

Turbininių dujų skaitiklių atsakas ir dinaminė paklaida esant srauto pulsacijoms pagal sudėtingus dėsnius

Jurij Tonkonogij¹,

Stasys Šinkūnas²,

Andrius Tonkonogovas¹,

Arūnas Stankevičius¹

¹ Šiluminių įrengimų tyrimų
ir bandymų laboratorija,
Lietuvos energetikos institutas,
Breslaujos g. 3, LT-44403 Kaunas
E-mail: jurij@mail.lei.lt

² Kauno technologijos universitetas

Sukurtas metodas, kuris anksčiau panaudotas turbininių dujų skaitiklių atsako ir dinaminės paklaidos skaitiniam modeliavimui esant paprastiems pulsacijos dėsniams, čia pritaikytas artimiems praktikai sudėtingų pulsacijos dėsnų atvejams.

Raktažodžiai: turbininis dujų skaitiklis, srauto pulsacijos, sudėtingas pulsacijų dėsnis, atsakas, dinaminė paklaida

ĮVADAS

Turbininiai dujų skaitikliai (TDS) yra plačiai naudojami gamtinių dujų apskaitai. Jiems būdinga vadinamoji dinaminė paklaida, kuri atsiranda pulsuojančiame sraute dėl TDS rotoriaus inercijos. Momentinis sukimosi dažnis atsilieka nuo einamosios debito vertės. TDS rodmenys greičiau artėja prie debito, kai pastarasis didėja, negu kai jis mažėja. Todėl atsiranda dinaminė paklaida, kurios ženklas visada teigiamas.

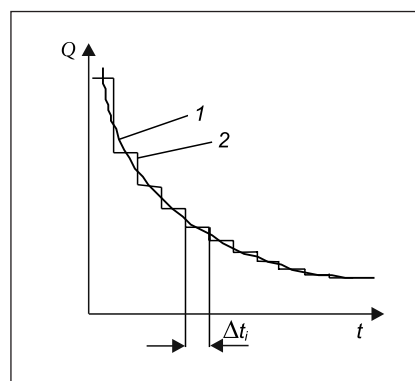
N. Lehmann [1], R. McKee [2], R. Cheeswright [3], B. Lee [4], K. Atkinson [5] ir keletas kitų mokslininkų atliko plačius dinaminės paklaidos tyrimus, kurie apibendrinti ISO dokumente [6]. Iki šiol visi rezultatai gauti analizuojant elementarius pulsacijų dėsnius – stačiakampį, sinusinį ir trikampį. Tačiau praktikoje TDS paprastai veikia esant sudėtingiems pulsacijos dėsniams, kaip tai parodė R. Cheeswright, nagrinėjęs greičio pulsacijas dujotiekyje netoli slėgio reguliatoriaus [7]. Kartais pasitaiko svyravimų, kai periodiškai kinta srauto kryptis.

Sukurtasis metodas [8], anksčiau pritaikytas TDS atsako ir dinaminės paklaidos skaitiniam modeliavimui esant paprastiems srauto pulsacijos dėsniams [9, 10], skirtas skaičiavimui esant įvairiems sudėtingiems srauto pulsacijos dėsniams.

METODO PAGRINDAI

Bet kuri laisvai numatyta debito kitimo laike kreivė pakeičiama laiptuota linija aplink kreivę (1 pav.).

Kiekviename laiko žingsnyje Δt , TDS rodmenų skaičiavimui naudojama skaitiklio atsako į stačiakampį (laiptinį) debito kitimą lygtis. Eksperimentai rodo, kad toks TDS atsakas vyksta eksponentiškai [11].



1 pav. Laisvai numatytos debito kitimo laike kreivės (1) pakeitimas laiptuota linija (2). Laiptelio ilgis – Δt .

Pagrindinis ir vienintelis proceso lemiamas parametras – TDS sukimosi inercijos indeksas T , kartais vadinamas inercijos laiko pastovia ir gana lengvai nustatomas eksperimentiškai [11].

