

Adaptyvios ultragarsinės sistemos dujų srauto greičiui matuoti kūrimas

J. Butkus, L. Jakevičius, O. Tumšys

KTU Ultragarso mokslo centras

Studentų g. 50-136, 3031 Kaunas

Įvadas

Kuriant modernias technologijas svarbu kaip galima tiksliau matuoti gamtinių ir suskystintų dujų, naftos produktų ir kitų cheminių medžiagų judėjimo greitį bei debitą [1]. Labai keičiantis šių medžiagų srautų greičių diapazonui ir matavimo sąlygoms, reikia kurti ir tirti naujus srautų matavimo metodus, diegti adaptyvias srautų greičio ir debito matavimo sistemas [2]. Tai svarbu ir kai reikia aptikti vamzdynų nuotėkius, nustatomus matuojant srautų greičius pradinėje ir galinėje vamzdyno dalyse. Padidinus srautų parametrų matavimo tikslumą ir pasiekus nedidelį nulio dreifą, ultragarsinės matavimo sistemos padėtų laiku aptikti vamzdynų nesandarumą, tenkinti technologinių operacijų ir gamtos saugos reikalavimus [2,3].

Šių tyrimų tikslas buvo sukurti adaptyvią ultragarsinę dujų srautų greičio matavimo sistemą, kuri leistų šiuolaikinius reikalavimus atitinkančiu tikslumu matuoti plačiame greičių kitimo diapazone.

Matavimo sistemos pagrindimas

Matuojant dujų srauto greitį invaziniu impulsiniu laikiniu metodu akustinių signalų sklidimo trukmės srauto kryptimi (τ_1) ir prieš srautą (τ_2) išreiškiamos lygtimis:

$$\begin{cases} \tau_1 = \frac{l_0}{c + v \cos \alpha} + \frac{\Delta l}{c} + \tau_{el1} \\ \tau_2 = \frac{l_0}{c - v \cos \alpha} + \frac{\Delta l}{c} + \tau_{el2} \end{cases}, \quad (1)$$

kur $l = l_0 + \Delta l$ – atstumas tarp elektroakustinių keitiklių spinduliuojančio ir priimančio paviršių, kai srauto aptekamos dalies ilgis l_0 ; $\Delta l = \Delta l_1 + \Delta l_2$ – atstumų tarp keitiklių aktyvių paviršių ir vidinių matavimo sekcijos sienelių paviršių suma zondavimo kryptimi; c – garso greitis dujų sraute; v – srauto greitis; τ_{el1} ir τ_{el2} – signalo vėlinimo trukmės akustinėse ir elektrinėse grandinėse.

(1) išraiškoje tik laikai τ_{el1} ir τ_{el2} nepriklauso nuo dujų srauto parametrų kitimo, todėl padarius pakeitimą

$$\begin{cases} \tau_1 - \tau_{el1} = t_1 \\ \tau_2 - \tau_{el2} = t_2 \end{cases}, \quad (2)$$

ši išraiška įgauna tokį pavidalą:

$$\begin{cases} t_1 = \frac{l_0}{c + v \cos \alpha} + \frac{\Delta l}{c} \\ t_2 = \frac{l_0}{c - v \cos \alpha} + \frac{\Delta l}{c} \end{cases}. \quad (3)$$

Gauta lygčių sistema (3) turi du nežinomuosius – garso greitį c ir srauto greitį v . Kiti dydžiai apibrėžti matavimo sąlygomis. Išsprendus šią lygčių sistemą, gaunamos garso greičio c_v ir srauto greičio v išraiškos:

$$c_v = \frac{(t_1 + t_2)(l + \Delta l) + \sqrt{(t_1 + t_2)^2(l + \Delta l)^2 - 16t_1t_2l\Delta l}}{4t_1t_2}, \quad (4)$$

$$v = \frac{l - t_1c_v}{(t_1 - \frac{\Delta l}{c_v}) \cos \alpha}. \quad (5)$$

Iš gautos (4) išraiškos garso greitį dujų sraute galima nustatyti pagal išmatuotus akustinių signalų vėlinimo trukmes τ_1 ir τ_2 , įvertinant ir dujų srauto greitį. Tuo tarpu išraiška

