

## Srauto greičio matavimas panaudojant impulsinius akustinius signalus

J. Butkus, L. Jakevičius, O. Tumšys

Kauno technologijos universitetas

Studentų g. 50, LT-3031 Kaunas, Lietuva

### Įvadas

Daugelyje šiuolaikinių technologinių procesų, taip pat centralizuotai tiekiant šilumą, vandenį, dujas, naftą ir jos produktus dažnai tenka matuoti plačiame diapazone kintančius srautų greičius. Ypač svarbu tiksliai išmatuoti mažus srautų greičius, sudarančius 0,01...0,001 garso greičio kontroliuojamoje aplinkoje [1], kai atliekamos atsiskaitomosios operacijos, aptinkami bei šalinami vamzdinių pažeidimai. Mažų srautų greičių matavimų tikslumas - viena iš aktualiausių šiuolaikinės srautų diagnostikos problemų.

### Teorinė analizė

Pastaraisiais metais dujų ir skysčių srautų greičiams matuoti vis plačiau taikomi impulsiniai ultragarsiniai matavimo metodai [2,3]. Taikant impulsinį matavimo metodą, srauto greitis  $v$  apskaičiuojamas pagal formulę:

$$v = \frac{l - \Delta l}{2 \cos \alpha} \cdot \frac{\tau_2 - \tau_1}{\left( \tau_2 - \frac{\Delta l}{c} - \tau_{el2} \right) \left( \tau_1 - \frac{\Delta l}{c} - \tau_{el1} \right)}; \quad (1)$$

čia  $l$  - matavimo bazės ilgis, įskaitant atstumą  $\Delta l$  zondavimo kryptimi nuo elektroakustinio keitiklio darbinio paviršiaus iki vamzdžio vidinės sienelės;  $\tau_2$  ir  $\tau_1$  - akustinio signalo sklidimo trukmės, zondojuojant priešpriešinėmis kryptimis;  $\alpha$  - kampas tarp zondavimo ir srauto tekėjimo krypčių;  $c$  - garso greitis kontroliuojamoje aplinkoje;  $\tau_{el1}$  ir  $\tau_{el2}$  - signalo vėlinimo elektrinėse grandinėse ir elektroakstinių keitiklių pereinamuosiuose sluoksniuose trukmės.

Garso greitis kontroliuojamame sraute apskaičiuojamas pagal formulę:

$$c = \frac{2l}{\tau_1 - \tau_{el1} + \tau_2 - \tau_{el2}}, \quad (2)$$

Elektrinių ir akstinių signalų vėlinimo trukmės  $\tau_{el1}$  ir  $\tau_{el2}$  būna nevienodos, kadangi skiriasi akstinių signalų sklidimo keliai, zondojuojant srautą priešpriešinėmis

kryptimis, t.y.:

$$\tau_{el1} = \tau_{g1} + \frac{l_{b1}}{c_{b1}} + \frac{l_{s1}}{c_{s1}} + \frac{l_{s2}}{c_{s2}} + \frac{l_{b2}}{c_{b2}} + \tau_{i2}, \quad (3)$$

$$\tau_{el2} = \tau_{g2} + \frac{l'_{b2}}{c_{b2}} + \frac{l'_{s2}}{c_{s2}} + \frac{l'_{s1}}{c_{s1}} + \frac{l'_{b1}}{c_{b1}} + \tau_{i1}; \quad (4)$$

čia  $\tau_{g1}$  ir  $\tau_{g2}$  - signalo vėlinimas elektrinėse generatorių grandinėse;  $l_{b1}$  ir  $l_{b2}$ ,  $l'_{b1}$  ir  $l'_{b2}$  - akstinių signalų sklidimo kelių ilgiai pereinamuosiuose bangolaidiniuose sluoksniuose, zondojuojant atitinkamomis kryptimis;  $l_{s1}$  ir  $l_{s2}$ ,  $l'_{s1}$  ir  $l'_{s2}$  - akstinių signalų sklidimo kelių atitinkamomis kryptimis ilgiai pertvarose, skiriančiose nišose sumontuotus elektroakstinius keitiklius nuo srauto;  $\tau_{i1}$  ir  $\tau_{i2}$  - signalų vėlinimo trukmės imtuvų grandinėse;  $c_{b1}$ ,  $c_{b2}$ ,  $c_{s1}$ ,  $c_{s2}$  - garso greičiai atitinkamuose bangolaidiniuose sluoksniuose ir pertvarų sienelėse.