Metodas leidžia atsisakyti iki šiol naudojamos tradicinės TDS rotoriaus sukimosi diferencialinės lygties su keliais sunkiais ir su didele neapibrėžtimi nustatomais parametrais. Šių parametrų visuma pakeičiama vieninteliu parametru T . Šis universalus metodas gali būti taikomas ne tik dujų skaitikliams, bet ir įvairių skysčių srauto matuokliams bei skaitikliams, tiek su sukamaisiais, tiek su kitais judančiais jutikliais. Jis iš esmės taikomas ne tik debito, bet ir kai kurių kitų parametrų, pvz., temperatūros, slėgio ir greičio, matuokliams. Vienintelis metodo apribojimas – reikalavimas, kad matuoklio rodmenų kitimo dėsnis būtų pastovus nuo pat proceso pradžios arba kitimo dėsnis turi būti žinomas atsižvelgus į matuojamojo parametro vertę visose jo kitimo ribose.

MATEMATINIS MODELIS

Skaičiavimui galima pritaikyti baigtinių skirtumų metodą arba spręsti diferencialinę proceso lygtį [8]. Šiuo atveju pasirinktas pirmas metodas, turintis tam tikrų skaičiavimo rezultatų apdorojimo, apibendrinimo ir pateikimo pranašumų.

Ieškomas TDS rotoriaus sukimosi dažnio ω pasiskirstymas laikotarpyje, kuris yra lygus srauto pulsacijos periodui $\Delta t_0 = 1/f$. Šis laikotarpis buvo suskirstytas į pakankamai daug (n) laiko atkarpų Δt_j :

$$\Delta t_j = \Delta t_0 / n. \quad (1)$$

Kiekvienoje tokioje i -oje atkarpoje (i -ame laiko žingsnyje) galutinis sukimosi dažnis ω buvo nustatomas pagal

žinomą galutinį dažnį $\omega_{gal_{(i-1)}}$, iš skaičiavimo ankstesniame ($i-1$)-ame žingsnyje, tuo tarpu jis yra ir pradinis ω_{prad} dabartiniame i -ame žingsnyje, pagal lygtį:

$$\omega_{gal_i} = \omega_Q + (\omega_{pr_i} - \omega_Q) \cdot \exp(-\Delta t_i/T); \quad (2)$$

čia ω_Q – sukimosi dažnis, atitinkantis dabartinę momentinę srauto Q vertę, nustatomas atsižvelgiant į impulso vertę k_{imp} pagal lygtį:

$$\omega_Q = Q / k_{imp}. \quad (3)$$

TDS inercijos indeksas T nustatomas kiekviename žingsnyje, atsižvelgiant į momentinę debito vertę pagal lygtį [10]:

$$T = C_T / Q^m_j. \quad (4)$$

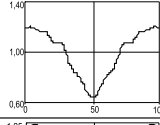
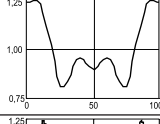
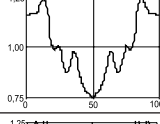
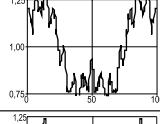
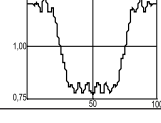
Parametrai C_T ir m (4) lygtyje nustatomi eksperimentiškai konkrečiam TDS [10]. Kaip kraštinė sąlyga naudojama sukimosi dažnių intervalo Δt_0 galuose lygybė:

$$\omega_{pr_i} = \omega_{gal_{i-1}}. \quad (5)$$

IŠTIRTI DEBITO PULSACIJOS DĒSNIAI

Skaičiavimai buvo atlikti esant keliems sudėtingiems debito pulsacijos dėsniams, kurie yra artimi pasitaikantiems praktikoje [7]. Kiekvienas toks dėsnis gautas pagal Fourier principą, sudėjus elementarius įvairių amplitudžių ir dažnių kosinusinius dėsnius. Lentelėje pateiktos visų penkių ištirtų dėsnų lygtys, impulso formos, šių dėsnų koeficiento C_a , kuris (6) lygtyje apibūdina apskaičiuotą ribinę dinaminę paklaidą, vertė.