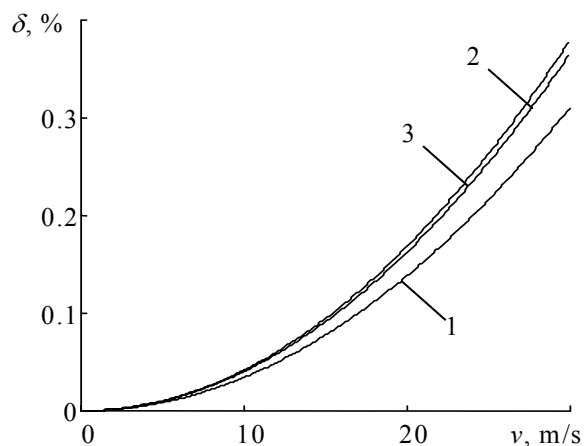
$$c_0 = \frac{2l}{\tau_1 - \tau_{el1} + \tau_2 - \tau_{el2}}, \quad (6)$$

kuri buvo pateikta [1,4] darbuose, gali būti taikoma tik esant mažiems srauto greičiams, t.y. kai srauto greitis artimas nuliui. Kaip keičiasi skirtumo tarp garso greičio dujų sraute verčių, gautų naudojantis (4) ir (6) algoritmais, santykinė paklaida

$$\delta_c = \frac{c_v - c_0}{c_v} 100\%, \quad (7)$$

didėjant srauto greičiui, parodyta 1 pav.

Kaip matome 1 paveiksle, garso greičio nustatymo oro sraute algoritmo santykinė paklaida greitai didėja, didėjant srauto greičiui.

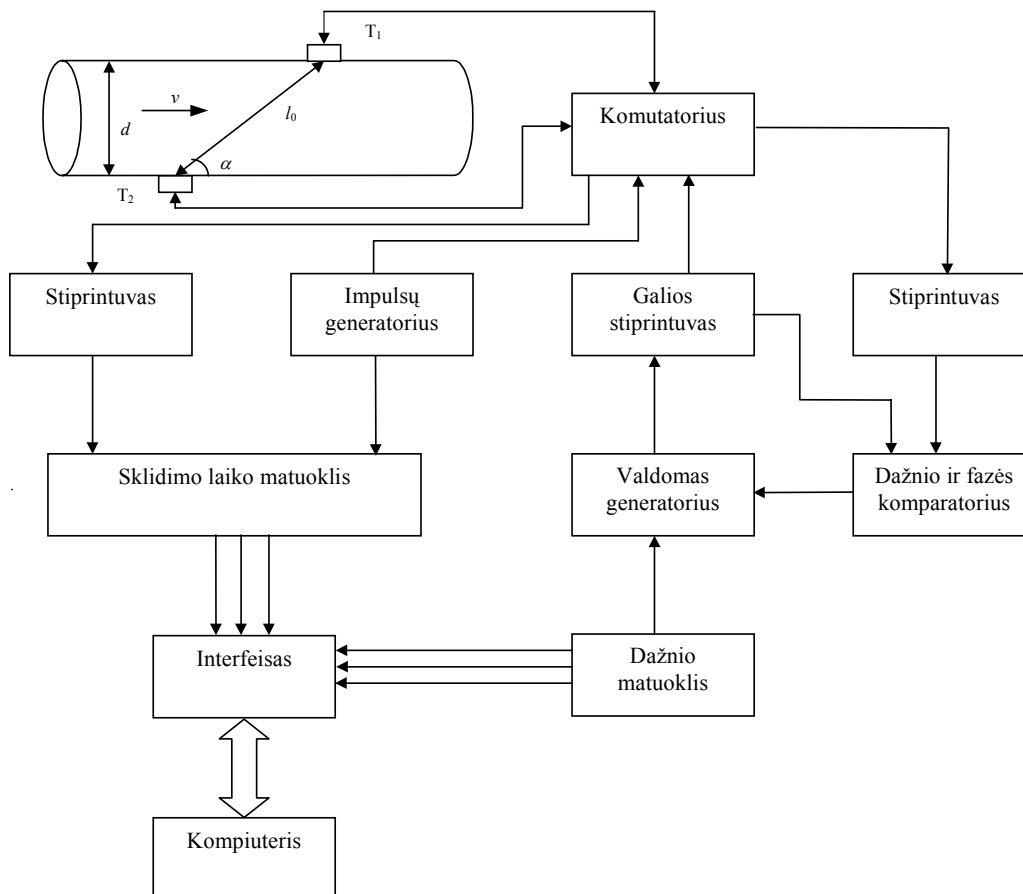


1 pav. Garso greičio skaičiavimo naudojantis (4) ir (6) algoritmais santykinės paklaidos kitimas, kai srauto skersmuo: 1 – kai $d=0,1\text{m}$; 2 – kai $d=0,4\text{m}$; 3 – kai $d=1\text{m}$