Tiriant impulsinio matavimo metodo galimybes atlikti teoriniai skaičiavimai. Laikoma, kad vamzdžio, kuriuo teka oras, skersmuo  $d=0.4$  m, garso greitis ore  $c=340$  m/s. Apskaičiuotos akstinių signalų sklidimo trukmės  $\tau_1$  zondojuojant kampu  $\alpha=45^\circ$  pagal srautą ir  $\tau_2$  - zondojuojant prieš srautą; sklidimo trukmių skirtumas  $\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1$ , kai srauto greitis  $v=0.01$  m/s, 0.1 m/s, 1.0 m/s, 10.0 m/s ir 30.0 m/s. Be to, apskaičiuotos leistinos sklidimo trukmių skirtumo matavimo tolerancijos, matuojant vidutinį srauto greitį 0.1, 0.3 ir 1.0 % tikslumu. Skaičiavimo rezultatai pateikti 1 lentelėje.

Pateikti skaičiavimo rezultatai rodo, kad, didėjant srauto greičiui, sklidimo trukmių skirtumas  $\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1$  didėja tiesiškai. Gana tiesiškai didėja ir sklidimo trukmių skirtumo matavimo paklaida  $\delta_r$ . Tačiau, pageidaujama srauto greičio matavimo tikslumui pasiekti akstinių signalų sklidimo trukmės ir jų skirtumą būtina matuoti nanosekundžių ir jų dalių tikslumu. Reikalavimai šių trukmių matavimo tikslumui padidėja esant mažiams oro srauto greičiams ( $v \leq 0.1$  m/s). Kiekvieną kartą atskirai

Lentelė

Srauto greitis, $v, m/s$	Sklidimo trukmė, $\tau_1, \mu s$	Sklidimo trukmė, $\tau_2, \mu s$	Trukmių $\tau_2$ ir $\tau_1$ skirtumas, $\Delta\tau, \mu s$	Leidžiama sklidimo trukmių $\tau_1$ ir $\tau_2$ matavimo paklaida ( $\delta_r, ns$ ), esant srauto greičio matavimo paklaidai $\delta_v$		
				$\delta_v=0.1\%$	$\delta_v=0.3\%$	$\delta_v=1\%$
0.01	1663.7459	1663.8151	0.0692	0.069	0.208	0.692
0.1	1663.4346	1664.1266	0.6920	0.692	2.076	6.920
1.0	1660.3275	1667.2480	6.9205	6.9205	20.762	69.205
10.0	1629.8834	1699.1175	69.2341	69.234	207.702	692.341
30.0	1566.0706	1774.4944	208.4238	208.424	625.271	2084.238

matuojant sklaidimo trukmių priešpriešinėmis kryptimis skirtumą, pasiekti didelį matavimo tikslumą praktiškai sudėtinga. Kadangi ultragarsinių matavimų procesas trunka palyginti neilgai, tai leidžia vidurkinti didelio matavimų skaičiaus rezultatus (priklausomai nuo matavimų bazės  $l_0$  ilgio, matavimų skaičius gali siekti nuo kelių dešimčių iki kelių tūkstančių per sekundę). Galutinis rezultatas gaunamas statistiškai apdorojus šimtų ir tūkstančių matavimų rezultatus. Toks matavimo rezultatų statistinis apdorojimas turi prasmę tik tada, kai kontroliuojamo srauto parametrai matavimo metu praktiškai nekinta. Apie srauto parametrų kitimą matavimo metu galima spręsti tik surinkus pakankamą kiekį statistinės informacijos apie srautus, kurių parametrai matuojami.