Lentelė. Ištirti pulsacijos dėsniai

Dėsnio Nr.	Pulsacijos dėsnio lygtis	Impulso forma	Koeficientas C_a (6) lygtyje
1	$\bar{Q} = 1 + \Delta\bar{Q}(\cos(2\pi t f) - 0,25\cos(4\pi t f) + 0,09 \cdot \cos(6\pi t f) - 0,05 \cdot \cos(12\pi t f) + 0,07 \cdot \cos(14\pi t f) - 0,04 \cdot \cos(18\pi t f))$		42,71
2	$\bar{Q} = 1 + \Delta\bar{Q}(2/3\Delta\cos(2\pi t f) + 1/2\Delta\cos(4\pi t f) - 1/4\Delta\cos(8\pi t f))$		48,93
3	$\bar{Q} = 1 + \Delta\bar{Q}(4/5 \cdot \cos(2\pi t f) - 1/4\cos(8\pi t f) + 1/7\cos(16\pi t f) - 1/12\cos(20\pi t f))$		38,26
4	$\bar{Q} = 1 + \Delta\bar{Q}(\cos(2\pi t f) - 0,35\cos(6\pi t f) + 0,25\cos(28\pi t f) - 0,09\cos(46\pi t f) - 0,05\cos(96\pi t f) + 0,07\cos(120\pi t f) - 0,04\cos(150\pi t f))$		35,60
5	$\bar{Q} = 1 + \Delta\bar{Q}(\cos(2\pi t f) - 0,25\cos(6\pi t f) + 0,09\cos(10\pi t f) - 0,05\cos(24\pi t f) + 0,07\cos(30\pi t f) - 0,04 \cos(38\pi t f))$		59,86

Atsako į debito pulsacijas, t. y. TDS rodmenų kitimo laike, dinaminės paklaidos ir rodmenų pulsacijos, amplitudė apskaičiuota TDS MZ100 su metaline sparnuote, esant $DN = 100$ mm, vidutiniam debitui $400 \text{ m}^3/\text{h}$ bei plačiose pulsacijų dažnio f ir santykinės amplitudės $\Delta\bar{Q}$ ribose.

TDS ATSAKAS

TDS atsako skaičiavimo rezultatai parodyti 2 pav.