Adaptyvios ultragarsinės dujų srautų greičio ir garso greičio matavimo sistemos, leidžiančios realizuoti minėtus algoritmus, struktūrinė schema pavaizduota 2 pav. Kai dujų srauto greitis mažas ir signalo ir triukšmo santykis imtuvo išėjime didesnis nei iš anksto numatytas, sistemoje taikomas tuo pat metu priešpriešinėmis kryptimis

sklindančių akustinių signalų sklidimo trukmių matavimo principas. Srauto greitis nustatomas pagal signalų sklidimo priešpriešiais trukmių skirtumą. Kai srauto greitis padidėja iki 10...20 m/s ir signalo bei triukšmo santykis imtuve sumažėja žemiau nustatytos ribos, sistemos struktūra pasikeičia. Ji tampa sistema su nepertraukiamų akustinių matavimo signalų koherentine dažnio manipuliacija [3]. Manipuliavimo signalo periodo trukmė parenkama kartotinė akustinio signalo vėlinimo tiriamajame sraute trukmei. Kita vertus, manipuliavimo signalo pusperiodžio trukmė atitinka $ka(n+1)$ siunčiamojo signalo, kurio dažnis f_2 , ir $ka(n-1)$ siunčiamojo signalo, kurio dažnis f_1 , periodus.

Į srautą išspinduliuoti signalai priimami ultragarsiniais imtuvais ir sustiprinti patenka į dažnio ir fazės komparatorius, kur jų dažniai ir fazės palyginami su į srautą pasiųstų signalų dažniais ir fazėmis. Taip nustatomi ir identifikuojami skirtingi manipuliavimo signalo pusperiodžiai. Skirtuminis signalas po integravimo panaudojamas valdomo generatoriaus dažniui paderinti. Taip realizuojamas teigiamas grįžtamasis ryšys, kurio grandinėje įjungtas akustinis matavimo kanalas. Išmatuotas srauto greitis proporcingas srauto kryptimi (f_{11} ir f_{12}) ir prieš srautą (f_{21} ir f_{22}) siunčiamų dažnių skirtumui [3].



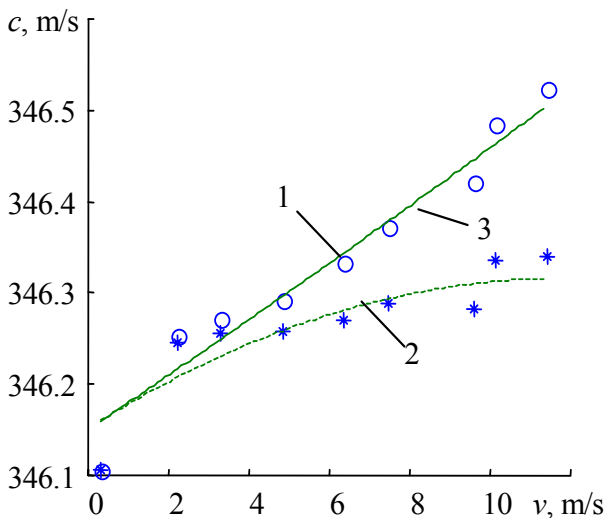
2 pav. Dujų srauto ir garso greičio jose adaptyvios ultragarsinės matavimo sistemos struktūrinė schema

Ekspimentinis adaptyvios ultragarsinės dujų srautų greičio matavimo sistemos tyrimas atliktas Energetikos instituto Šilumos srautų tyrimo ir bandymų laboratorijoje. Oro srauto greitis buvo matuojamas vamzdyje, kurio skersmuo $d=0,4$ m. Prieš matuojant srautas buvo išlyginamas konfuzoriais ir pasiekta, kad srauto profilio plokštumas būtų apie 0.98. Tarpusavyje buvo palyginti matavimo rezultatai, gauti panaudojant adaptyvią ultragarsinę matavimo sistemą, Pito ir Prandlio vamzdelį ir atraminį turbininį skaitiklį. Šie matavimo rezultatai tarpusavyje gerai sutapo [4,5].

Didelis pasiūlytos ultragarsinės matavimo sistemos jautrumas ir skiriamumas įgalino eksperimentiškai patikrinti garso greičio nustatymo dujų sraute (4) ir (6)

algoritmus. Temperatūros pasikeitimo įtakai įvertinti garso greitis buvo išmatuotas prieš eksperimentą, eksperimento metu ir tuoj pat po jo, kai srauto greitis buvo lygus nuliui (tiesi linija 3 pav.). Eksperimento metu dujų srauto greitis buvo didinamas nuo 0,3 iki 12 m/s. Garso greitis buvo nustatomas panaudojant (4) (3 pav. pažymėta "o") ir (6) (3 pav. pažymėta "*") algoritmus. Kaip matome, garso greičio vertės, apskaičiuotos pagal (4) algoritmą, kuris įvertina ir srauto greitį, gali būti aproksimuotos kreive, gana gerai sutampančia su garso greičio vertėmis, gautomis, kai oro srauto greitis buvo artimas nuliui, bet įvertinamas temperatūros padidėjimas (apie $0,6^{\circ}$ C) eksperimento metu. Garso greičio vertės oro sraute, apskaičiuotos pagal [1,4] darbuose pateiktą algoritmą,

visada buvo mažesnės už atitinkamas garso greičio vertes, nustatytas panaudojant (4) algoritmą, esant tai pačiai temperatūrai (3 pav.). Kaip matome 4 paveiksle, santykinis garso greičio verčių, nustatytų panaudojant minėtus algoritmus, nesutapimas, greitai didėja, kai srauto greitis didinamas. Tai turėtų būti naudinga, kai srauto greitį stengiamasi išmatuoti didžiausiu šiuo metu pasiekiamu tikslumu.