### Praktinis realizavimas

Ultragarinį impulsinį matavimo metodą praktikoje galima realizuoti keliais būdais. Vienas būdų - atlikti pasirinktą matavimų skaičių prieš srautą, o paskui tiek pat matavimų srauto kryptimi. Taip matuojant galima pasiekti didžiausią matavimų greitį kiekviena kryptimi. Tačiau, kol matuojama viena kryptimi, srauto parametrai gali pasikeisti, ir matavimo paklaidos dėl to gali gerokai padidėti. Todėl šis būdas naudotinas srautų su palyginti stabiliais parametrais kontrolei [1,4,5]. Kitas būdas - matuoti prieš ir pagal srautą tuo pat metu. Tokiu atveju abu keitikliai žadinami impulsais tuo pat metu, o priimamieji signalai fiksuojami beveik tuo pat metu. Matuojant šiuo būdu, matavimo sistemoje viskas turi būti dubliuota, dėl to įranga labai pabrangsta. Kitas trūkumas - elektroakustinių keitiklių reverberacija turi trukti neilgai [1,4,5], trumpiau nei sklinda signalas tarp siuntiklio ir imtuvo. Kadangi elektroakustinių keitiklių banginę varžą sunku suderinti su dujų srauto bangine varža, tai neišvengiamai atsiranda atspindžiai. Dėl atspindžių akustinis signalas ilgai reverberuoja keitiklyje, kol jo lygis nukrinta iki priimtino triukšmų lygio, o tai lemia srauto greičio matavimo tikslumą [1,5]. Įvertinant tai, kad matavimo metu dujų srautuose siunčiamo ir priimamo signalo lygiai skiriasi apie milijoną kartų [1,3], pasiekti pakankamai gerą signalo ir triukšmo santykį priėmimo keitiklyje sunku. Sunkiai sprendžiama šiuo atveju ir elektroakustinių keitiklių akustinio izoliavimo nuo vamzdyno korpuso problema. Stipriai slopinant elektroakustinius keitiklius, jų reverberacijos trukmę pavyksta sutrumpinti. Tačiau šiuo atveju labai sumažėja priimamo signalo lygis. Priimtą signalą tenka daugiau stiprinti, todėl pablogėja signalo ir triukšmo santykis ir sumažėja srauto greičio matavimo tikslumas.

Įvertinus aprašytų matavimo metodų trūkumus, pasirinktas metodas, kai elektroakustiniai keitikliai žadinami paeilui. Priėmus naudingą signalą, keitiklis sužadinamas, ir išspinduliuojamas signalas priešinga kryptimi. Antras keitiklis priėmus signalą, taip pat yra sužadinamas. Taip paeilui žadinant keitiklius pasiekiamas didesnis matavimų greitaiegiškumas, o naudojamų keitiklių reverberacijos trukmė gali būti beveik du kartus ilgesnė negu sinchroninio žadinimo atveju. Kai matavimo kanalo skersmuo  $d=0.4$  m, o matavimo bazės ilgis  $l_0=0.566$

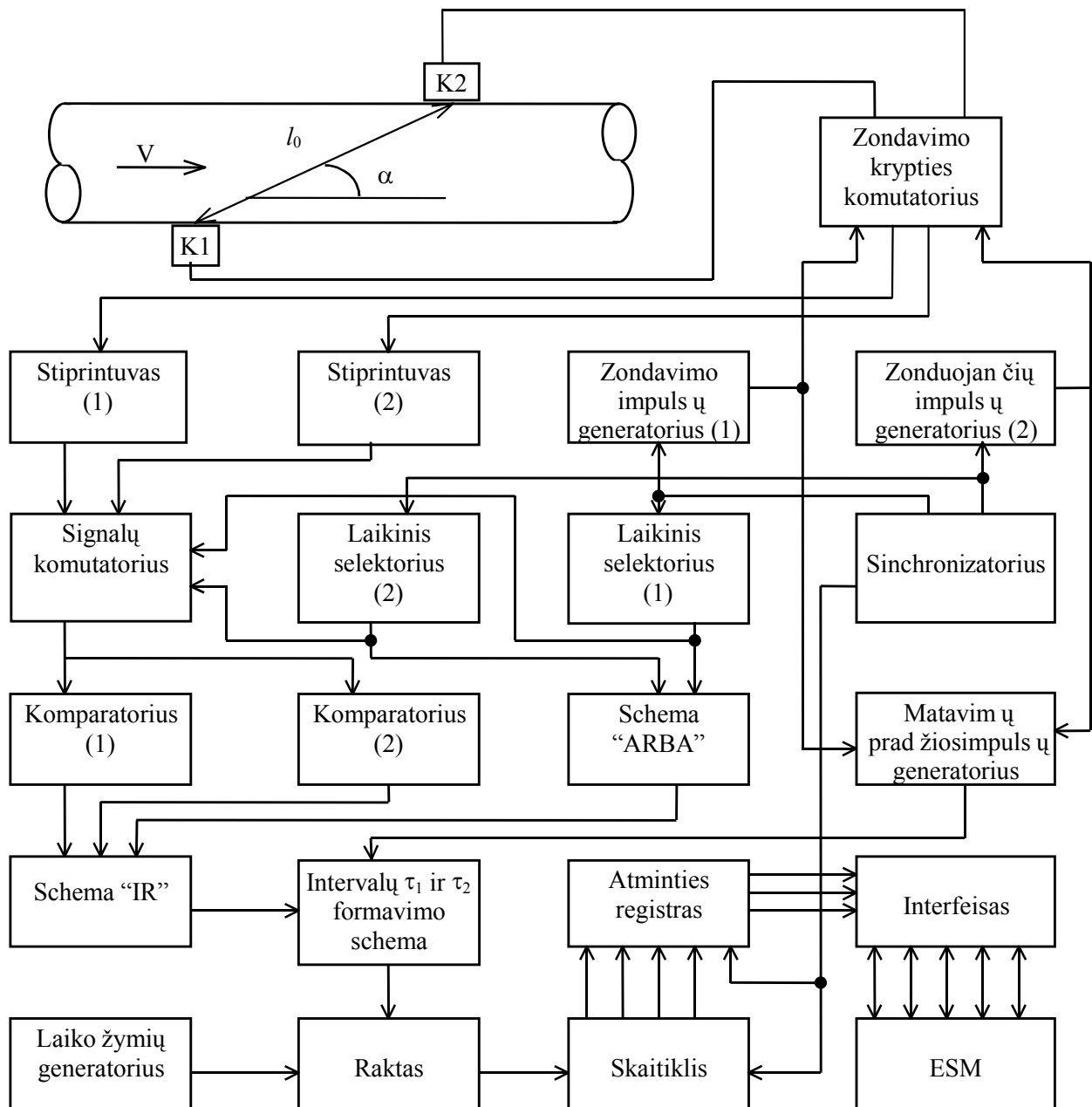
m, per vieną sekundę galima atlikti iki 200 matavimų priešingomis kryptimis. Kadangi laiko tarpas tarp zondavimo viena ir kita kryptimi sudaro tik 2.5 ms, tai srauto parametrai per šį laiką nespėja kiek labiau pasikeisti. Be to, siūlomas matavimo būdas įgalina fiksuoti srauto greičio pokyčius, vykstančius iki 100 Hz dažniu. Šis būdas gali būti realizuojamas įrenginiu, kurio struktūrinė schema pavaizduota 1 pav.