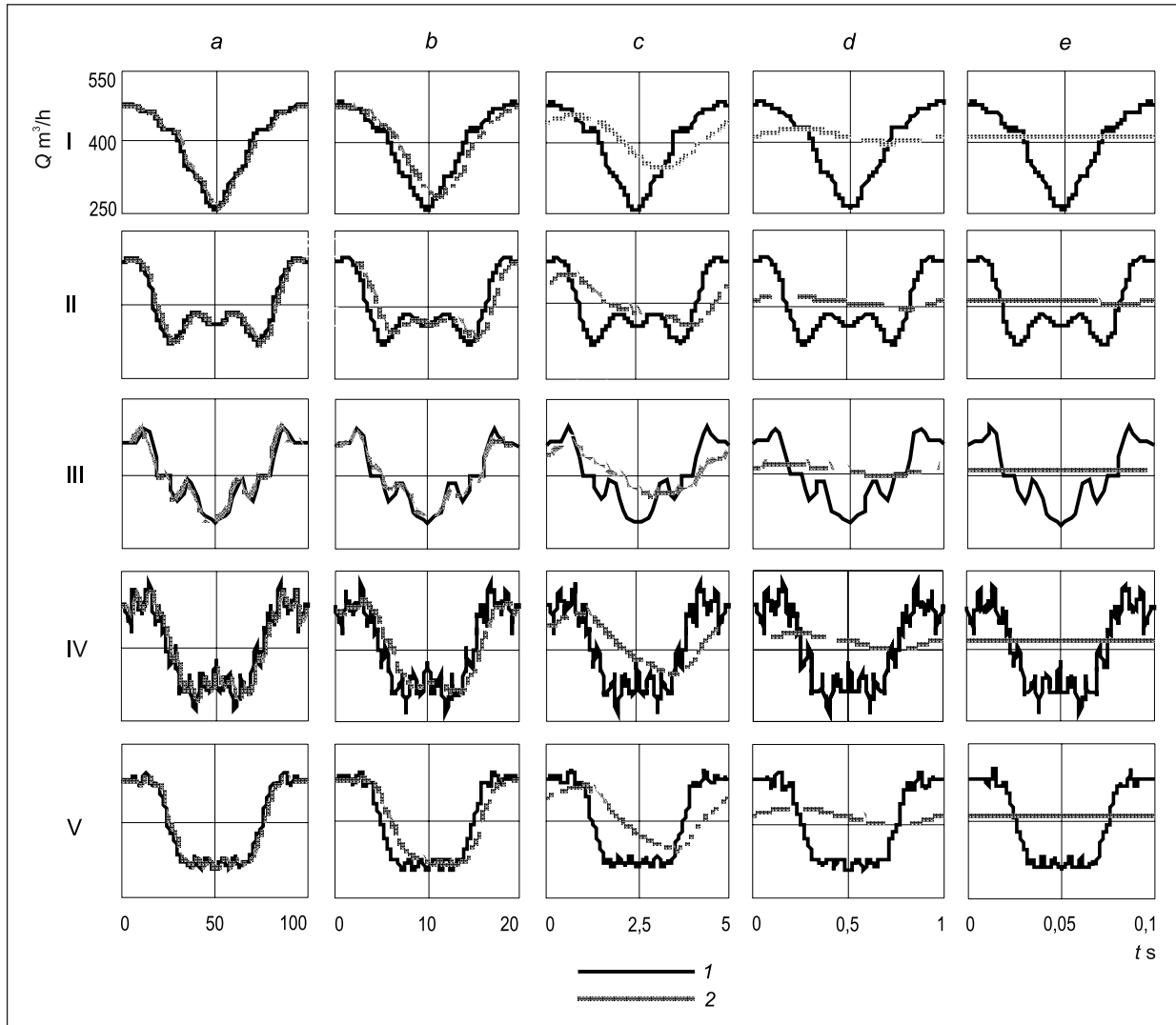
Esant gana mažiems pulsacijos dažniams ($f = 0,001\text{--}0,01$ Hz) skaitiklio inercija beveik nepasireiškia, ir TDS skaitiklio rodmenys (rotoriaus sukimosi dažnis) gana tiksliai sutampa su debito kitimo kreive. Pulsacijos dažniui didėjant, inercija pasireiškia vis labiau, ir skaitiklio rodmenys vis daugiau atsilieka nuo tikrųjų momentinių skaitiklio rodmenų. Esant visiems pulsacijos dėsniams, TDS, dažniui didėjant, pirmiausia nustoja atsakyti į nedidelių amplitudžių pulsacijos sudedamąsias, paskui – į vis didesnių amplitudžių dedamąsias.

Dažniui didėjant, TDS rodmenų pulsacijos amplitudė mažėja, ši pulsacija slenka pagal fazę, ir jos dėsnis vis artėja prie kosinusinio dėsnio. Esant pakankamai dideliems pulsacijos dažniams (1–10) Hz eilės, dėl inertiškumo TDS beveik neatsako į debito pulsacijas, jo sukimosi dažnis išlieka pastovus, tačiau jis išlieka didesnis už dažnį, kuris atitinka vidutinį debitą. Šis perteklius lemia TDS dinaminę paklaidą.

