnega piezoelektričnega MST. Za dinamično umerjanje je bila v LMPS razvita brezmembranska udarna cev, ki v primerjavi s konvencionalnimi udarnimi cevmi z membrano zagotavlja boljše obnovljivost in ponovljivost generirane tlačne skočne spremembe, saj v razviti udarni cevi membrano nadomešča avtomatiziran hitro odpirajoči pnevmatski

ventil, zato po vsakem preizkusu ni potrebno zamenjati membrane in zaradi tega celotne udarne cevi razstaviti in nato ponovno sestaviti. V LMPS je bil razvit tudi sistem za kvazistatično umerjanje, ki ga sestavlja prirobnica, ki omogoča priklop tlačnega regulatorja in z vijačnimi spoji spojitev končne prirobnice nizkotlačnega dela udarne cevi z vgrajenim piezoelektričnim merilnikom tlaka. Za ovrednotenje primerjave statičnih občutljivosti izbranega hitro odzivnega piezoelektričnega MST, dobljene z dinamično metodo umerjanja in uporabo razvite brezmembranske udarne cevi ter s kvazistatično metodo umerjanja in uporabo za ta namen razvitega sistema, smo uporabili normiran merilni pogrešek. Ta predstavlja razmerje razlike v statičnih občutljivostih, dobljenih po obeh metodah, ter razširjene merilne negotovosti te razlike. Na podlagi dobljenih vrednosti normiranih merilnih pogreškov smo potrdili, da je ujemanje statičnih občutljivosti hitro odzivnega piezoelektričnega MST, dobljenih po obeh metodah, ustrezno glede na podane merilne negotovosti. V prihodnje bomo na podlagi ugotovitev numeričnih analiz postavili analitično korekcijo obstoječega merilnega modela udarne cevi, ki predpostavlja popoln plin in adiabatne razmere, kar bo pripomoglo k dodatnemu izboljšanju napovedi tlačnih sprememb, generiranih v udarni cevi, ter s tem še točneje določitve statične občutljivosti hitro odzivnih MST z udarno cevjo.

## Literatura

- [1] J. Hjelmgren, Dynamic Measurement of Pressure – A Literature Survey, SP Report 2002: 34, SP Swedish National Testing and Research Institute, Borås, 2002.
- [2] C. Zhao, D. Kong, Research on sectional nominal mathematical model of piezoelectric pressure measurement system based on quasi-static calibration, IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement 70 (2021) 1004006.
- [3] V. E. Bean, Dynamic pressure metrology, Metrologia 30 (1994) 737–741.
- [4] D. W. Holder, D. L. Schultz, On the Flow in a Reflected-Shock Tunnel, Her Majesty's Stationery Office, London, 1962.
- [5] Z. Yao, X. Liu, C. Wang, W. Yang, Improved traceable measurement of the reflected step pressure in shock tube with the compensation of shock wave attenuation, Aerospace Science and Technology 107 (2020) 106302.
- [6] H. J. Pain, E. W. E. Rogers, Shock waves in gases, Reports on Progress in Physics 25 (1962) 287–336.
- [7] A. Svete, J. Kutin, Characterization of a newly developed diaphragmless shock tube for the primary dynamic calibration of pressure meters, Metrologia 57 (5) (2020) 055009.
- [8] A. Svete, J. Kutin, Diaphragmless shock tube for primary dynamic calibration of pressure

- mers, Acta IMEKO 9 (5) (2020) 310–314.
- [9] Ž. Komel, A. Svete, J. Kutin, Določanje frekvenčne prenosne funkcije merilnika tlaka pri dinamičnem umerjanju z udarno cevjo, Svet strojništva 09 (03/06) (2020) 76–77.
- [10] E. W. Lemmon, M. L. Huber, M. O. McLinden, NIST Standard Reference Database 23: Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties – REFPROP, ver. 9.0, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, 2010.
- [11] M. Serridge, T. R. Licht, Piezoelectric Accelerometers and Vibration Preamplifiers, Theory and Application Handbook, Brüel & Kjær, Nærum, 1987.
- [12] BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML, Evaluation of Measurement Data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, Technical report JCGM 100:2008, Joint Committee for Guides in Metrology, Pariz, 2008.

## Determination of static sensitivities of fast-response pressure measurement systems

### Abstract:

This paper presents a dynamic and quasi-static method for determination of static sensitivity of fast-response piezoelectric pressure measurement system. In order to establish SI traceability for time-varying pressure measurements, a diaphragmless shock tube was developed in the Laboratory for Measurements in Process Engineering (LMPS). The measurements of static sensitivity of the piezoelectric pressure measurement system under test were performed with the dynamic calibration method and the use of a shock tube and with the quasi-static calibration method. Based on the comparison of the results and their extended measurement uncertainties we verified the adequacy of determining the static characteristics with both methods.

### Keywords:

pressure metrology, time-varying pressure, piezoelectric measurement system, shock tube, quasi-static calibration method



LABORATORIJ ZA MERITVE V PROCESNEM STROJNIŠTVU

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo

[www.lmps.fs.uni-lj.si](http://www.lmps.fs.uni-lj.si)



- Znanstveno in industrijsko meroslovje pretoka tekočin, hitrosti zraka, tlaka, temperature, relativne vlažnosti
- Raziskave in razvoj merilne opreme in merilnih metod
- Analize merilne negotovosti merilnih sistemov in procesov
- ISO/IEC 17025 akreditiran laboratorij za področja pretoka plinov, tlaka in temperature (SA LK-015), v začetku I. 2022 širitev tudi na področje relativne vlažnosti in hitrosti zraka
- Ocenjevanje akreditiranih meroslovnih laboratorijev
- Univerzitetno izobraževanje, industrijske učne delavnice s področja meroslovja in merilne tehnike