Sinchronizatorius nustatytais laiko momentais paeilui paleidžia 1-ąjį arba 2-ąjį zondavimo impulsų generatorius ir atitinkamus laikinius selektorius. Zondavimo impulsų generatoriai per zondavimo krypties komutatorių sužadina atitinkamus elektroakustinius keitiklius  $K_1$  arba  $K_2$  ir paleidžia matavimo pradžios impulsų generatorių. Akustiniais signalams perėjus tiriamąjį srautą, iš elektroakustinių keitiklių per zondavimo krypties komutatorių elektriniai signalai paduodami į pirmą arba antrą stiprintuvus, o vėliau į signalų komutatorių. Signalų komutatorius yra valdomas laikinių selektorių impulsais. Taigi laikiniai selektoriai nustatytais laiko momentais prijungia atitinkamo stiprintuvo išėjimą prie lygiagrečiai sujungtų pirmojo ir antrojo komparatorių įėjimų. Į du schemas IR įėjimus paduodami komparatorių išėjimo signalai, o į trečiąjį įėjimą - schemą ARBA perėję laikinių selektorių signalai. Jei visų trijų signalų sklaidimo trukmės sutampa, schemas IR išėjime suformuojamas intervalų  $\tau_1$  arba  $\tau_2$  formavimo pabaigos signalas. Atitinkami intervalai  $\tau_1$  arba  $\tau_2$  pradeda formuotis, kai intervalų formavimo schema gauna matavimo pradžios impulsų generatoriaus signalą. Intervalų formavimo schemas išėjime gaunami impulsai, kurių trukmė atitinka akustinio signalo vėlinimo tarp elektroakustinių keitiklių trukmės, kai zonuojama priešingomis kryptimis. Šiais impulsais valdomas raktas, per kurį laiko žymių generatoriaus signalai perduodami į skaitiklį. Baigus eilinį matavimą, skaitiklyje esanti informacija perrašoma į atminties registrą, o vėliau per interfeisą perduodama į ESM, kur surenkama statistinė informacija ir apskaičiuojami garso bei srauto greičiai kontroliuojamoje terpėje.