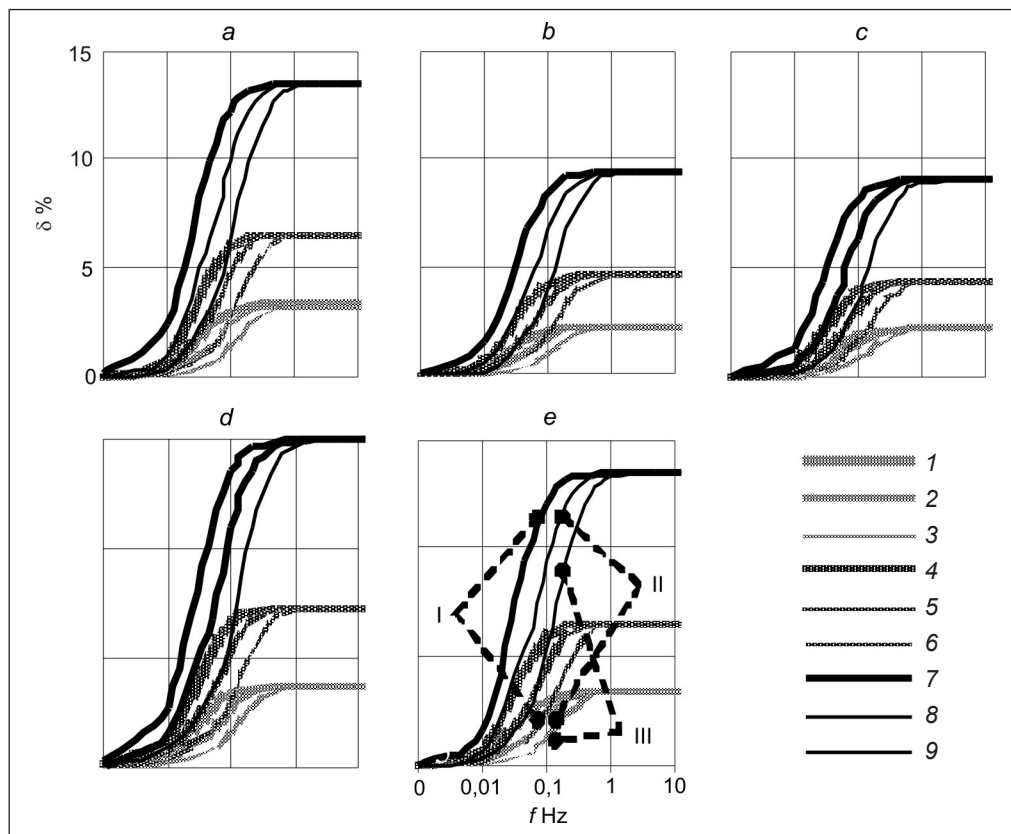
TDS DINAMINĖ PAKLAIDA IR RODMENŲ PULSACIJOS AMPLITUDĖ

TDS MZ100 skaitiklio dinaminės paklaidos ir rodmenų pulsacijos amplitudės priklausomumas nuo dažnio, esant įvairioms debito pulsacijos amplitudėms ir įvairiems debitams, parodytas 3 ir 4 pav. visiems išnagrinėtiems pulsacijos dėsniams pagal lentelę.