3 pav. Garso greičio kitimas oro sraute: 1 – garso greičio, nustatyto pagal (4) algoritmą, aproksimuota kreivė; 2 – garso greičio, nustatyto pagal (6) algoritmą, aproksimuota kreivė; 3 – temperatūros kitimą įvertinanti garso greičio kreivė

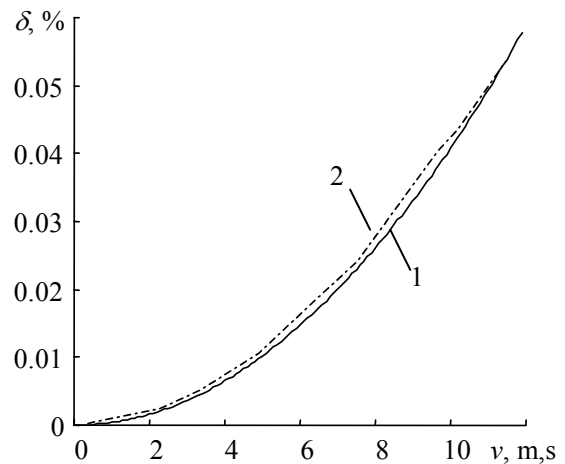
Išvados

1. Garso greičiui nustatyti dujų sraute pasiūlytas patikslintas algoritmas, įgalinantis atsižvelgti į garso greitį dujų sraute, kai matuojamas srauto greitis.

2. Aprašyta adaptivi ultragarsinė dujų srautų greičio matavimo sistema, galinti keisti savo struktūrą priklausomai nuo signalo ir triukšmo santykio imtuvo išėjime.

3. Matavimo sistemos eksperimentinis tyrimas parodė, kad siūlomas algoritmas įgalina padidinti garso greičio nustatymo dujų sraute tikslumą ir pasiekti, kad, esant tai pačiai temperatūrai, garso greičio vertės dujų sraute gerai sutaptų su garso greičio vertėmis, kai srauto greitis artėja prie nulio.

4. Siekiant maksimaliai padidinti srauto greičio matavimo tikslumą būtina įvertinti ne tik srauto profilį, bet ir garso greitį dujų sraute, kuris nustatomas matuojant srauto greitį.



4 pav. Garso greičių oro sraute santykinis nesutapimas, nustatant juos pagal (4) ir (6) algoritmus: 1 – teorinis; 2 – eksperimentinis

Literatūra

1. **Lynnworth T. C.** Ultrasonic Flowmeters// Physical Acoustics/ N. Y. Academic Press 1979. P. 407-519.
2. **Mylvaganam K. C.** High-Rangeability Ultrasonic Gas Flowmeter for Monitoring Flare Gas// IEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control. Vol.36, No.2. 1989. P.144-149.
3. **Butkus J., Jakevičius L., Tumšys O., Gudavičius G.** Flow velocity measurement by coherently modulated ultrasound// Ultragarsas. Nr.1.(26). 1996. P.17-21.
4. **Butkus J., Jakevičius L., Tumšys O.** Srauto greičio matavimas panaudojant impulsinius akustinius signalus// Ultragarsas. Nr.2(30). 1998. P. 25-29.
5. **Butkus J., Jakevičius L., Tumšys O.** Ultragarsinės dujų srautų greičio matavimo sistemos eksperimentinis tyrimas// Ultragarsas. Nr.1(31). 1999. P. 15-18.

J. Butkus, L. Jakevičius, O. Tumšys

Development of the adaptive ultrasonic system for gas flow velocity measurement

Summary

It is shown that high-rangeability of the gas flows and wide variation of the measuring conditions demands to create and to investigate new ultrasonic methods and adaptive systems for flow velocity and flow rate measurement.

A more accurate algorithm for a single-beam transit-time gas flowmeter is proposed. It enables to increase an accuracy of flow velocity measurements as well as to increase the accuracy of the sound speed measurement in gas flow. General layout of the ultrasonic adaptive system with single-beam contrapropagating transit-time and continuous wave coherent frequency manipulation is presented. The system is capable to change its configuration when the measuring conditions are varied. The experimental results of verification of the proposed basic algorithm are presented.