### Elektroakustiniai keitikliai

Projektuojant ultragarsinius dujų srautų greičio matuoklius, labai svarbu sukurti efektyvius elektroakustinius keitiklius, suderintus su dujine aplinka [1,5]. Dėl keitiklių ir aplinkos banginių varžų skirtumo tik maža dalis žadinamo signalo, pasiekusio imtuvą, paverčiama elektriniu signalu. Pavyzdžiui, keitiklį žadinančio elektrinio signalo ir priimto signalo amplitudžių santykis sudaro apie 120 dB [1]. Dėl šios priežasties tenka didinti žadinimo signalo amplitudę. Didėjant žadinimo signalo amplitudei, neišvengiamai didėja ir akustinis signalas, perduodamas į keitiklio tvirtinimo mazgą, o tuo pat metu ir į matavimų sekcijos korpusą, prie kurio tvirtinami elektroakustiniai keitikliai.

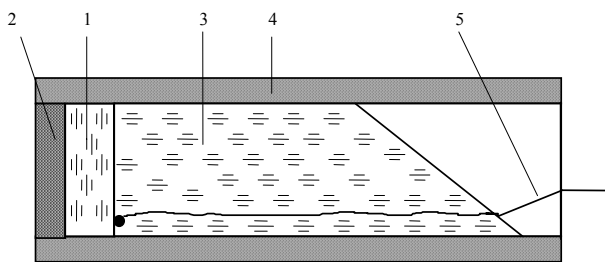
Atsižvelgiant į tai, kad elektroakustinių keitiklių ir metalinės matavimo sekcijos akustinės varžos yra panašios, akustinis signalas tiesiogiai sklinda labai gerai. Tokio parazitinio tiesiogiai sklindančio signalo amplitudė paprastai keletą tūkstančių (kartais ir keliasdešimt tūkstančių) kartų didesnė už akustinio signalo, perėjusio



1 pav. Srauto greičio matavimo ultragarsinės impulsinės sistemos struktūrinė schema.

dujų srautą, amplitudę. Todėl keitiklius tenka akustiškai izoliuoti nuo tvirtinimo mazgų ir nuo matavimo sekcijos. Kadangi keitiklius visiškai izoliuoti praktiškai sudėtinga [1,5], tai labai svarbu iki minimumo sutrumpinti akustinio signalo reverberacijos trukmę pačiuose elektroakustiniuose keitikliuose ir matavimo sekcijos korpuse. Taigi tikslinga didinti akustinių signalų dažnį, nes, didėjant dažniui, didėja akustinių signalų slopinimas ir trumpėja jų reverberacijos trukmė [1,5]. Bet čia būtina atsižvelgti į tai, kad akustinio signalo slopinimas dujose, didėjant dažniui, didėja pagal kvadratinį dėsnį. Be to, efektyviausiai dujose veikia siaurajuosčiai rezonansiniai keitikliai [1,2,5]. Tačiau šie keitikliai netinka nei tolydiniams dažniu moduluotiems signalams, nei srauto greičiui matuoti impulsiniu metodu. Naudojant impulsinius signalus, keitiklių praleidžiamų dažnių juostos plotis turi būti 30÷40%, kitu atveju priimto

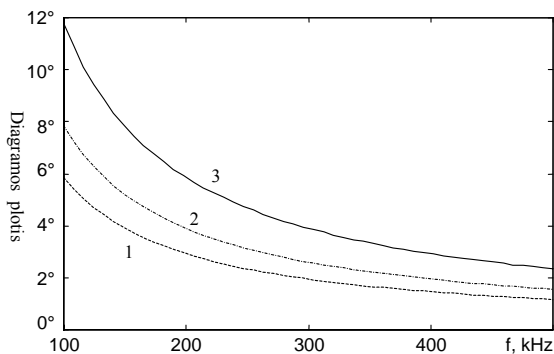
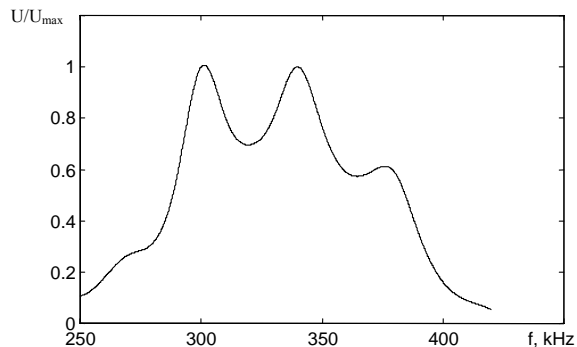
signalų amplitudė didėja lėtai ir sunku pakankamai tiksliai fiksuoti priimto signalo atėjimo momentą. Tokį palyginti didelį perduodamų signalų juostos plotį galima pasiekti mechaniškai slopinant keitiklius ir naudojant papildomas elektrinio suderinimo grandines [6]. Tačiau mechaninis slopinimas mažina priimto signalo amplitudę ir kyla pavojus, kad naudojamų stiprintuvų savieji triukšmai ir dujų srauto generuojami akustiniai triukšmai labai sumažins signalo ir triukšmo santykį imtuvo įėjime. O šis santykis lemia matavimų tikslumą. Optimaliam variantui rasti buvo atlikti tyrimai. Jų metu buvo išanalizuoti literatūros šaltiniuose [1,2,5,6] pateikti duomenys ir, atsižvelgiant į matavimo bazės ilgį ( $l_0=0.566$  m), nustatyta, kad tiksliausia naudoti 300-400 kHz dažnio akustinius signalus. Šiam dažnių diapazonui buvo sukurta keletas elektroakustinių keitiklių konstrukcijų. Vienos jų brėžinys pavaizduotas 2 pav.