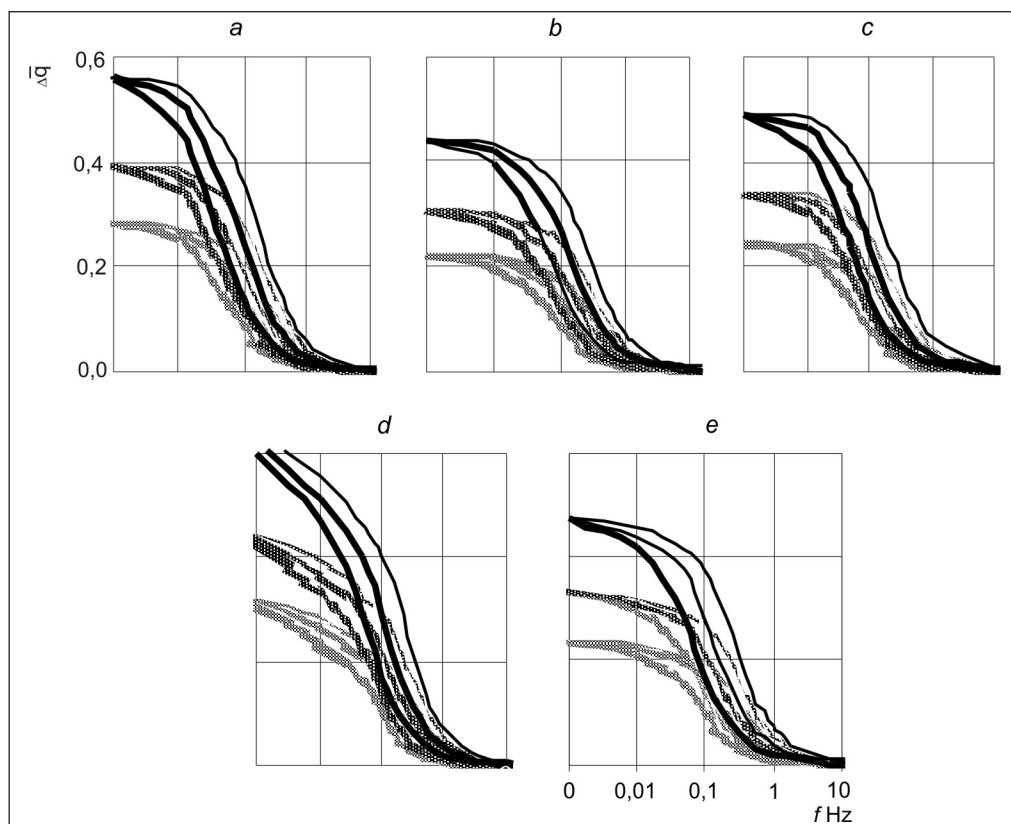
Dinaminės paklaidos kitimo pobūdis kokybiškai toks, kaip ir paprastų pulsacijos dėsnų atvejais. Esant pakankamai mažiems pulsacijos dažniams, kai skaitiklio inercija



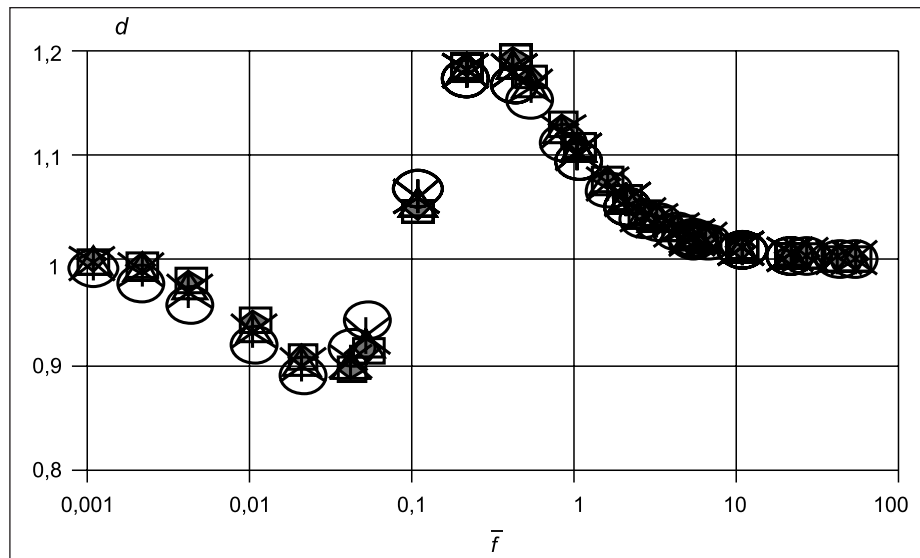
2 pav. TDS MZ100 su metaline sparnuote atsakas į debito pulsacijas. 1 – debitas, 2 – skaitiklio rodmenys; I – V – pulsacijų dėsniai atitinkamai 1 lentelėi; a – e = 0,01; 0,05; 0,2; 1; 10 Hz; $\Delta\bar{Q} = 0,25$