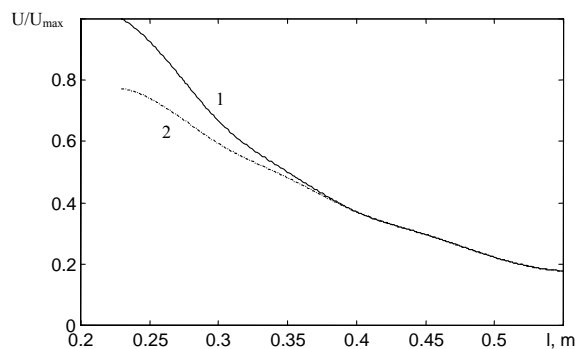
2 pav. Elektroakustinio keitiklio konstrukcija

Pjezoelementas 1, kurio rezonansinis dažnis ore siekia apie 330 kHz, per 1/4 bangos storio pereinamąjį sluoksnį 2 suderinamas su dujine aplinka (oru). Praleidžiamų dažnių juostos pločiui pasiekti ir akustinių virpesių reverberacijos trukmei pačiame keitiklyje sutrumpinti pjezoelementas 1 slopinamas tolygiai kintamos akustinės varžos slopintuvu 3. Slopintuvo akustinė varža keičiasi taip, kad minimizuojami reverberaciniai triukšmai pačiame keitiklyje ir gerai suderinamos pjezoelemento ir dempferio akustinės varžos. Visi keitiklio elementai sudedami į specialų apvarkalą 4, kuris iš dalies akustiškai izoliuoja juos nuo kitų, brėžinyje nepavaizduotų, keitiklio tvirtinimo mazgo elementų. Keitiklio konstrukcija sudedama į metalinį ekraną, kuris per akustinės izoliacijos intarpus įpresuojamas į metalinį keitiklio tvirtinimo mazgo apvarkalą. Tokia keitiklio konstrukcija palyginti neblogai akustiškai izoliuoja aktyvinius elementus nuo matavimo sekcijos korpuso ir įgalina gerokai sumažinti radialinių virpesių atsiradimo pavojų. Konstrukcija mechaniškai atspari ir gana nesunkiai priderinama prie keitiklių tvirtinimo mazgo konstrukcijos. Sukurto elektroakustinio keitiklio spinduliavimo ore kryptingumo diagrama pavaizduota 3 pav.

Diagrama gauta modeliuojant kompiuteriu. Kaip matome, didėjant dažniui ir keitiklio skersmeniui, kryptingumo diagrama siaurėja. Dažniui pasiekus 350...380 kHz. pusė kryptingumo diagramos pločio sudaro apie 1.5 laipsnio, ir to nagrinėjamu atveju pakanka. Akustinio signalo nuokrypis sraute, kai jo greitis siekia 10 m/s, gali būti iki 1.2-1.3 laipsnio. Taigi montuojant ir tvirtinant elektroakustinius keitiklius prie matavimų sekcijos korpuso, jų ašių krypties nesutapimas turi būti ne didesnis kaip 0.2 laipsnio. Esant didesniams keitiklių išilginių ašių nesutapimui, priimti akustiniai signalai, kai oro srauto greitis sieks 10 m/s, gali labai sumažėti, ir tada pablogėtų matavimų tikslumas.

3 pav. Ultragarso keitiklio kryptingumo diagrama, kai keitiklio skersmuo  $d=24$  mm (1),  $d=18$  mm (2),  $d=12$  mm (3)

4 pav. Ultragarso keitiklio dažninė amplitudės charakteristika.

5 pav. Priimamo akustinio signalo kitimas, keičiant matavimo bazės  $l$  ilgį, kai dažnis  $f=300$  kHz (1) ir  $f=340$  kHz (2)

Buvo tirta ir elektroakustinio kanalo, sudaryto iš dviejų ultragarso keitiklių, esančių ore 0.6 m atstumu vienas priešais kitą, dažninė amplitudės charakteristika. Tyrimo rezultatai pavaizduoti 4 pav.

Sukurto keitiklių praleidžiamų dažnių juosta tęsiasi nuo 290 iki 350 kHz, o truputį padidinus slopinimą galėtų būti išplėsta iki 380...385 kHz. Kadangi pagamintų ir ištirtų keitiklių darbo dažnių ruožas yra didesnis kaip 30%, minėti keitikliai gali dirbti tiek impulsiniu, tiek tolydiniu koherentiškai moduluotų akustinių signalų režimu.

Tiriant elektroakustinį matavimų kanalą, siekta įvertinti ir galimų atspindžių poveikį matavimų rezultatams. Tuo tikslu buvo keičiamas matavimo bazės  $l$  ilgis ir stebima priimtų akustinių virpesių amplitudė. Eksperimentai buvo atlikti su tolydziaisiais signalais, kurių dažniai  $f_1=300$  kHz ir  $f_2=340$  kHz. Tyrimo rezultatai pateikti 5 pav.

Nustatyta, kad didinant atstumą tarp elektroakustinių keitiklių nuo 0.2 iki 0.6 m, priimto akustinio signalo lygis sumažėja apie 5 - 6 kartus. Be to, atstumui kintant nuo 0.2 iki 0.35 m, labai ryškūs akustinių signalų atspindžiai. Apie jų buvimą galima spręsti iš akustinių signalų interferencijos. Signalų interferencija ir galimų atspindžių poveikis tirtas esant atstumui tarp keitiklių iki 0.35 m. Paskui atsispindėjusių signalų amplitudė sumažėdavo, ir atspindžių poveikis matavimų rezultatams praktinės reikšmės neturėjo. Esant atstumams nuo 0.2 iki 0.35 m atspindžių lygis pastebimai keitė akustinių signalų amplitudę, todėl šiame atstumų intervale sukurti keitikliai galėtų būti naudojami tik impulsiniu režimu.

Eksperimentiniai tyrimai parodė, kad pagrindinės tirtų ultragarso keitiklių charakteristikos tenkina

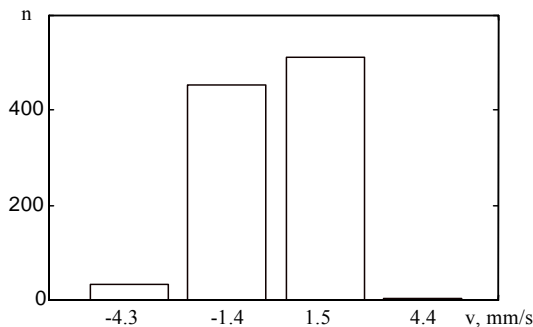
reikalavimus, keliamus dujų srautų greičio matavimo ultragarsinių sistemų keitikliams, ir jie galės būti naudojami praktikoje.

### Ekspimentiniai tyrimai

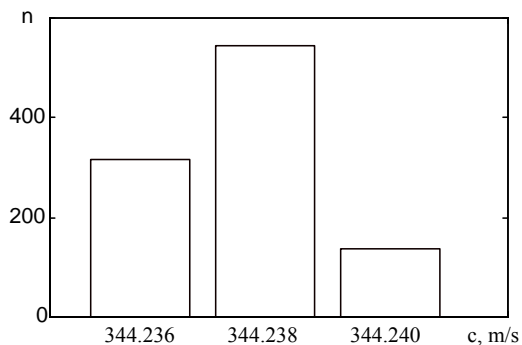
Sukurtos sistemos eksperimentinis patikrinimas buvo atliktas laboratorinėmis sąlygomis. Bandymai vykdyti naudojant uždara 0,8 m ilgio ir 0,4 m skersmens matavimų sekciją su  $45,7^\circ$  kampu sumontuotu akustiniu matavimų kanalu. Kadangi sekcija buvo iš abiejų galų uždara, tai viduje vyko tik natūrali oro konvekcija. Srauto greičio matavimo rezultatai pateikti 6 pav.