3 pav. TDS MZ100 skaitiklio dinaminės paklaidos priklausomumas nuo pulsacijos dažnio. *a, b, c, d, e* – 1–5 pulsacijos dėsniai pagal 1 lentelę; I, II, III – debitas 100, 200, 400 m³/h; atitinkamai 1–3, 4–6, 7–9 – $\Delta\bar{Q}$ = 0,25; 0,35; 0,5



4 pav. TDS MZ100 skaitiklio rodmenų pulsacijos amplitudės priklausomumas nuo pulsacijos dažnio. Apibrėžimai – 3 pav.



5 pav. Dinaminės paklaidos ir skaitiklio rodmenų pulsacijos amplitudės, atsižvelgus į pulsacijos dažnį, santykinų dydžių sumas. 1 ir 2 – atitinkamai 1 ir 4 pulsacijos dėsniai

nepasireiškia, dinaminė paklaida artima nuliui. Dažniui didėjant dinaminė paklaida vis labiau didėja. Esant tam tikram dažniui paklaidos augimo tempas pasiekia didžiausią vertę ir pradeda mažėti. Tuo metu dinaminė paklaida didėja, kol nepasiekia savo ribinės vertės δ_{rib} , esant dažniams (1–10) Hz. Tai atsitinka TDS rotoriaus sukimosi dažniui nustojus pulsuoti ir tapus pastoviu. Taigi dinaminės paklaidos ir skaitiklio atsako priklausomybės nuo debito pulsacijos dažnio atitinka viena kitai. Šių priklausomumų pobūdis lygiai toks, kaip ir paprastų pulsacijos dėsnų atvejais.

Dinaminės paklaidos ir TDS rodmenų pulsacijos amplitudės priklausomumai nuo debito pulsacijos dažnio sutampa (3 ir 4 pav.). Šių dviejų parametrų nedimensinės sumos $(\Delta q/\Delta \bar{Q} + \delta/\delta_{rib})$ priklausomumas nuo nedimensinio pulsacijos dažnio $\bar{f} = f \cdot T$ esant dviem sudėtingiems pulsacijos dėsniais parodytas 5 pav.

Esant pakankamai mažoms ir didelėms pulsacijos dažnio vertėms suma yra lygi vienetui, esant tarpinėms vertėms – iki 20 % nukrypsta į kažkurią pusę dėl pulsacijos dėsnio.

RIBINĖ DINAMINĖS PAKLAIDOS VERTĖ

Ribinė dinaminės paklaidos vertė δ_{rib} priklauso tik nuo santykinės debito pulsacijos amplitudės $\Delta \bar{Q}$. Ribinė dinaminės paklaidos vertė:

$$\delta_{rib} = C_a \Delta \bar{Q}^2. \quad (6)$$

Pastovioji C_a šioje lygtyje priklauso tik nuo pulsacijos dėsnio. Esant paprastiesiems dėsniais (stačiakampis, kosinusinis ir trikampis) ši vertė yra atitinkamai $C_a = 100, 50$ ir $33,5$. C_a vertės esant sudėtingiems pulsacijos dėsniais pateiktos lentelėje. Šios vertės artimos vertėms kosinusinio ir trikampio dėsnų atvejais.

IŠVADOS

1. Anksčiau mūsų sukurtas TDS atsako į pulsacijas skaitinio modeliavimo ir dinaminės paklaidos skaičiavimo metodas pritaikytas artimiems praktikai sudėtingiems pulsacijos dėsniais.

2. TDS dinaminė paklaida ir atsako (skaitiklio rodmenų) pulsacijos amplitudė susijusios tarpusavyje. Jų kitimo pobūdis esant sudėtingiems pulsacijos dėsniais toks, kaip ir paprastų dėsnų atvejais.