Ekspimento metu vyravo dvi srauto greičio reikšmės:  $-0,0014$  m/s ir  $+0,0015$  m/s. Vidutinis srauto greitis, gautas suvidurkinus 1000 reikšmių, buvo artimas nuliui. Gautų greičio verčių diskretiškumą lėmė sklidimo trukmių  $\tau_1$  ir  $\tau_2$  matavimo diskretiškumas, užpildant jas 50 MHz dažnio laiko žymėmis. Kartu buvo matuojamas ir garso greitis ore. Kaip matome iš 7 pav. pateiktų duomenų, atlikus sukurtos matavimo sistemos kalibravimą ir patikslinus matavimo bazės ilgį bei zondavimo kampą  $\alpha$ , garso greitį ore galima matuoti bent penkių ženklų tikslumu.

Pirmieji bandymai parodė, kad, siekiant geriau panaudoti sukurtos matavimo sistemos galimybes, tikslinga bent du kartus padidinti diskretizavimo dažnį ir taip sumažinti sklidimo trukmių diskretizavimo paklaidas.



6 pav. Sistemos nulinio dreifo verčių histograma, gauta matuojant uždareme vamzdyje, kai vidutinis srauto greitis  $v=0$ ,



7 pav. Garso greičio verčių, gautų matuojant ore, histograma, kai  $v=0$  ir  $n=1000$

### Išvados

Mažus dujų srautų greičius (0,01...0,001 garso greičio kontroliuojamoje aplinkoje) tikslinga matuoti ultragarsiniais impulsiniais metodais. Vienas tokių ištirtų ir praktiškai realizuotų metodų – akustinių keitiklių žadinimas paeiliui priešingomis kryptimis – įgalina minimizuoti kitų metodų trūkumus, padidinti matavimų greitaieigiškumą bei sumažinti srauto matavimo paklaidas. Sukurta srauto greičio matavimo ultragarsinė impulsinė sistema, matuojanti srauto greičius 0.2...10 m/s intervale su paklaida, ne didesne kaip 0.3%. Sistemoje panaudoti elektroakustiniai keitikliai, dirbantys 300...400 kHz dažnių diapazone, įgalina matuoti srauto greičius 0.1...0.5 m skersmens vamzdžiuose, išlaikant nustatytas technines charakteristikas. Atitinkamu tikslumu išmatavus matavimo bazės ilgį ir kampą tarp srauto judėjimo ir jo zondavimo krypties, naudojant sukurtą ultragarsinę sistemą, garso greitį ore galima matuoti bent penkių ženklų tikslumu.

Darbą remia Lietuvos valstybinis mokslo ir studijų fondas.

### Literatūra

1. **L. C. Lynnworth.** Ultrasonic Measurements for Process Control./ N. Y. Academic Press. 1989. - 694 p.
2. **R. J. Redding.** Wide range flow quantity measurement using coherently modulated Ultrasound. / An International conference of the IEEE group on sonic and ultrasonic. October 16 - 18, 1985. San Francisco. - P. 582 - 585.
3. **W. T. Yost, J. H. Cantrell, P. W. Kushnick.** Fundamental aspects of pulse phase-locked loop technology-based methods for measurement of ultrasonic velocity.// JASA 91(3), March 1992. - P.1456-1468.
4. **E. P. Papadakis.** The Measurement of Ultrasonic Velocity// Physical Acoustics: Principles and Methods. – New York, 1990.- vol.19.- P.81-106.
5. **L. C. Lynnworth, E. P. Papadakis, K. A. Fowler.** Ultrasound propagation measurements and applications// International advances in nondestructive testing.- 1977.- Vol.5. - No.1. - P.71-115.
6. **В. И. Домаркас, Р.-Й. Ю. Кажис.** Контрольно-измерительные пьезоэлектрические преобразователи.- Вильнюс: Минтис, 1974.- 258 с.

J. Butkus, L. Jakevičius, O. Tumšys

### Flow velocity measurement by the pulse acoustical signals

#### Summary

It is proposed for flow velocity measurement to use the pulse acoustical signals and to sound the flow simultaneously or one after another in opposite directions. The algorithms for flow velocity and sound velocity measurement in which the parasitic delay of acoustical or electrical signals in the intermediate layers of transducers, walls of the pipeline and electrical circuits of the generator and receiver are evaluated. The block diagram of the measuring system and electroacoustical transducers for the practical implementation of these algorithms are described. The results of the experimental investigation of the system are presented.

DOI: 10.5755/j01.u.30.2.7898