3. Taikant pateiktą metodą dinaminė paklaida gali būti apskaičiuota esant bet kuriems pulsacijos dėsniais bet kuriomis, tarp jų ir lauko, sąlygomis.

Gauta 2011 05 10
Priimta 2011 06 20

Literatūra

1. Lehmann N. Dynamisches Verhalten von Turbinenrad-gaszählern. *Das Gas und Wasserfach – GWF*. 1990. Vol. 4. P. 160–167.
2. McKee R. J. Pulsation effects on single- and two rotor turbine meters. *Flow Measurement and Instrumentation*. 1992. Vol. 3. No. 3. P. 151–166.
3. Cheesewright R., Bisset D., Clark C. Factors which influence the variability of turbine flow meter signal characteristics. *Flow Measurement and Instrumentation*. 1998. Vol. 9. No. 2. P. 83–89.
4. Lee B., Cheesewright R., Clark C. The dynamic response of small turbine flow meters in liquid flows. *Flow Measurement and Instrumentation*. 2004. Vol. 15. No. 5–6. P. 239–248.
5. Atkinson K. N. A software tool to calculate the over-registration error of a turbine meter in pulsating flow. *Flow*

- Measurement and Instrumentation*. 1992. Vol. 3. No. 3. P. 167–172.
6. ISO / TR 3313: 1998 – Measurement of fluid flow in closed conduits – Guidelines on the effects of flow pulsations on flow-measurement instruments.
 7. Cheesewright R., Atkinson K. N., Clark C., Ter Horst G. J. P., Mottram R. C., Viljeer J. Field tests of correction procedures for turbine flowmeters in pulsate flows. *Flow Measurement and Instrumentation*. 1996. Vol. 7. No. 1. P. 7–17.
 8. Tonkonogij J. The new equation of rotation of the turbine gas meter in unsteady flows. *Energetika*. 2009. Vol. 55. No. 3. P. 172–177.
 9. Tonkonogij J., Pedišius A. Numerical simulation of the turbine gas meters behavior in the pulsing flow. *Journal of Heat Transfer Research*. 2008. Vol. 39. No. 7. P. 559–570.
 10. Tonkonogij J., Pedišius A., Stankevičius A. The new semi-experimental method for simulation of turbine flow meters rotation in the transitional flow. *Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology*. Paris, France, July 2008. Vol. 30. P. 208–213.
 11. Tonkonogij J., Pedišius A., Stankevičius A., Krukovskij P. The dynamic error of turbine gas meters in a pulsating flow. *Industrial Heat Engineering*. 2008. Vol. 30. No. 4. P. 85–93.

Jurij Tonkonogij, Stasys Šinkūnas, Andrius Tonkonogovas, Arūnas Stankevičius

RESPONSE AND DYNAMIC ERROR OF TURBINE GAS METER IN FLOWS PULSATING ACCORDING TO COMPLEX LAWS

Summary

The method previously applied for a numerical simulation of the response and dynamic error of a turbine gas meter in flows with a simple law of pulsation was applied to complex laws of pulsation similar to those that occur in practice.

Key words: turbine gas meter, flow pulsation, complex pulsation law, response, dynamic error

Юрий Тонконогий, Стасис Шинкунас, Андрюс Тонконогovas, Арунас Станкявичюс

ОТКЛИК И ДИНАМИЧЕСКАЯ ПОГРЕШНОСТЬ ТУРБИННОГО СЧЕТЧИКА ГАЗА В ПУЛЬСИРУЮЩИХ ПО СЛОЖНЫМ ЗАКОНАМ ПОТОКАХ

Резюме

Предварительно разработанный метод численного моделирования отклика турбинного счетчика газа и его динамической погрешности в пульсирующих по простым законам потоках применен для моделирования поведения счетчика при пульсациях по близким к практике сложным законам.

Ключевые слова: турбинный счетчик газа, пульсация потока, сложный закон пульсации, отклик, динамическая погрешность